

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITÉ M'HAMED BOUGARA BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Génie Mécanique

Mémoire de Master

Filière : Électromécanique
Spécialité : Électromécanique

THEME

**Analyse Thermographie Infrarouge au niveau de la centrale
à cycle combiné de RAS-DJINET**

Présenté par :

Mr. HAMLAT Mohammed

Mr. ZAOUI Mohammed

Promotrice :

Mme. BAHLOUL Hassiba

Encadreur :

M.CHELLIL Sadek

Résumé

La maintenance conditionnelle, précisément l'analyse thermique joue un rôle très important dans l'industrie pour prolonger la durée de vie des équipements en fonction, et éviter les pannes et les arrêts de production.

Dans ce document nous avons présenté la maintenance d'une manière générale puis l'application de la méthode d'analyse thermique thermographie infrarouge à qui nous avons effectué des réalisations sur quelques équipements au niveau de la centrale électrique à cycle combiné de Ras-djenat, pour donner une idée générale sur l'intérêt d'utilisation de cette méthode en maintenance prédictive.

Mots clés :

Thermographe, analyse thermique, cycle combiné

ملخص

تلعب صيانة, والتحليل الحراري الدقيق، دورًا مهمًا للغاية في الصناعة, و لإطالة عمر المعدات قيد التشغيل, وتجنبنا الأعطال وتوقف الإنتاج.

في هذه المذكرة تحدثنا عن الصيانة بشكل عام, ثم تطبيق طريقة التحليل الحراري بالأشعة تحت الحمراء التي قمنا بتنفيذها على بعض المعدات على مستوى محطة توليد الكهرباء ذات الدورة المركبة برأس جنات ، لإعطاء فكرة عامة عن الفائدة من استخدام هذه الطريقة في الصيانة التنبؤية.

الكلمات الدالة

الرسم الحراري, التحليل الحراري, الدورة المركبة,

Abstract

Condition maintenance, precisely thermal analysis, plays a very important role in the industry to prolong the life of the equipment in operation, and to save problems and continue of production.

In this work we have presented the maintenance in general then the application of the thermal analysis method infrared thermography which we carried out on some equipment at the level of the combined cycle power plant of Ras-djenat, to give a general idea of the interest of using this method in predictive maintenance.

Key words:

Thermograph, thermal analysis, combined cycle

REMERCIEMENTS

On remercie DIEU le tout puissant de nous avoir donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre promotrice Dr. BAHLOUL HASSIBA qui a bien voulu nous encadrer pour l'élaboration et le suivi de notre projet de fin d'étude.

Nous tenons à remercier également les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner ce travail et d'apporter leurs réflexions et suggestions scientifiques.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude À notre encadreur Mr. CHELLIL SADEK pour son aide et son encouragement qui n'a épargné aucun effort pour bon déroulement de notre stage dans les meilleures conditions, et tous les personnels du central de Ras-Djinet.

Nous profitons de l'occasion pour remercier tous nos enseignants de FT/UMBB

Dédicaces

*Pour que ma réussite soit complète, je partage ce
modeste travail avec toutes les personnes que
j'aime, je le dédie:*

*À mes très chers parents qui n'ont pas cessé de
prier pour moi et qui
m'ont aidé durant toute la durée de mes études,
que Dieu les garde
pour nous.*

*Je dédié aussi ce travail à mon cher frère et à mes
sœurs*

*A mes collègues et tous mes amis de Dellys avec
qui j'ai passé des bons moments.*

*Enfin à tous ceux que j'aime et à tous ceux qui
m'aiment.*

H.Mohammed

Dédicaces

*Pour que ma réussite soit complète, je partage ce
modeste avec toutes les personnes que j'aime, je le*

dédie:

*À mes très chers parents qui n'ont pas cessé de
prier pour moi et qui*

m'ont aidé durant toute la durée de mes études,

que Dieu les garde

pour nous

Je dédié aussi ce travail à mes chers frères

À tous mes collègues et mes amis avec qui j'ai

passé des bons moments.

Enfin à tous ceux que j'aime et à tous ceux qui

m'aiment.

Z.Mohamed

Sommaire

Introduction générale

Chapitre 1 : Présentation de la centrale à cycle combiné de RAS-DJINET

I.1	Introduction.....	3
I.2	Historique de la centrale.....	4
I.3	Centrale électrique cycle combiné de RAS-DJINET3 × 400 MW	5
I.4	Les composants principale de production du type cycle combiné (TG-TV) single shaf	6
I.4.1	Turbine à Gaz.....	7
I.4.2	Les Composants de la turbine à gaz.....	8
I.4.3	Caractéristiques techniques.....	9
I.4.4	Fonctionnement de la Turbine à Gaz.....	10
I.5	Turbine à Vapeur.....	10
I.5.1	Caractéristiques techniques.....	12
I.5.2	Fonctionnement de Turbine a Vapeur (circuit eau - vapeur).....	12
I.6	Alternateur.....	13
I.6.1	Caractéristiques techniques.....	14
I.7	La chaudière de récupération.....	14
I.8	Condenseur.....	16
I.9	Les pompes.....	16
I.9.1	Pompes d'alimentation (50LAB10AP001 / 50LAB20AP001).....	16
I.9.2	Pompes d'extraction (50LCB10AP001/50LCB11AP001)	16
I.10	Les Transformateurs.....	17
I.10.1	Transformateur principal (GSUT).....	17
I.10.2	Transformateur auxiliaire de l'unité (UAT).....	18
I.10.3	Transformateurs MT /BT auxiliaires secs.....	19
I.11	Les auxiliaires de la centrale.....	20
I.11.1	La Salle de commande	20
I.11.2	La station de pompage et de filtration d'eau de mer.....	20
I.11.3	Station traitement des eaux.....	21
	Conclusion.....	22

Chapitre II : Généralités sur la maintenance

II.1	Introduction.....	23
II.2	Définition de maintenance.....	23
II.2.1	Définition selon AFNORX60-01(décembre1994).....	23
II.2.2	Définition selon CEN projet WI319-003(1997).....	23

II.2.3	Définition selon la norme NF-X60-010.....	23
II.3	Types de maintenance de maintenance.....	24
II.3.1	La maintenance corrective.....	24
II.3.1.1	Opérations de la maintenance corrective.....	24
II.3.1.2	Le temps en maintenance corrective.....	25
II.3.2	La maintenance préventive.....	25
II.3.2.1	Opérations de la maintenance préventive.....	25
II.3.2.2	Objectifs de la maintenance préventive.....	26
II.3.2.3	La maintenance préventive systématique.....	27
II.3.2.4	La maintenance préventive conditionnelle.....	27
II.3.2.5	La maintenance prévisionnelle.....	28
II.4	Les critères de maintenabilité.....	29
II.5	Différents niveaux de maintenance.....	29
	Conclusion.....	30

Chapitre III : Maintenance conditionnelle par la thermographie

III.1	Introduction.....	31
III.2	Définition de la maintenance conditionnelle	32
III.3	Définent méthodes de diagnostic comme utile de maintenance.....	33
III.3.1	Diagnostic vibratoire.....	33
III.3.1.1	Définition d'une vibration.....	33
III.3.1.1.1	Approche intuitive.....	33
III.3.1.2	Les vibrations.....	34
III.3.1.3	Définition théorique d'une vibration.....	35
III.3.1.4	Descriptions des vibrations.....	37
III.3.1.5	Amplitude et fréquence.....	39
III.3.2	Diagnostic des huiles.....	40
III.3.2.1	Fonctions des lubrifiants	40
III.3.2.2	Classification des huiles.....	40
III.3.2.3	Surveillance et maintenance des lubrifiants.....	41
III.3.2.4	Les méthodes d'analyse des lubrifiants.....	42
III.3.3	Diagnostic par l'analyse thermique	44
III.3.3.1	Mesure de température par contact.....	44
III.3.3.2	Mesure de température sans contact.....	44

Sommaire

III.3.3.2.1	La thermographie infrarouge.....	45
III.3.3.2.2.	Notions en thermodynamique.....	45
III.3.3.2.3.	Notions de température, chaleur.....	45
III.3.3.2.4	Modes de transferts de chaleur.....	49
III.3.3.2.5	Corps noir	53
III.3.3.2.6	Corps cible (corps réel).....	56
III.3.3.2.7	Utilisation de la thermographie Infrarouge en Maintenance prédictive.....	57
III.3.3.2.8	Détecteur infrarouge.....	57
III.3.3.2.9	Système de Mesure par thermographie Infrarouge.....	58
III.3.3.2.11	La caméra infrarouge.....	59
	Conclusion.....	64
Chapitre IV : Application d'analyse thermique		
IV.1	Introduction.....	65
IV.2	Matériel utilisé.....	65
IV.2.1	Camera AGEMA 570.....	65
IV.2.2	Logiciel IRWIN OLE.....	66
IV.2.3	Caractéristiques de logiciel.....	66
IV.3	La première application sur la porte visible d'une chaudière.....	67
IV.4	La deuxième application sur les isolateurs de transformateur principale.....	69
IV.5	La troisième application sur les vannes.....	70
	Conclusion.....	73
	Conclusion générale.....	74
Références Bibliographiques		
Annexes		

Liste des figures

Liste des figures

	Chapitre 1 : Présentation de la centrale cycle combiné de RAS-DJINET	
Figure.I.1	Vue 3D de la centrale électrique à cycle combiné RAS-DJINET.....	3
Figure.I.2	Panneau de Projet de réalisation.....	4
Figure.I.3	Station thermique de la nouvelle centrale de RAS-DJINET.....	4
Figure.I.4	Vue en section d'un cycle combiné.....	5
Figure.I.5	Vue TV, GÉNÉRATRICE, TG.....	6
Figure.I.6	Cycle de fonctionnement de la centrale (cycle combiné) de RAS-DJINET.....	6
Figure.I.7	Schéma de turbine à gaz en mode cycle combiné.....	7
Figure.I.8	Composants de la turbine à gaz, La turbine à gaz est formée de trois parties élémentaires.....	8
Figure.I.9	Image de chambre de combustion.....	9
Figure.I.10	Fonctionnement de la turbine à Gaz.....	10
Figure.I.11	Turbine à vapeur (ST).....	11
Figure.I.12	Circuit eau – vapeur.....	13
Figure.I.13	Alternateur Synchrone.....	13
Figure.I.14	La chaudière de récupération.....	15
Figure.I.15	La chaudière de récupération unit #50 vu d'unit #60 de Ras-djinet.....	15
Figure.I.16	Transformateur principal.....	18
Figure.I.17	Transformateur auxiliaire de l'unité.....	19
Figure.I.18	Salle de commande de la centrale à cycle combiné Ras-djinet.....	20
Figure.I.19	Station de pompage.....	21
	Chapitre II : Généralités sur la maintenance	
Figure.II.1	Les différents types de maintenance.....	24
	Chapitre III : Maintenance conditionnelle par la thermographie	
Figure.III.1	Origine du bruit.....	34
Figure.III.2	Vibrations périodiques.....	35
Figure.III.3	Vibrations d'un système "masse-ressort".....	36

Liste des figures

Figure.III.4	Vibration sinusoïdale.....	37
Figure.III.5	Logarithme des vibrations.....	38
Figure.III.6	L'amplitude, de la période, de la fréquence.....	39
Figure.III.7	Conversion de températures en Celsius et Kelvin.....	49
Figure.III.8	Modes de transferts de chaleur.....	49
Figure.III.9	Spectre électromagnétique.....	53
Figure.III.10	Emittance spectrale radiante d'un corps noir.....	54
Figure.III.11	Courbe définie la loi de Wien.....	56
Figure.III.12	Principe de fonctionnement de la caméra infrarouge.....	60
Figure.III.13	La caméra à monodétecteur.....	61
Figure.III.14	La caméra à plan focal.....	62

Chapitre IV : Application d'analyse thermique

Figure.IV.1	Camera AGEMA 570.....	64
Figure.IV.2	Logiciel IRWIN OLE.....	65
Figure.IV.3	Porte visible avant l'intervention.....	66
Figure.IV.4	Porte visible après l'intervention.....	67
Figure.IV.5	Vue de sud.....	68
Figure.IV.6	Vue d'ouest.....	68
Figure.IV.7	Vue de lest.....	69
Figure.IV.8	La vanne avant l'intervention.....	70
Figure.IV.9	La vanne après l'intervention.....	71

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I : Présentation de la centrale cycle combiné de RAS-DJINET

Tableau.I.1	Les divers paramètres de fonctionnement de turbine à gaz.....	9
Tableau.I.2	Les divers paramètres de fonctionnement de turbine à vapeur.....	12
Tableau.I.3	Les paramètres nominaux de l'alternateur.....	14

Chapitre IV : Application d'analyse thermique

Tableau.IV.1	Caractéristiques de logiciel.....	65
Tableau.IV.2	Température avant l'intervention.....	66
Tableau.IV.3	Température après l'intervention.....	67
Tableau.IV.4	Les températures TP dans les trois vue.....	69
Tableau.IV.5	Les températures obtenir avant l'intervention.....	70
Tableau.IV.6	Les températures obtenir après l'intervention.....	71

Nomenclature

Nomenclature

F	Force centrifuge
M	Masse W
I	Moment d'inertie
R	Rayon
B	Le balourd
G	Centre de gravité
L	Langueur
N	Vitesse de rotation
T	Température absolue du corps en Kelvin
Te	Température d'environnement
Ta	Le facture de transmission atmosphère
E	L'émissivité
L	Longueur d'onde
W_λ	Flux de puissance émis par le corps noir a la longueur d'onde
W_λ	Flux de puissance émis par un corps réel a la longueur d'onde
λ	La longueur d'onde
λ_{\max}	Longueur d'onde à laquelle se produit l'émission maximale
$W_{\lambda D}$	Flux de puissance émis par le corps noir a la longueur d'onde
σ	La contrainte de flexion
C	La vitesse de la lumière
K	La constante de Boltzmann

Introduction générale

Introduction générale

L'électricité est l'énergie la plus utilisée actuellement par excellence. Elle occupe une place prépondérante dans l'industrie et l'usage domestique, cette énergie ne se trouve pas dans la nature sous forme exploitable, il est donc nécessaire de la produire à partir de la conversion d'autres formes d'énergies telles que l'énergie solaire, nucléaire, éolienne ...etc. La central électrique à cycle combiné de Ras Djinet dans la Willaya de Boumerdes a été mise en exploitation en mai 2018, d'une puissance de 1113 mégawatts, la centrale en question joue un rôle important dans le cadre de l'interconnexion des réseaux nationaux d'électricité.

Et l'industrie en Algérie nécessite une énergie électrique croissante. Cela demande la réalisation de plusieurs centrales à cycle combiné dernièrement. Ces centrales sont des sources importantes d'énergie électrique, qui fonctionnent avec des machines tournantes, de plus en plus performantes et complexes comme la turbine à gaz.

Ces types des machines composées d'organes fragiles soumis à des contraintes mécaniques importantes et à des environnements industriels difficiles ce qui implique des défaillances et des dégradations au fonctionnement de la machine. Lorsque la machine joue un rôle vital dans la production, ces défauts peuvent s'avérer lourds de conséquences.

Un contrôle continu des machines nécessite une analyse en temps réel ou online pour la détection de défauts et un choix optimal des meilleurs paramètres de mesure dans le but d'obtenir une grande sensibilité et sélectivité dans l'identification des défauts.

Ces centrales thermiques telle que la centrale à cycle combiné de Ras-Djinet contiennent des machines et des équipements vitales (TG-TV, alternateur, transformateur, chaudière...) donc il faut éviter les pannes pour éviter les arrêts de production.

D'ailleurs pour éviter les arrêts de production imprévus et les pertes économiques, qui en découlent et pour détecter les défauts qui réduisent le fonctionnement, dans le but d'assurer à l'équipement des performances de haute qualité doivent choisir avec précaution la politique de maintenance convenable pour suivi les équipements, on sous-entend par cette politique « la maintenance conditionnelle» qui est considérée comme la maintenance la plus adéquate pour le bon fonctionnement et l'exploitation optimale en quantité et en qualité et au moindre coût.

Dans ce modeste travail nous avons choisir la méthode d'analyse thermographie infrarouge comme un moyen de diagnostic au niveau de la centrale électrique de cap-djenat, avec cette méthode on peut mesure les températures de surface et leurs variations.

Ce contrôle réalisé sur des installations en service décèle anomalies et échauffements anormaux (mauvaises connexions, surcharges, etc.). L'inspection par thermographie des bâtiments et des installations électrique de sous tension sans contact permet ainsi de prévoir les interventions correctives et les éventuels travaux :

- La recherche des points anormalement chauds pouvant être à l'origine d'un incendie ou d'un arrêt de la production ;
- La recherche des disparités thermiques sur les lignes de production pour identifier les causes de dysfonctionnement ;
- L'analyse des origines d'échauffement ;
- La préconisation des éventuelles mesures correctives et préventives à mettre en place.

Notre travail permet de faire une analyse directe sur une scène thermique, et de donner l'état de santé de l'équipement, donc d'assurer cette analyse quand l'état de santé est corrélé avec les températures.

Ce travail est reparti sur quatre chapitres suivants :

- Un premier chapitre est consacré à la présentation de la centrale à cycle combiné de Ras-Djinet et les différentes parties constructives.
- Le deuxième chapitre est consacré aux généralités sur la maintenance (les types, les critères de maintenabilité, les niveaux de maintenance...)
- Le troisième chapitre concerne les outilles de maintenance conditionnelle et on a approfondi dans la technique thermique (l'analyse thermographie infrarouge).
- Le quatrième chapitre présente le matériel utilisé et les déférentes applications réalisé par la méthode thermographie infrarouge (les applications d'analyse thermique).

Nous terminons en fin par une conclusion générale.

Chapitre I

Présentation de la centrale à cycle combiné de RAS- DJINET

I.1 Introduction

L'installation comprenant deux sortes de turbines est appelée installation à cycle combiné, et le plus souvent ce sont des turbines à gaz et vapeur.

La demande d'électricité dans ces derniers années a connu une évolution importante et particulièrement en périodes estivales, atteignant des pics de consommation importants. Cette forte augmentation de la demande est une conséquence directe du changement des habitudes du consommateur et l'amélioration de sa qualité de vie, ainsi que la pulsion donnée au secteur économique et industriel.

Conscient de cet enjeu et de l'importance de l'accès à l'électricité pour les citoyens, le secteur s'est fixé comme priorité de développer tous les axes permettant de garantir la couverture à long terme, des besoins en électricité et en gaz du pays, notamment par la diversification des sources d'énergie, le développement du parc de production électrique et des infrastructures de transport et de distribution de l'électricité et du gaz.

Ce développement est illustré par ces installations qui récupèrent les gaz d'échappement de la turbine à gaz et de les envoyer dans une chaudière de récupération pour qu'elle produise de la vapeur, et on appelle une centrale cycle combiné comme la centrale de RAS-DJINET qui produit l'électricité, elle située au bord de la mer, à l'est de l'Algérie. D'une capacité de production totale de 1113 MW.



Figure.I.1 Vue 3D de la centrale électrique à cycle combiné RAS-DJINET

I.2 Historique de la centrale

La centrale à cycle combiné Ras-Djinet a été construite en mai 2018 par la compagnie DAEWOO, le promoteur de la centrale et le maître de l'ouvrage est la société algérienne de production de l'électricité. La première turbine est entrée en production en mai 2018, la deuxième au mois d'octobre 2018 et la troisième mi juin 2019.

A noter que l'énergie électrique produite au niveau de cette Centrale est transférée respectivement vers trois transformateurs (400 kV pour chacun) à Si Mustapha et El Affroune (Blida), au moment ou un troisième transformateur est à Akbou (Bejaia), avant le transfert de cette électricité vers le réseau national de transport d'électricité.



Figure.I.2 Panneau de Projet de réalisation



Figure.I.3 Station thermique de la nouvelle centrale de RAS-DJINET.

I.3 Centrale électrique à cycle combiné de RAS-DJINET3 × 400 MW

La centrale de Ras-Djinet se compose principalement de trois modules de centrale électrique à cycle combiné à arbre-simple ainsi que les systèmes qui supportent l'équilibre de la centrale. Chaque module a une turbine à gaz (modèle : SIEMENS SGT5-4000F), d'un HRSG associé, d'une turbine à vapeur (Modèle : SIEMENS SST5-3000 H-IL) et d'un générateur commun refroidi par hydrogène (Modèle : SIEMENS SGEN 5-2000 H) situé sur le même arbre entre la turbine à gaz (GT) et la turbine à vapeur (ST).

Une extrémité de l'alternateur est connectée à l'extrémité froide de la turbine à gaz et l'autre à la turbine à vapeur. La TV est connectée à l'alternateur au moyen d'un embrayage automatique synchrone. Il s'engage automatiquement à la vitesse nominale de la TV pendant le démarrage et se désengage automatiquement pendant l'arrêt de la TV. Ceci permet un fonctionnement indépendant de la turbine à gaz pendant le démarrage de la turbine à vapeur ou lors du fonctionnement de la TV sur by-pass rendant inutile la présence d'une chaudière auxiliaire qui serait nécessaire si la TV était directement connectée à la TG.[1]

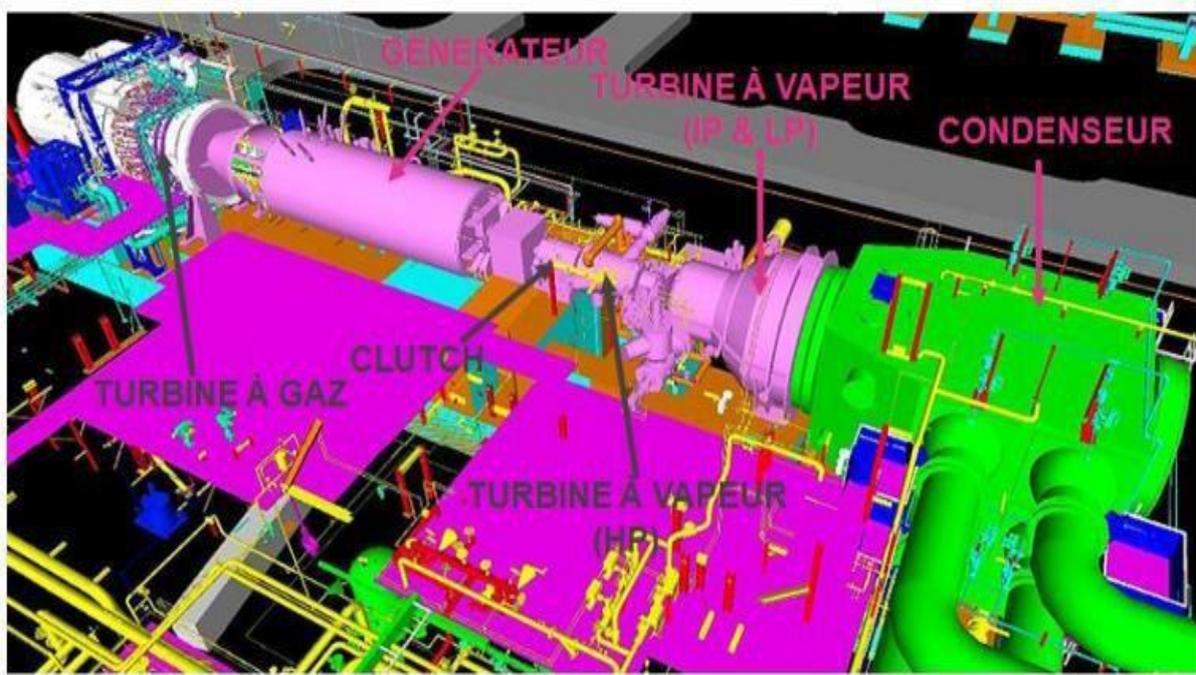


Figure.I.4 Vue en section d'un cycle combiné

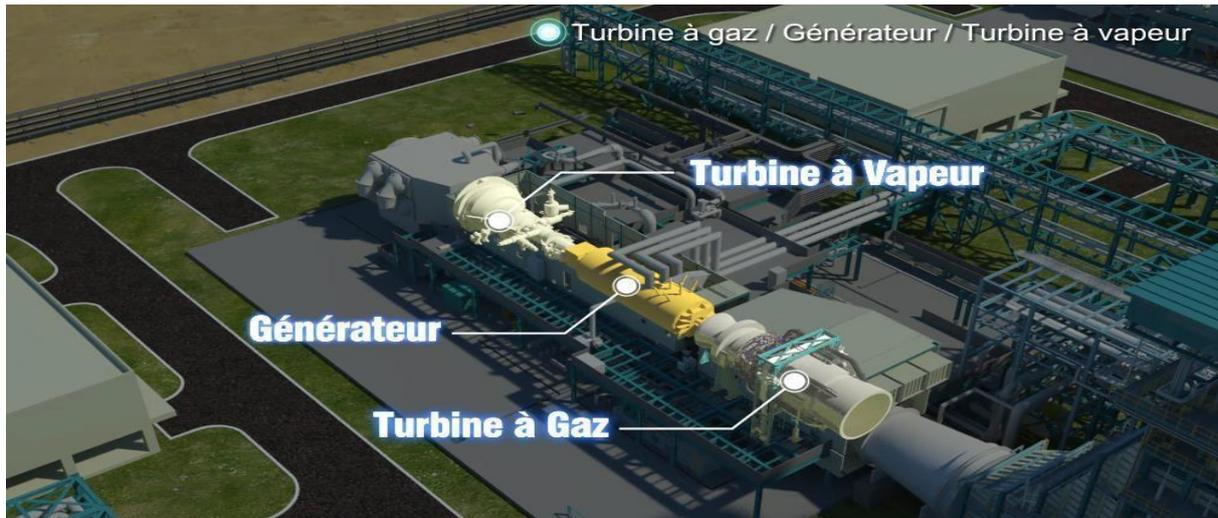


Figure.I.5 Vue TV, GÉNÉRATRICE, TG

I.4 Les composants principale de production du type à cycle combiné (TG-TV) single shaft

Les principaux composants mécaniques du cycle combiné de la nouvelle centrale de RAS-DJINET sont (Figure I.6) :

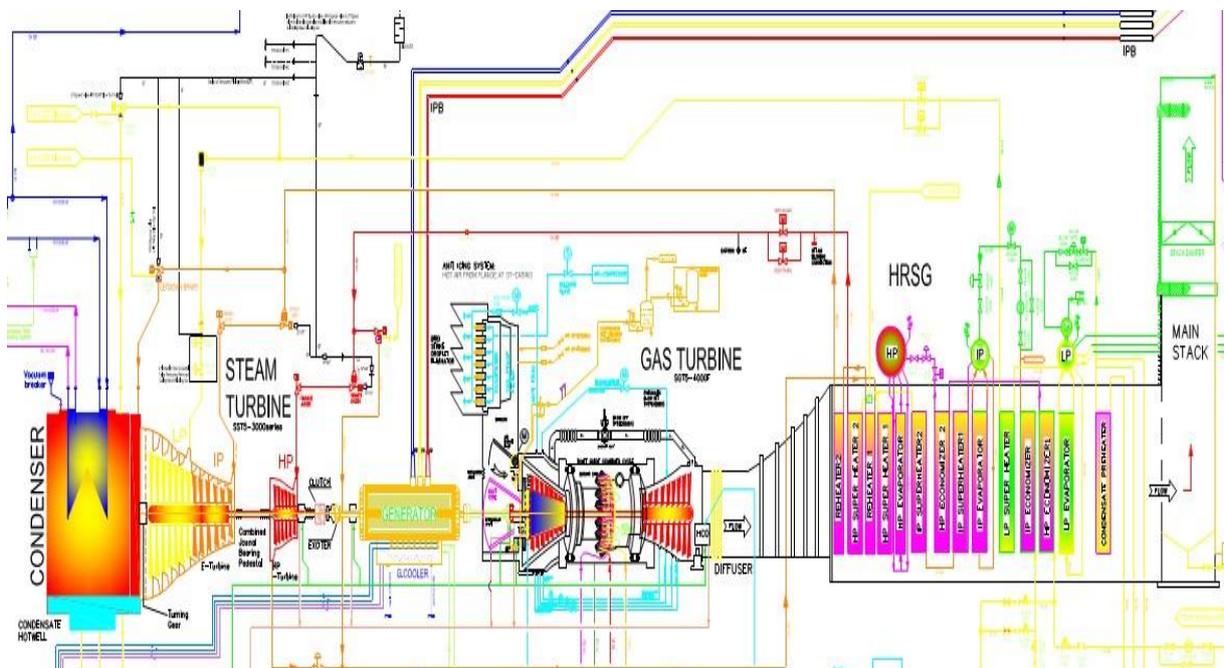


Figure I.6 Cycle de fonctionnement de la nouvelle centrale (cycle combiné) de RAS-DJINET [2].

- ✓ Turbine à gaz
- ✓ Générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG)
- ✓ Turbine à vapeur

- ✓ Vannes de by-pass HP, IP et LP
- ✓ Système d'air comprimé–Pompes d'eau d'alimentation de la chaudière (BFP)
- ✓ Pompes d'extraction de condensat (CEP)
- ✓ Condenseur
- ✓ Gland Stream Condenser(GSC)
- ✓ Éjecteur d'air à jet de vapeur
- ✓ Chaudière auxiliaire
- ✓ Pompes de circulation d'eau
- ✓ Pompes d'alimentation usine de dessalement
- ✓ Pompes d'eau de refroidissement déminéralisée
- ✓ Échangeur de chaleur CCW (Type de plaque)
- ✓ Station d'alimentation en gaz naturel–Réservoirs de stockage de mazout
- ✓ Réservoir de stockage d'eau DM
- ✓ Réservoir de stockage d'eau dessalée

I.4.1 Turbine à Gaz

Les turbines à gaz de Siemens SGT5-4000F sont des moteurs à combustion interne sur un seul arbre et à un seul corps. Elles sont destinées à l'entraînement d'alternateurs tournant à vitesse constante dans des centrales couvrant les charges de base, les charges partielles et les charges de pointe. Elles peuvent être utilisées dans les installations à cycle combiné gaz-vapeur et leurs nombreuses variantes. La turbine à gaz est conçue pour en double allumage, le gaz naturel (NG) doit être utilisé comme combustible primaire et le mazout doit être utilisé comme combustible de secours.[1]

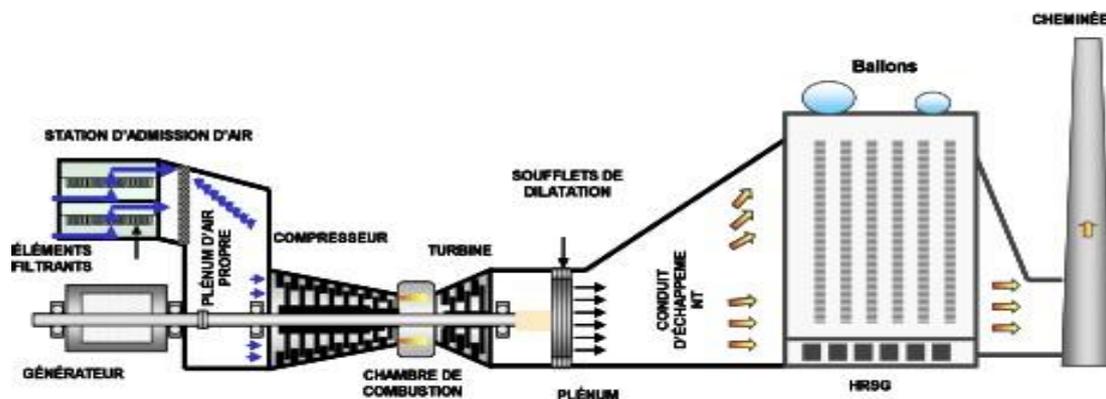


Figure.I.7 Schéma de turbine à gaz en mode cycle combiné

I.4.2 Les Composants de la turbine à gaz

Une turbine à gaz typique se compose d'un système d'air d'admission, d'un compresseur, d'un système de combustion, d'une turbine, d'un système d'échappement, et d'un générateur comme il est illustré dans les schémas ci-dessous.[2]

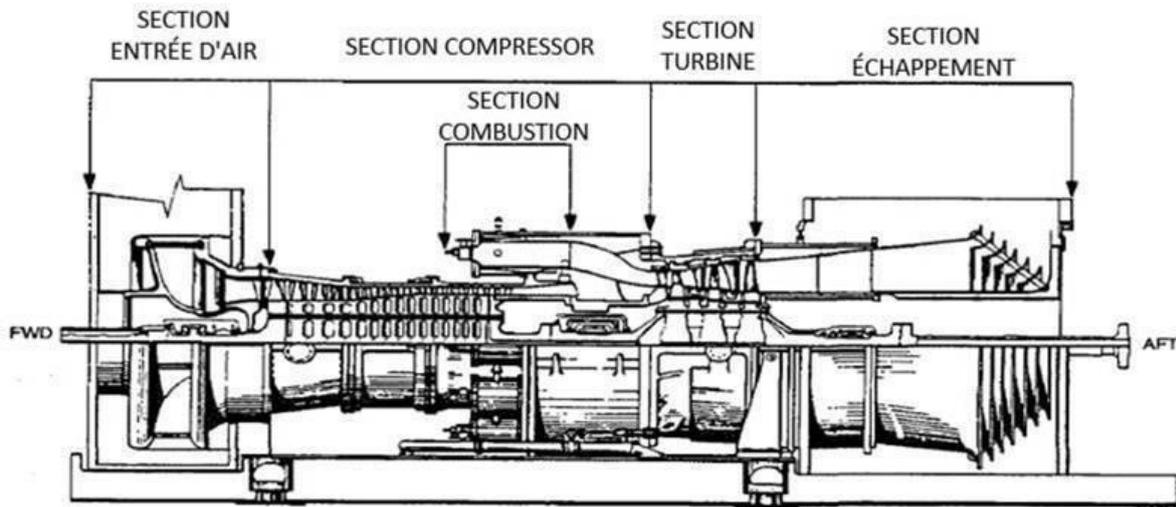


Figure.I.8 Composants de la turbine à gaz
La turbine à gaz est formée de trois parties élémentaires

- **Compresseur**

Le compresseur à air fait partie du bloc thermique. L'objectif du compresseur d'air axial est d'augmenter la pression et par conséquent la température de l'air provenant du système d'admission d'air. L'air d'admission propre est dirigé vers le compresseur, où il est ensuite compressé par des ailettes rotatives et des aubes fixes. La combinaison d'une rangée rotative et d'une rangée fixe s'appelle un étage de compresseur. Le compresseur axial utilisé dans la turbine à gaz GT Siemens SGT5-4000F est un appareil à flux d'air axial et à 15 étages.

- **Chambre de combustion**

La chambre de combustion annulaire est située entre le compresseur et la turbine. Elle transforme l'énergie chimique contenue dans le gaz combustible/gasoil en énergie cinétique, utilisée pour entraîner le compresseur et l'équipement accouplé (c'est-à-dire l'alternateur) et en énergie thermique qui est susceptible d'être utilisée dans la chaudière de récupération.

La chambre de combustion est équipée de 24 brûleurs hybrides répartis uniformément sur le pourtour. L'air y est mélangé au combustible de manière à permettre la formation d'une flamme stable dans le foyer.



Figure.I.9 Image de chambre de combustion

- **Turbine**

Dans laquelle l'énergie contenue dans le gaz pressurisé à haute température, produit par les sections compresseur et combustion est convertie en énergie mécanique. La turbine à gaz SGT5-4000F comprend un rotor de turbine à 4 étages, Aubes de turbine (Aubes rotatives), stator de turbine, ailettes de turbine (Aubes stationnaires), boîtier, diffuseur de gaz d'échappement.

I.4.3 Caractéristiques techniques

Tableau.I.1 Les divers paramètres de fonctionnement de turbine à gaz.

Description	Unités	allumage au gaz naturel	Allumage à l'huile
Puissance de sortie de la turbine à vapeur	mW	249.2	210.5
Consommation de combustible	kg/s	14,3	13,2
Efficacité nominale aux bornes du générateur	%	38.4	36.9
Pouvoir calorifique inférieur (PCI)	kJ/kg	45001	43100
Rendement aux bornes de l'alternateur	%	38.4	36.9
Vitesse	rpm	3000	3000

I.4.4 Fonctionnement de la Turbine à Gaz

Quand la turbine à gaz est mise en marche, l'air ambiant est aspiré à travers le système d'air d'admission où il est filtré et puis dirigé vers l'entrée du compresseur. L'air est comprimé par le compresseur et dirigé vers le système de combustion. À l'intérieur du système de combustion, l'air est mélangé au carburant (gaz naturel ou mazout ou les deux ou un autre carburant) et le mélange est allumé.

Les gaz de combustion chauffés et comprimés circulent ensuite vers la turbine. Les gaz de combustible se dilatent au fur et à mesure qu'ils circulent à travers la turbine, induisant sa rotation. La turbine rotative actionne le compresseur et les équipements accessoires avec un excès d'énergie disponible pour produire une puissance d'arbre qui actionne le générateur électrique. Les gaz sortant de la turbine s'échappent dans l'atmosphère et sont dirigés vers l'équipement de récupération de chaleur à travers un système d'échappement.[2]



Figure.I.10 Fonctionnement de la turbine à Gaz

I.5 Turbine à Vapeur

Chaque module de la centrale à cycle combiné (CC) est fourni avec une turbine à vapeur (modèle Siemens SST5-3000) ainsi que tous les accessoires nécessaires. La turbine à vapeur est un moteur à combustion externe, elle transforme l'énergie thermique contenue dans la vapeur d'eau provenant de la chaudière en énergie mécanique. [1]

La turbine à vapeur est composée d'un cylindre HP de type cylindrique et d'un cylindre IP/LP à écoulement direct. La vapeur d'échappement sortant de la turbine à vapeur sera condensée dans le condenseur refroidi à eau.

La turbine HP est de construction à simple flux et à double paroi avec un porte-lame fixe et un carter externe. Elle est munie d'une vanne d'arrêt et de contrôle de vapeur principale, soudée, soutenue par des supports supplémentaires. Le carter extérieur est de type cylindrique.

Le carter extérieur IP/LP est divisé en deux sections, la section du carter d'entrée moulé et la section du carter d'échappement soudé. Les deux sections sont divisées horizontalement. Les demi-carter sont boulonnés ensemble par des boulons d'assemblage. Les sections d'entrée et d'échappement sont également boulonnées ensemble.

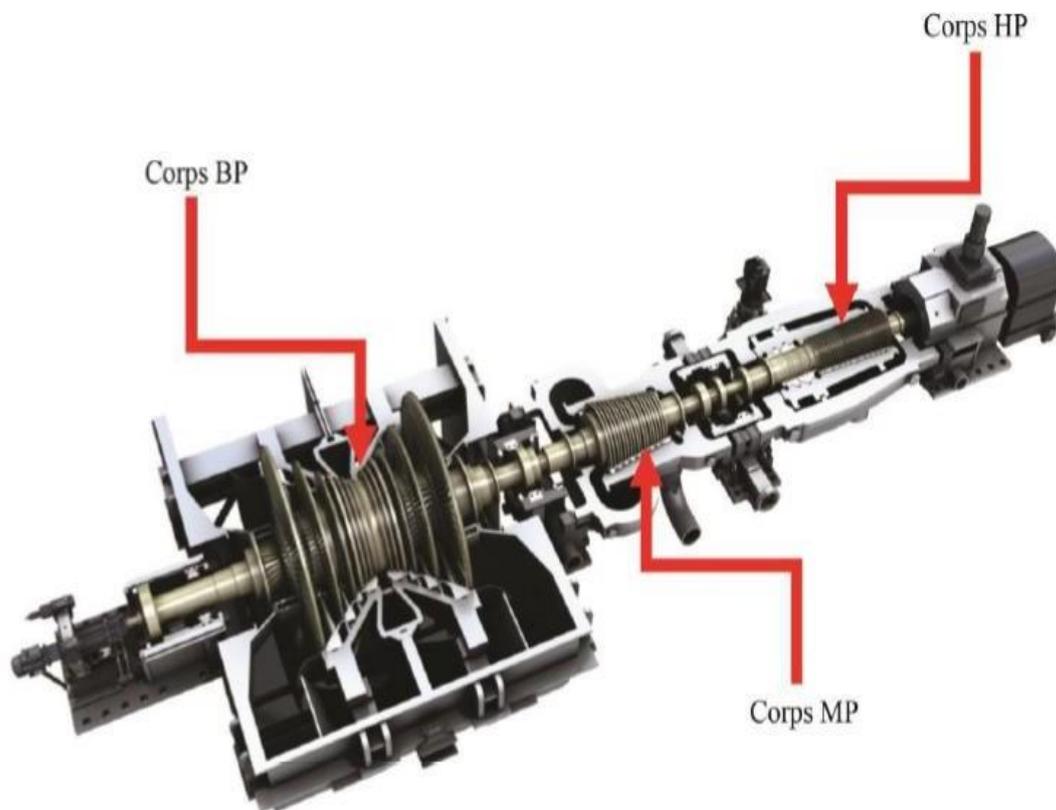


Figure.I.11 Turbine à vapeur (ST)

I.5.1 Caractéristiques techniques

Tableau.I.2 Les divers paramètres de fonctionnement de turbine à vapeur.

Description	Unités	allumage au gaz naturel	Allumage à l'huile
Puissance de sortie de la turbine à vapeur	mw	127,8	100,8
Consommation de combustible	kg/s	14,3	13,24
Pression d'entrée de la turbine à vapeur HP	Bar (a)	117,92	99,39
Température d'entrée de la turbine à vapeur HP	°C	565,02	528,27
Pression d'entrée de la turbine à vapeur IP	Bar (a)	29,10	25,20
Température de sortie de la turbine à vapeur IP	°C	564,94	524,99
Température d'échappement de turbine LP	°C	33,35	31,56

I.5.2 Fonctionnement de Turbine à Vapeur (circuit eau - vapeur)

La vapeur vive provenant de la chaudière de récupération pénètre dans l'enveloppe intérieure HP où elle se dilate dans les ailettes. Après dilatation, la vapeur retourne à la chaudière de Récupération par la conduite de resurchauffe froide pour y être réchauffée.

La vapeur PI resurchauffée passe par la conduite de resurchauffe chaude et pénètre dans L'enveloppe intérieure PI où elle se dilate dans les ailettes. Le sens de la vapeur dilatée est inversé dans la turbine PI ; la vapeur se dirige alors vers la turbine LP, située dans la même enveloppe.

La vapeur LP qui est également produite par la chaudière de récupération circule comme vapeur secondaire à travers un tuyau d'admission, avant de rejoindre l'enveloppe extérieure LP.

La vapeur partiellement dilatée, provenant de la turbine PI continue à se dilater, mélangée à la vapeur LP admise dans la turbine LP et arrive finalement dans le condenseur disposé Axialement, une fois que la dilatation est terminée.

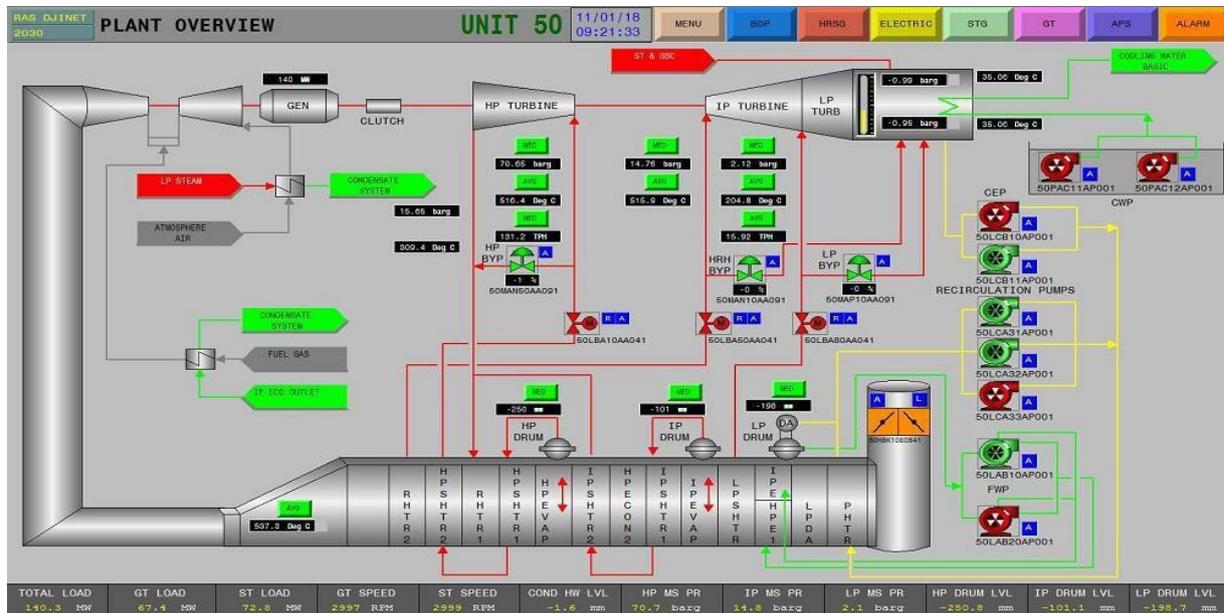


Figure.I.12 Circuit eau – vapeur

I.6 Alternateur

C'est un générateur d'électricité de type Siemens (SGEN5-2000H). Il sert à transformer l'énergie mécanique produite par l'arbre de la turbine en énergie électrique, il est l'équipement électrique le plus important de toute la centrale électrique. Le générateur est capable d'évacuer le courant de la sortie de la turbine (turbine à gaz + turbine à vapeur).



Figure.I.13 Alternateur Synchrone [4]

I.6.1 Caractéristiques techniques

Tableau.I.3 Les paramètres nominaux de l'alternateur.

Puissance apparente	431 MVA à 35 °C
Courant d'induit nominal	11 310 A
Tension d'induit nominale	22,00 KV \pm 5 %
Vitesse	3000 tr/min
Facteur de puissance	0,9(inductif)
Excitation	Excitation statique
Type de refroidissement	Refroidi à l'hydrogène

I.7 La chaudière de récupération

La principale fonction du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) est de générer la quantité et la qualité de vapeur requises en utilisant la chaleur perdue des gaz d'échappement du turbo-générateur à gaz (GTG).

Chaque module de la centrale à cycle combiné (CC) est fourni avec un générateur de vapeur à récupération de chaleur (HSRG) qui consiste un ensemble d'échangeurs tubulaires de chaleur par convection ainsi que tous les accessoires nécessaires. La vapeur générée par le HRSG sera fournie à la turbine à vapeur.

Les principaux composants du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG) sont :

Ballon vapeur haute pression (HP)

Ballon vapeur pression intermédiaire (IP)

Ballon vapeur basse pression (LP)

Sections économiseur (pour chaque niveau de pression)

Sections évaporateur (pour chaque niveau de pression)

Sections surchauffeur (pour chaque niveau de pression)

Section réchauffeur (pour la section IP)

Dégazeur Intégral Ballon LP

Cheminée HSRG avec Silencieux

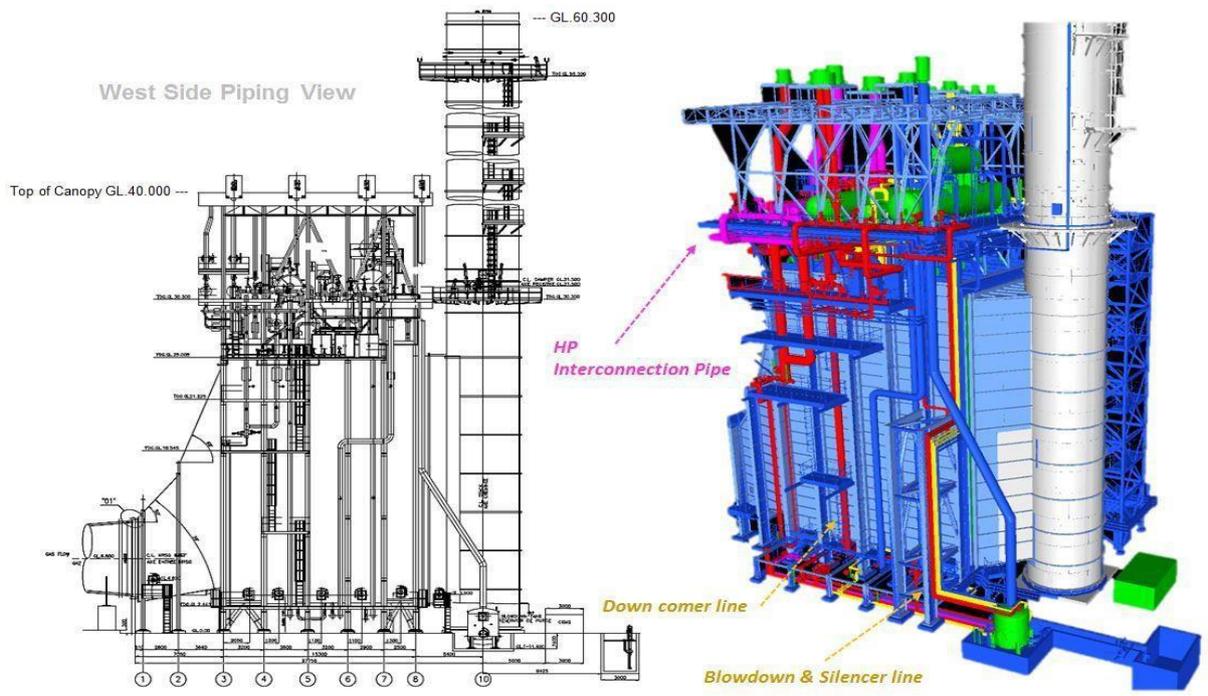


Figure.1.14 La chaudière de récupération



Figure.1.15 La chaudière de récupération unit #50 vu d'unit #60 de Ras-djinet

I.8 Condenseur

Le condenseur axial (50MAG10AC001) est un échangeur thermique refroidi à l'eau remplit la fonction de condenser la vapeur d'échappement de la turbine à vapeur et/ou du système de BYPASS de vapeur haute pression (HP), pression intermédiaire (IP) et basse pression (LP). Le condenseur reçoit la vapeur d'échappement de la turbine dans le sens horizontal.

Le condenseur est équipé d'une soupape de dépression, de transmetteurs de pression, de transmetteurs de température et de transmetteurs de niveau pour la protection du condenseur et de la turbine.

I.9 Les pompes

I.9.1 Pompes d'alimentation (50LAB10AP001 / 50LAB20AP001)

La fonction des pompes d'alimentation en eau de la chaudière est de fournir de l'eau du Ballon LP, à la section économiseur haute pression (HP) du générateur de vapeur à récupération de chaleur et, par un étage intermédiaire, à la section économiseur pression intermédiaire (IP) du générateur de vapeur à récupération de chaleur (HRSG). Les pompes d'alimentation en eau de la chaudière fournissent également de l'eau de pulvérisation désurchauffeur pour le système de BYPASS HP et de l'eau de pulvérisation désurchauffeur pour le surchauffeur HP.

Les pompes sont conçues de telle sorte qu'une pompe couvre toutes les conditions de fonctionnement, y compris les cas de fonctionnement en BYPASS. En fonctionnement normal, une pompe est en fonctionnement normal, tandis que l'autre pompe est en veille. La pompe en veille doit démarrer automatiquement lorsque la pression de l'eau d'alimentation tombe en dessous d'un certain seuil prédéterminé ou en cas de défaillance électrique de la pompe en fonctionnement.

I.9.2 Pompes d'extraction (50LCB10AP001/50LCB11AP001)

La fonction des pompes d'extraction de condensat est d'effectuer ce qui suit :

- Maintenir le niveau du puits du condenseur à son niveau normal en extrayant les condensats du puits du condenseur.
- Fournir de l'eau de condensation au dégazeur en passant par l'économiseur LP

- Fournir de l'eau pulvérisée désurchauffeur pour le système de BYPASS IP, le système de BYPASS de vapeur LP, la station auxiliaire de réduction de pression de vapeur et de désurchauffe (PRDS) et d'autres auxiliaires de la turbine à vapeur.
- Fournir de l'eau d'étanchéité aux vannes pour empêcher l'entrée d'air dans le système.

Les pompes sont conçues de telle sorte qu'une pompe couvre toutes les conditions de fonctionnement, y compris les cas de fonctionnement en BYPASS. En fonctionnement normal, une pompe est en fonctionnement normal, tandis que l'autre pompe est en veille. La pompe en veille doit démarrer automatiquement lorsque la pression de l'eau d'alimentation tombe en dessous d'un certain seuil prédéterminé ou en cas de défaillance électrique de la pompe en fonctionnement.

I.10 Les Transformateurs

I.10.1 Transformateur principal (GSUT)

Le transformateur principal (GSUT) est connecté entre le générateur et le poste d'évacuation d'énergie principal de 400kV à isolation gazeuse.

La puissance générée par le générateur est élevée par le GSUT pour l'évacuation à 400kV. Cette même puissance est doit être utilisée pour l'alimentation des charges auxiliaires de la centrale provenant du réseau de 400kV pendant le démarrage. [3]

- **Paramètres de base**

Puissance nominale 306/408/510 MVA

Rapport de transformation 420/22 kV

Température type 20°C

Méthode de refroidissement ONAN/ONAF/OFAF



Figure.I.16 Transformateur principal [3]

I.10.2 Transformateur auxiliaire de l'unité (UAT)

Chaque unité est équipée d'un transformateur auxiliaire (UAT) qui abaisse la tension du générateur à la charge auxiliaire requise, c'est-à-dire que l'UAT abaisse la tension générée de 22 kV à 6 kV.

L'UAT est conçue pour prendre en charge les charges auxiliaires de l'unité 1, de l'unité 2 et les charges de service courantes.

- **Paramètres de base**

Puissance nominale 40 MVA

Rapport de transformation 22/6,3 kV

Température type 20 °C

Méthode de refroidissement ONAN



Figure.I.17 Transformateur auxiliaire de l'unité

I.10.3 Transformateurs MT /BT auxiliaires secs

Pour répondre aux exigences de charge des moteurs de 200 kW et des moteurs de puissance inférieure, de la batterie et du chargeur de batterie, du système UPS, des puissances d'éclairage et des petites puissances, la tension de 6 kV est abaissée à 400 V.

Tous les transformateurs de service sont triphasés, à résine coulée sèche, refroidis par air d'intérieur. [3]

- **Paramètres nominaux**

Puissance nominale 2,5 MVA

Rapport de transformation 6/0,420 kV

Température type 20 °C

Méthode de refroidissement AN

I.11 Les auxiliaires de la centrale

I.11.1 La Salle de commande

C'est là où en vue à la bonne exécution de la centrale, est ont gérer l'état des machines et les différents problèmes qui peuvent se poser

C'est un sort intermédiaire entre l'ingénieur et la machine.



Figure.I.18 Salle de commande de la centrale à cycle combiné Ras-djinet

I.11.2 La station de pompage et de filtration d'eau de mer

La position de la station de pompage et de filtration d'eau de mer est basse sur une profondeur de 7 m environ de profondeur dans la mer méditerranée, la prise d'eau est située à 900 mètres de la côte, L'arrivée de l'eau à la station de pompage se fait par quatre tubes en béton d'un diamètre de 2,30 m .elle contient :

- Une grille à grappin, pour éliminer les gros déchets.
- Un tambour filtrant, à mailles fines, pour éliminer les petits déchets.
- Deux pompes de circulation d'eau de mer de 12000 m³/h chacune, qui refoulent l'eau de mer jusqu'au condenseur après sa traversée du condenseur, l'eau de réfrigération est rejetée vers le canal de rejet.

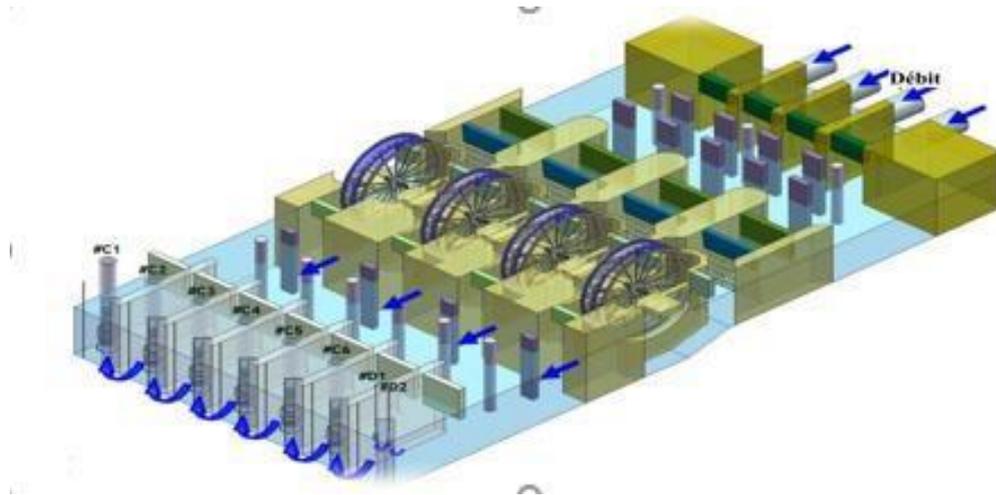


Figure.I.19 Station de pompage

I.11.3 Station traitement des eaux

I.11.3.1 Station de dessalement

Les unités de dessalement de Ras-Djinet pour le rôle la production d'eau dessalée à partir de l'eau de mer. Sont conçues pour un rendement de distillat net de 1100 m³/jour chacune à l'exception du débit de retour du condensat de vapeur, contenant 10 ppm de TDS, avec une température d'eau de mer variant de 16 °C à 24 °C. Chaque unité est adaptée à l'exploitation à une température d'eau de mer max. de 28 °C, mais avec une capacité de distillat réduite (880 m³/jour).

I.11.3.2 Station de déminéralisation

Le système de déminéralisation du système de traitement de l'eau produit l'eau déminéralisée à partir de l'eau dessalée produite dans l'usine de dessalement. Le système se compose principalement d'une pompe d'alimentation à lit mélangé, d'un échangeur à lit mélangé, d'un souffleur-mélangeur de résine et d'un système d'injection et de stockage de produits chimiques. Le système de stockage et d'injection chimique (acide et caustique) est fourni comme système commun pour la régénération de l'échangeur à lit mélangé ainsi que la neutralisation des déchets chimiques.

I.11.3.3 Station d'électro-chloration

Le système d'électro-chloration a pour fonction de générer de l'hypochlorite de sodium à partir de l'eau de mer. Cela empêchera la croissance biologique dans l'eau de mer. L'hypochlorite de sodium est généré par un procédé d'électrolyse.

Le système d'hypochlorite reçoit l'eau de mer des pompes à eau de refroidissement. Le système se compose de deux (2) Générateurs D'hypochlorite x 100 % (00PUN03-GV001 et

00PUN03-GV002) et de l'équipement associé, chacun dimensionné pour une capacité de production de 70 kg/h de chlore équivalent à l'hypochlorite de sodium. La concentration nominale de la solution est de 1750 ppm à 1800 ppm d'eau de mer, en continu, à une capacité nominale. Le système est dimensionné pour doser un débit d'eau de mer de 107,150 m³/h en continu à 0,5 mg/l avec des dispositions pour un dosage-choc jusqu'à 4 mg/l pour une durée de 10 minutes toutes les 8 heures.

I.11.3.4 Système de protection contre les incendies

Le système d'alarme et de détection des incendies est conçu pour assurer une détection précoce des incendies, l'avertissement du personnel et une activation automatique des systèmes d'extinction. Le système compte tous les dispositifs nécessaires qui fonctionnent ensemble pour détecter et avertir les gens à travers des appareils visuels et audio si une fumée, un incendie ou d'autres urgences ont lieu. Ces alarmes peuvent être activées automatiquement à partir de détecteurs de fumée, de détecteurs de flamme et de chaleur ou activées par des déclencheurs manuels d'alarme incendie tels que des déclencheurs manuels ou des dispositifs d'alarme, des câbles de détection de la chaleur linéaire de type numérique et des modules d'interfaçage nécessaires pour le branchement au Panneau d'alarme incendie. Les alarmes sont soit des sirènes, soit des klaxons muraux.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons représenté la centrale a cycle combiné de Ras-Djinet avec ces déférents équipements dont on a expliqué le principe et le fonctionnement de chaque composant de production d'énergie électrique. La continuité de cette production est nécessaire afin de satisfaire les besoins des clients, aussi il faut assurer la sécurité des personnes, préserver leurs environnement et optimiser la durée de vie des équipements de la centrale.

Chapitre II
Généralités sur la
maintenance

II.1 Introduction

Le monde industriel dispose de machines et d'installations de plus en plus performantes et complexes. Les exigences de haute sécurité, la réduction des coûts d'exploitation et la maîtrise de la disponibilité des équipements donnent à la maintenance des systèmes le rôle principal. D'un service maintenance est de maintenir l'équipement dans les meilleures conditions possibles, de minimiser le temps d'arrêt, d'assurer la sécurité des biens, des personnes et de l'environnement, de rétablir qui sous-entend l'idée d'une correction des défauts et d'entretenir les installations avec le minimum d'économie et le remplacer à des périodes prédéterminées.

II.2 Définition de maintenance

II.2.1 Définition selon AFNOR X60-01(décembre1994)

(Association française de normalisation) La maintenance est « l'ensemble des activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement, pour accomplir une fonction requise, ces activités sont une combinaison d'activités techniques, administratives et management ». [5]

II.2.2 Définition selon CEN projet WI 319-003(1997)

(Comité européen de normalisation) La maintenance est « l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de gestion durant le cycle de vie d'un bien, destinée à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise ».

La fonction requise est ainsi définie : « fonction ou ensemble de fonction d'un bien considérées comme nécessaire pour fournir un service donné ». [5]

II.2.3 Définition selon la norme NF-X60-010

« La maintenance est définie comme étant un ensemble d'activités destinées à maintenir ou rétablir un bien dans un état ou dans des conditions données de sûreté de fonctionnement pour accomplir une fonction requise ».

Maintenir c'est donc effectuer des opérations (de nettoyage, graissage, visite, réparation, révision, amélioration...etc.) qui permettent de conserver le potentiel du matériel pour assurer la continuité et la qualité de production, ainsi que choisir les moyens de prévenir, de corriger ou de rénover suivant l'utilisation du matériel. L'état d'esprit de la maintenance est de maîtriser les interventions. [7]

II.3 Les types de maintenance

On a classifié les différents types de maintenance en deux grandes catégories composées elles-mêmes de sous-catégories se distinguant. [5]

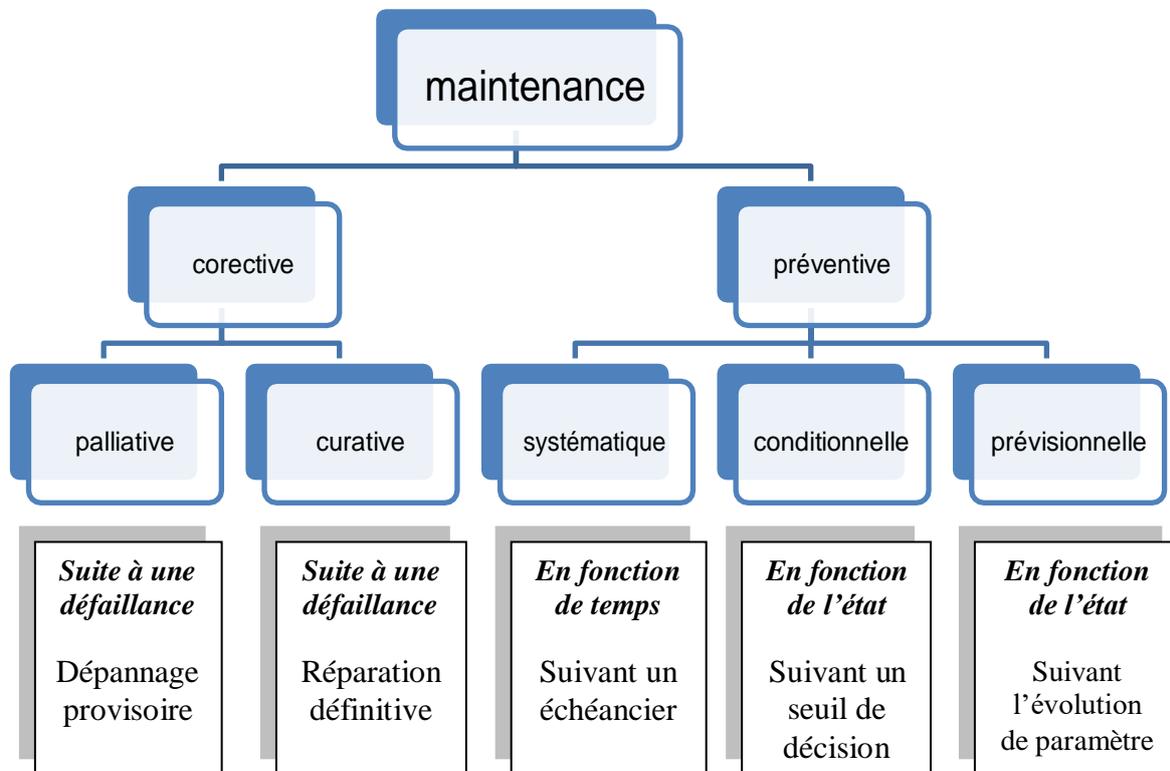


Figure II. 1 Les différents types de maintenance

II.3.1 La maintenance corrective

Définition AFNOR (norme X 60-010) : « Opération de maintenance effectuée après défaillance ». La maintenance corrective correspond à une attitude de défense (subir) dans l'attente d'une défaillance fortuite, attitude caractéristique de l'entretien traditionnel. [6]

II.3.1.1 Opérations de la maintenance corrective

Après apparition d'une défaillance, le maintenancier doit mettre en œuvre un certain nombre d'opérations dont les définitions sont données ci-dessous. Ces opérations s'effectuent par étapes (dans l'ordre) :

- **Test** : c'est à dire la comparaison des mesures avec une référence.
- **Détection** : ou action de déceler l'apparition d'une défaillance.
- **Localisation** : ou action conduisant à rechercher précisément les éléments par lesquels la défaillance se manifeste.

- **Diagnostic** : ou identification et analyse des causes de la défaillance.
- **Dépannage** : réparation ou remise en état (avec ou sans modification).
- **Contrôle** : du bon fonctionnement après intervention.
- **Amélioration éventuelle** : c'est à dire éviter la réapparition de la panne.
- **Historique** : ou mise en mémoire de l'intervention pour une exploitation ultérieure.[5]

II.3.1.2 Le temps en maintenance corrective

Les actions de maintenance corrective étant très diverses, il est toujours difficile de prévoir la durée d'intervention :

- Elle peut être faible (de quelques secondes pour réarmer un disjoncteur ou changer un fusible à quelques minutes pour changer un joint qui fuit).
- Elle peut être très importante (de 0,5 à plusieurs heures) dans le cas du changement de plusieurs organes simultanément (moteur noyé par une inondation).
- Elle peut être majeure en cas de mort d'homme (plusieurs jours si enquête de police).

Le responsable maintenance doit donc tenir compte de ces distorsions et avoir à sa disposition une équipe « réactive » aux événements aléatoires. Pour réduire la durée des interventions, donc les coûts directs et indirects (coûts d'indisponibilité de l'équipement), on peut :

- Mettre en place des méthodes d'interventions rationnelles et standardisées (outillages spécifiques, échanges standards, logistique adaptée, etc..).
- Prendre en compte la maintenabilité des équipements dès la conception (trappe de visites accessibles, témoins d'usure visible, etc..).

II.3.2 La maintenance préventive

Maintenance effectuée selon des critères prédéterminés, dans l'intention de réduire la probabilité de défaillance d'un bien ou la dégradation d'un service rendu.

Elle doit permettre d'éviter les défaillances du matériel en cours d'utilisation. L'analyse des coûts doit mettre en évidence un gain par rapport aux défaillances qu'elle permet d'éviter. [6]

II.3.2.1 Opérations de la maintenance préventive

Ces opérations trouvent leurs définitions dans la norme NF X 60-010 et NF EN 13306.

- **Inspection** : contrôle de conformité réalisé en mesurant, observant, testant ou calibrant les caractéristiques significatives d'un bien ; elle permet de relever des anomalies et d'exécuter des réglages simples ne nécessitant pas d'outillage

spécifique, ni d'arrêt de la production ou des équipements (pas de démontage).

- **Contrôle** : vérification de la conformité à des données préétablies, suivie d'un jugement. Ce contrôle peut déboucher sur une action de maintenance corrective ou alors inclure une décision de refus, d'acceptation ou d'ajournement.
- **Visite** : examen détaillé et prédéterminé de tout (visite générale) ou partie (visite limitée) des différents éléments du bien et pouvant impliquer des opérations de maintenance du premier et du deuxième niveau ; il peut également déboucher sur la maintenance corrective.
- **Test** : comparaison des réponses d'un système par rapport à un système de référence ou à un phénomène physique significatif d'une marche correcte.
- **Echange standard** : remplacement d'une pièce ou d'un sous-ensemble défectueux par une pièce identique, neuve ou remise en état préalablement, conformément aux prescriptions du constructeur.
- **Révision** : ensemble complet d'examens et d'actions réalisées afin de maintenir le niveau de disponibilité et de sécurité d'un bien. Une révision est souvent conduite à des intervalles prescrits du temps ou après un nombre déterminé d'opérations. Une révision demande un démontage total ou partiel du bien. Le terme révision ne doit donc pas être confondu avec surveillance. Une révision est une action de maintenance de niveau 4.

Les trois premières opérations sont encore appelées « opérations de surveillance ». Elles caractérisent parfaitement la phase d'apprentissage et sont absolument nécessaires si on veut maîtriser l'évolution de l'état réel d'un bien. On accepte donc de payer pour savoir puis pour prévenir. Elles sont effectuées de manière continue ou à intervalles prédéterminés ou non, calculés sur le temps ou sur le nombre d'unités d'usage. [5]

II.3.2.2 Objectifs de la maintenance préventive

- La durée de vie du matériel.
- Diminuer la probabilité des défaillances en service.
- Diminuer les temps d'arrêt en cas de révision ou de panne.
- Prévenir et aussi prévoir les interventions coûteuses de maintenance corrective.
- Permettre de décider la maintenance corrective dans de bonnes conditions.
- Eviter les consommations anormales d'énergie, de lubrifiant, etc....
- Améliorer les conditions du travail du personnel de production.
- Diminuer le budget de maintenance.
- Supprimer les causes d'accidents graves.

II.3.2.3 La maintenance préventive systématique

C'est la Maintenance préventive effectuée selon un échéancier établi selon le temps ou le nombre d'unités d'usage. Même si le temps est l'unité la plus répandue, d'autres unités peuvent être retenues telles que : la quantité, la longueur et la masse des produits fabriqués, la distance parcourue, le nombre de cycles effectués, etc. Cette périodicité d'intervention est déterminée à partir de la mise en service ou après une révision complète ou partielle. Cette méthode nécessite de connaître :

- Le comportement du matériel.
- Les modes de dégradation.
- Le temps moyen de bon fonctionnement entre 2 avaries.

Cas d'application :

- Equipements soumis à une législation en vigueur (sécurité réglementée) : appareils de levage, extincteurs, réservoirs sous pression, convoyeurs, ascenseurs, monte-charge, etc....
- Equipements dont la panne risque de provoquer des accidents graves : tout matériel assurant le transport en commun des personnes, avions, trains, etc....
- Equipement ayant un coût de défaillance élevé : éléments d'une chaîne de production automatisée, processus fonctionnant en continu (industries chimiques ou métallurgiques).
- Equipements dont les dépenses de fonctionnement deviennent anormalement élevées au cours de leur temps de service : consommation excessive d'énergie, éclairage par lampes usagées, allumage et carburation déréglés (moteurs thermiques), etc....

II.3.2.4 La maintenance préventive conditionnelle

D'après la norme AFNOR X60-010 « les activités de maintenance conditionnelle sont déclenchés suivant des critères prédéterminés significatifs de l'état de dégradation du bien ou de service. Les remplacements ou les mises en état des pièces, les remplacements ou les appoints des fluides ont lieu après une analyse de leur état de dégradation. Une décision volontaire est alors prise pour effectuer les remplacements ou les mises en état nécessaire».

- **Les outils de la maintenance conditionnelle**

L'intégration des différentes technologies de la maintenance préventive prévisionnelle conduit à une optimisation de la disponibilité des équipements :

- Analyse vibratoire pour la détection de problème mécanique sur les machines rotatives.

- Analyse d'huile sur site ou avec l'aide de laboratoire d'analyse externe.
- Thermographie infrarouge pour le contrôle périodique des installations électrique, mécanique.

L'analyse des vibrations se base sur l'idée que les structures des machines, excitées par des efforts dynamiques, donnent des signaux vibratoires dont la fréquence est identique à celle des efforts qui les ont provoqués, et la mesure globale prise en un point est la somme des réponses vibratoires de la structure aux différents efforts excitateurs.

L'analyse des huiles permet de détecter les pollutions (internes ou externes), les usures (normales ou anormales) de l'équipement et la capacité de lubrifiant à remplir son rôle.

L'analyse thermographie infrarouge permet de vérifier les connexions électriques, les déphasages, les surchauffes mécaniques, les défauts internes de certains composants.

II.3.2.5 La maintenance prévisionnelle

Est une maintenance conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien (AFNOR, 2001).

Précisons que cette maintenance prévisionnelle intègre également les conditions d'utilisations et l'environnement futurs du système. Contrairement à la maintenance conditionnelle, elle associe une prévision sur les indicateurs de santé pour la prise de décision de maintenance. Pour envisager la mise en place de cette maintenance prévisionnelle, il est nécessaire de maîtriser en détails le comportement de l'entité concernée. L'utilisation de cette connaissance permet d'anticiper et de prévoir au mieux le moment où l'intervention doit être exécutée.

Notons que la maintenance conditionnelle (ou prévisionnelle) nécessite souvent plus d'investissements que les autres formes de maintenance. Cette augmentation du coût s'explique principalement par les technologies de surveillance utilisées (capteurs, instrumentation, logiciels ...). Dans ce cadre, l'enjeu de la modélisation est de réaliser une analyse coût/bénéfice pour évaluer si la mise en place de ce type de maintenance est pertinente pour une entité donnée.

Ces définitions nous donnent une vision globale des différents types de maintenance qui peuvent s'appliquer à une entité. Cependant, dans la réalité, on emploie généralement une maintenance mixte qui va combiner maintenance préventive et corrective. L'équilibre optimal entre préventif et correctif est déterminé grâce à la modélisation de maintenance.

II.4 Les critères de maintenabilité

Les normes NF X 60-300 et X 60-301 spécifient cinq types de critères de maintenabilité [9]:

- **Le premier critère** est relatif à la surveillance de la maintenance préventive. Il est important de connaître à ce niveau l'accessibilité de la composante, sa démontrabilité et son interchangeabilité.
- **Le deuxième critère** est relatif à la maintenance corrective, plus particulièrement, le temps de recherche de panne ou de défaillance et le temps de diagnostic.
- **Le troisième critère** est relatif à l'organisation de la maintenance, pris en compte par la périodicité du préventif, le regroupement à des périodes identiques, l'homogénéité de la fiabilité des composants, la présence d'indicateurs et de compteurs et la complexité des interventions.
- **Le quatrième critère** est lié à la qualité de la documentation technique. Celui-ci comporte la valeur du contenu, la disponibilité de la documentation, le mode de transmission et les principes généraux de rédaction et de présentation de la documentation technique.
- **Le dernier critère** de maintenabilité est lié au suivi du bien par le fabricant. Il sera question de l'évolution du fabricant, de la qualité du service après-vente et de l'obtention des pièces de rechange.

II.5 Différents niveaux de maintenance

Les opérations à réaliser sont classées, suivant leur complexité, en cinq niveaux. Les niveaux pris en considération sont ceux de la norme NF X 60-010. Pour chaque niveau, la liste des opérations précisée est donnée à titre d'illustration.[8].

- **Premier Niveau de maintenance**

Il s'agit essentiellement de contrôle et de relevés des paramètres de fonctionnement des machines. Ces contrôles peuvent donner suite à des interventions simples de maintenance ne nécessitant pas de réalisation d'un diagnostic de panne et de démontage. Ils peuvent aussi déclencher, notamment sur des anomalies constatées, des opérations de maintenance de niveaux supérieurs. En règle générale les interventions de 1^{er} niveau sont intégrées à la conduite des machines.

- **Deuxième Niveau de maintenance**

Il s'agit des opérations de maintenance préventive qui sont régulièrement effectuées sur les équipements. Ces opérations sont réalisées par un technicien ayant une formation

spécifique. Ce dernier suit les instructions de maintenance qui définissent les tâches, la manière et les outillages spéciaux.

- **Troisième Niveau de maintenance**

Il s'agit des opérations de maintenance préventive, curative, de réglage et de réparations mécaniques ou électriques mineurs. Les opérations réalisées peuvent nécessiter un diagnostic. Ces opérations sont réalisées par un technicien spécialisé. Toutes les opérations se font avec l'aide d'instructions de maintenance et l'outil spécifiques tels que les appareils de mesure ou de calibrage. Elles peuvent conduire à des opérations de 4ème niveau.

- **Quatrième Niveau de maintenance**

Il s'agit d'opérations importantes ou complexes à l'exception de la reconstruction de l'équipement. Les opérations sont réalisées par des techniciens bénéficiant d'un encadrement technique très spécialisé, d'un outillage général complet et d'un outillage spécifique. Elle fait aussi appel à des ateliers spécialisés.

- **Cinquième Niveau de maintenance**

Il s'agit d'opérations lourdes de rénovation ou de reconstruction d'un équipement. Ces opérations entraînent le démontage de l'équipement et son transport dans un atelier spécialisé. Le 5ème niveau de maintenance est réservé au constructeur ou reconstruteur. Il nécessite des moyens similaires à ceux utilisés en fabrication.

Conclusion

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et management durant le cycle de vie d'un bien et aussi en industriel c'est le cœur palpitant de la plupart des entreprises et des usines internationales, qui contribuent au maintien du bon fonctionnement des machines, à leur nettoyage et à l'augmentation de leur production. Elle est destinée à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Chapitre III
La maintenance
conditionnelle par
thermographie infrarouge

III.1 Introduction

Nous avons classé ce chapitre en trois parties : la première partie pour l'analyse vibratoire, la deuxième pour l'analyse d'huile et la troisième partie pour l'analyse thermique infrarouge.

Avant de traiter les trois parties nous avons commencé par cette petite introduction concernant le principe, le rôle, les tâches et les processus de la maintenance conditionnelle pour connaître un peu la relation entre les règles de la maintenance conditionnelle et les paramètres de cette dernière (analyse vibratoire, analyse d'huile, etc...).

Le principe de la maintenance conditionnelle consiste, à partir de différentes techniques basées sur la mesure de paramètres physiques, tels que :

➤ Analyse Vibratoire	75	%
➤ Analyse d'huile	12	%
➤ Analyse thermique	08	%
➤ Analyse des particules	05	%

Le rôle de la maintenance conditionnelle, c'est tendre vers le ZERO PANNE ce qui implique la minimisation des quatre pertes suivantes :

- Diminution de la disponibilité
- Diminution du volume de production
- Diminution de la sécurité
- Augmentation des coûts

Les processus et les étapes à suivre pour assurer la bonne maintenance (conditionnelle) sont :

1. Surveillance : Dépassement de seuil de variables significatives
2. Diagnostic : Recherche de la cause de la défaillance
3. Pronostic : Recherche de l'effet de la défaillance
4. Décision : Trouver une décision par rapport à la gravité de la défaillance

III.2 Définition de la maintenance conditionnelle:

D'après la Norme NF X 60010, la maintenance préventive conditionnelle définit comme « une maintenance préventive subordonnée à un type d'événement prédéterminé (auto diagnostic, information d'un capteur, mesure d'une usure, révélateur de l'état de dégradation du bien) » [10]

Remarque : la maintenance conditionnelle est une maintenance dépendante de l'expérience et fait intervenir des informations recueillies en temps réel.

On l'appelle aussi maintenance prédictive (terme non normalisé).

La maintenance préventive conditionnelle se caractérise par la mise en évidence des points faibles. Suivant le cas, il est souhaitable de les mettre sous surveillance et, à partir de là, de décider d'une intervention lorsqu'un certain seuil est atteint. Mais les contrôles demeurent systématiques et font partie des moyens de contrôle non destructifs. Tous les matériels sont concernés. Cette maintenance préventive conditionnelle se fait par des mesures pertinentes sur le matériel en fonctionnement.

Les paramètres mesurés peuvent porter sur :

- Le niveau et la qualité de l'huile.
- Les températures et les pressions.
- La tension et l'intensité des matériels électriques
- Les vibrations et les jeux mécaniques.

Certaines méthodes comme l'analyse vibratoire, l'analyse d'huile, ... sont très riches quant aux informations recueillies. Leur compréhension autorise la prise à bon escient, de décisions qui sont à la base d'une maintenance préventive conditionnelle.

La surveillance est soit périodique, soit continue

Avantage : la connaissance du comportement se fait en temps réel à condition de savoir interpréter les résultats. A ce niveau, l'informatique prend une place primordiale. Le matériel nécessaire pour assurer la maintenance préventive conditionnelle devra être fiable pour ne pas perdre sa raison d'être. Il est souvent onéreux, mais pour des cas bien choisis il est rentabilisé rapidement. Cette méthode de maintenance, pour être efficace, doit dans tous cas être

comprise et admise par les responsables de production et avoir l'adhésion de tout le personnel. [11]

III.3 Définition méthodes de diagnostic comme utile de maintenance

III.3.1 Diagnostic vibratoire

Introduction :

Toutes les machines en fonctionnement produisent des vibrations, images des efforts dynamiques engendrent par les pièces en mouvement, ainsi une machine neuve en excellent état de fonctionnement produit très peu de vibrations.

La détérioration du fonctionnement conduit le plus souvent à un accroissement du niveau des vibrations, en observant l'évolution de ce niveau, il est par conséquent possible d'obtenir des informations très utiles sur l'état de la machine.

Ces vibrations occupent une place privilégiée parmi les paramètres à prendre en considération pour effectuer un diagnostic, la modification de la vibration d'une machine constitue souvent la première manifestation physique d'une anomalie, cause potentielle de dégradations, voire de pannes.

Ces caractéristiques font de la surveillance par analyse des vibrations, un outil indispensable pour une maintenance moderne, puis qu'elle permet, par un dépistage ou un diagnostic approprié des défauts, d'éviter la casse et de n'intervenir sur une machine qu'au bon moment et pendant des arrêts programmés de production.

Dans ce chapitre on présente une étude théorique sur l'analyse vibratoires, les différentes méthodes et technique utilisée et celle toujours en voie de développement.

III.3.1.1 Définition d'une vibration

Une vibration est un mouvement d'oscillation mécanique autour d'une position d'équilibre stable ou d'une trajectoire moyenne. La vibration d'un système peut être libre ou forcée.

III.3.1.1.1 Approche intuitive

a- Perception subjective des phénomènes

A proximité d'une machine :

- On peut entendre le bruit et sentir les vibrations de la machine.
- Ces deux indicateurs peuvent fournir des indications sur un changement de comportement de la machine.
- La quantification et la qualification des vibrations sont des moyens privilégiés

pour la maintenance conditionnelle.

b- Le bruit :

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources.

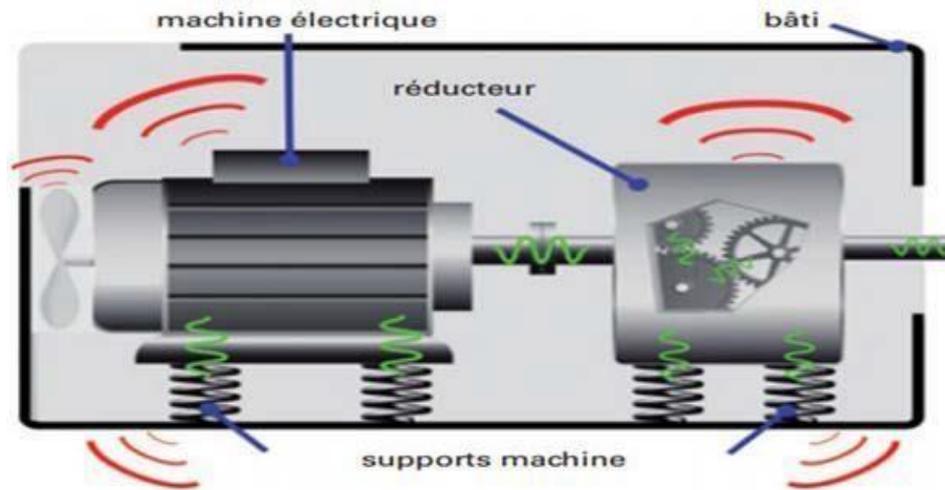


Figure.III.1 Origine du bruit.

c- origine du bruit rayonné par une machine

Le bruit rayonné dans l'air par une machine résulte de l'action de plusieurs sources que l'on peut répartir en deux groupes :

- Celui des machines ou parties de machines comportant des parties en vibration dont l'énergie est transmise à l'enveloppe extérieure par des liaisons rigides ou par un fluide.
- Celui des machines ou parties de machines agissant sans intermédiaire sur le milieu environnement en lui transférant de l'énergie directement sous forme de rayonnement acoustique.

III.3.1.2 Les vibrations

a- Vibrations d'une machine

Les vibrations d'une machine sont souvent perceptibles par simple contact de la main sur la structure, les vibrations ressenties proviennent des forces internes à la machine. [12]

b- Origine des phénomènes

Il est rarement possible de faire la distinction entre les différentes origines des vibrations perçues.

III.3.1.3 Définition théorique d'une vibration

III.3.1.3.1. Vibrations périodiques

Le motif d'une vibration périodique consiste en la superposition, c'est-à-dire l'addition algébrique d'une vibration pure fondamentale et de vibrations pures harmoniques. Les fréquences des harmoniques sont des multiples entiers de celle du fondamental. Par exemple, le mouvement d'un piston d'un moteur à combustion interne génère des oscillations harmoniques.

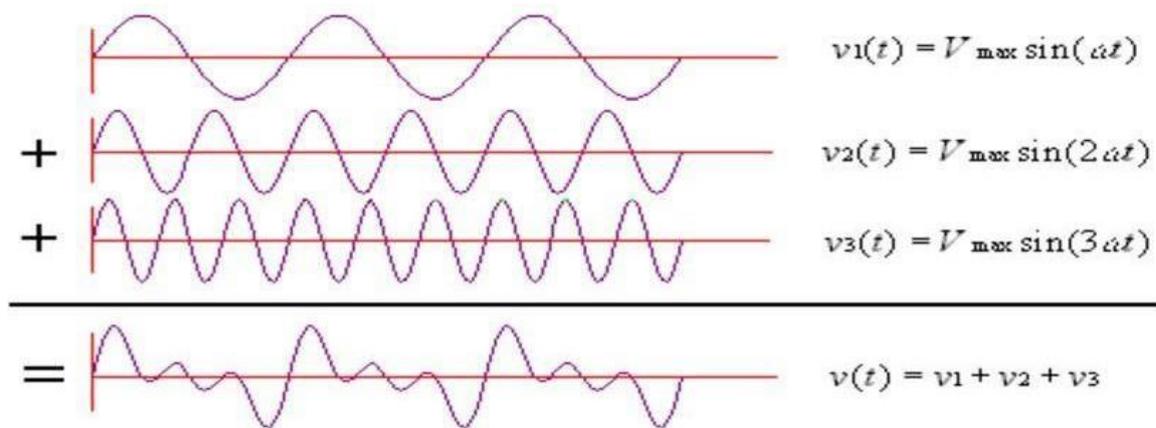


Figure.III.2 Vibrations périodiques.

III.3.1.3.2 Vibrations aléatoires

La forme d'onde des vibrations n'a pas toujours une structure aussi simple que celle des vibrations pures et des vibrations harmoniques. Très souvent, on ne peut plus y distinguer la répétition d'un motif. La forme du signal vibratoire évolue au contraire constamment de manière anarchique. Ce sont les vibrations aléatoires.

III.3.1.3.3 Vibrations d'un système "masse-ressort"

Tout système mécanique, incluant les machines industrielles les plus complexes, peut être représenté par un ou plusieurs systèmes composés d'un ressort, d'un amortisseur et d'une masse. Le corps humain, souvent qualifié de "belle mécanique", est décomposé à la figure suivante en plusieurs sous-systèmes "masse-ressort-amortisseur" représentant la tête, les épaules, la cage thoracique, etc.

Système mécanique complexe :

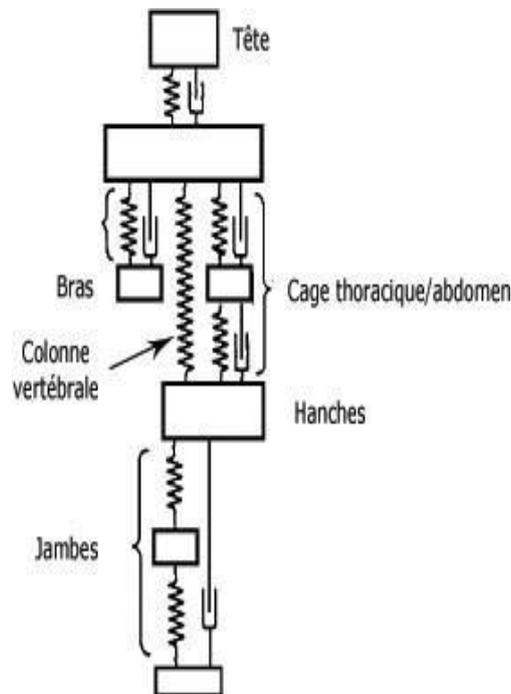


Figure.III.3 Vibrations d'un système "masse-ressort".

La vibration appliquée à l'homme sort du cadre de ce guide. Par contre, comprendre le phénomène vibratoire associé au système "masse-ressort" constitue une excellente entrée en matière. Pourquoi ? Parce que celui-ci représente le système mécanique le plus simple qui existe. Vous allez apprendre à le décrire en termes d'amplitude, de fréquence et de phase.

III.3.1.3.4 Vibration sinusoïdale

La sinusoïde : C'est la forme d'onde la plus simple à caractériser. Cette forme d'onde particulière, peut se visualiser comme le mouvement de la projection verticale de l'extrémité d'une aiguille d'une horloge, ou le mouvement de translation d'un système masse – ressort non amorti. La période T correspond à un tour complet de l'aiguille ou au temps que met la masse pour faire un aller retour. Une sinusoïde est une courbe alternative, de valeur moyenne nulle, représentée par une fonction mathématique simple.

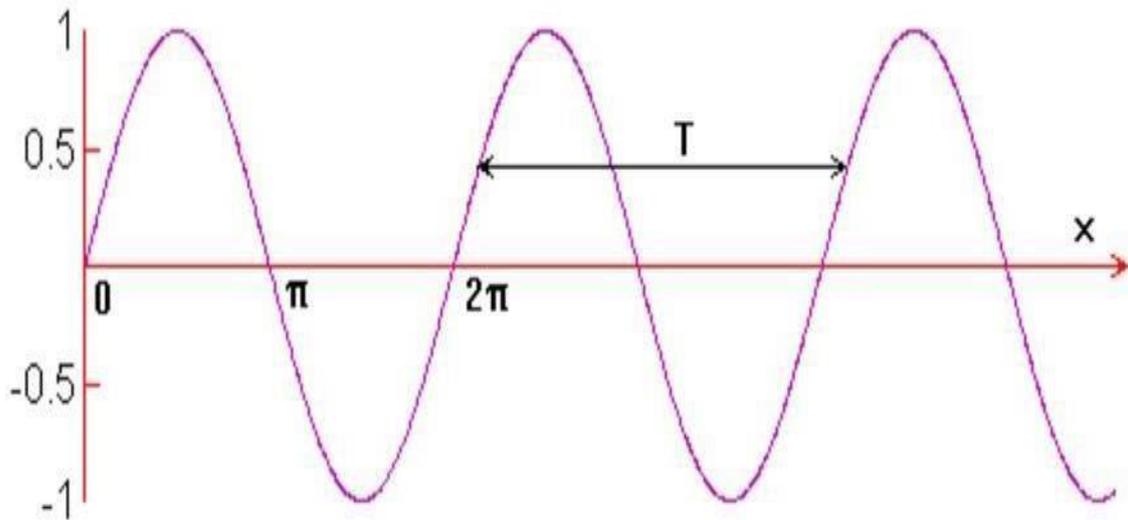


Figure.III.4 Vibration sinusoïdale.

III.3.1.4 Descriptions des vibrations

Décrire les vibrations, c'est donner les valeurs d'un certain nombre de paramètres caractéristiques amplitude, fréquence, ...etc. L'important domaine de valeurs que peuvent prendre les grandeurs vibratoires justifie l'utilisation d'échelles et de grandeurs logarithmiques. Ces grandeurs logarithmiques correspondent au logarithme du rapport des valeurs de deux grandeurs de même espèce.

III.3.1.4.1 Logarithme

L'échelle logarithmique permet de compresser une gamme de valeurs souvent trop large pour que ces valeurs soient discernées entre elles ; ainsi elle peut être assimilée à une balance capable de peser avec la même échelle une mouche et un dinosaure ! Parmi les propriétés de la fonction logarithme, on peut noter que :

- Le logarithme d'une valeur positive peut être négatif; le logarithme de la somme n'est pas égal à la somme des logarithmes.
- La fonction logarithme transforme l'ECHELLE LINEAIRE en ECHELLE LOGARITHMIQUE, souvent plus pratique.

L'opérateur « logarithme » transforme une multiplication en addition et permet de représenter sur un même graphe de très fortes valeurs et de très faibles. [13]

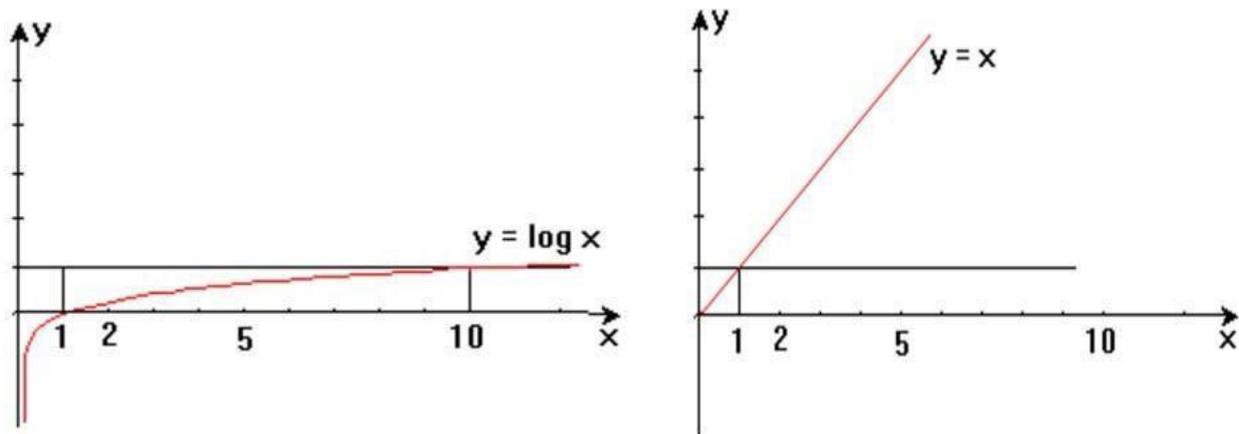


Figure.III.5 Logarithme des vibrations.

III.3.1.4.2 Niveau en décibel – dB

De manière générale, le niveau L en décibels (noté dB, dixième du Bel,) d'une vibration V , est par définition dix fois le logarithme décimal du rapport de V à une valeur de référence V_{ref} $L_v = 10 \log_{10} V / V_{\text{ref}}$. [13]

Cette définition s'applique à toutes les grandeurs physiques proportionnelles à la puissance. La notation L , le plus souvent utilisée pour désigner un niveau, provient de l'anglais "level", traduction du mot "niveau". En France, on utilise aussi quelquefois la notation N .

III.3.1.4.3 Niveau d'accélération

Le niveau d'accélération en log se définit par :

$$L_a = 10 \log_{10} A / A_{\text{ref}}. [13]$$

Où A_{ref} est une accélération de référence qui vaut $1 \mu\text{m/s}^2 = 10^{-6} \text{ m/s}^2$.

III.3.1.4.4 Niveau de vitesse

Le niveau de vitesse en log se définit par :

$$L_v = 10 \log_{10} V / V_{\text{ref}} [13]$$

Où V_{ref} est une vitesse de référence qui vaut $1 \text{ nm/s} = 10^{-9} \text{ m/s}$.

III.3.1.4.5 Niveau de déplacement

Le niveau déplacement en log se définit par :

$$L_d = 10 \log_{10} D / D_{\text{ref}} [13]$$

Où D_{ref} est un déplacement de référence qui vaut $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \mu$.

III.3.1.5 Amplitude et fréquence

En vous reportant à la **figure (III -6)**: suivante, remarquez l'axe t (temps) qui représente la droite que la plume tracerait si la masse était immobile. L'axe d (déplacement) représente, quant à lui, la position de la masse en un temps donné.

III.3.1.5.1 Intensité et fréquence

Selon le type et la nature de vibration, et selon le moyen de mesure, elle peut être mesurée en amplitude (distance linéaire ou angulaire), puissance ou valeur efficace par rapport à une référence (décibel), fréquence (Hertz), etc.

III.3.1.5.2 Définition de l'amplitude, de la période, de la fréquence

Maintenant, à partir d'une même courbe, définir l'amplitude d'un signal, puis sa période et enfin en déduire sa fréquence.

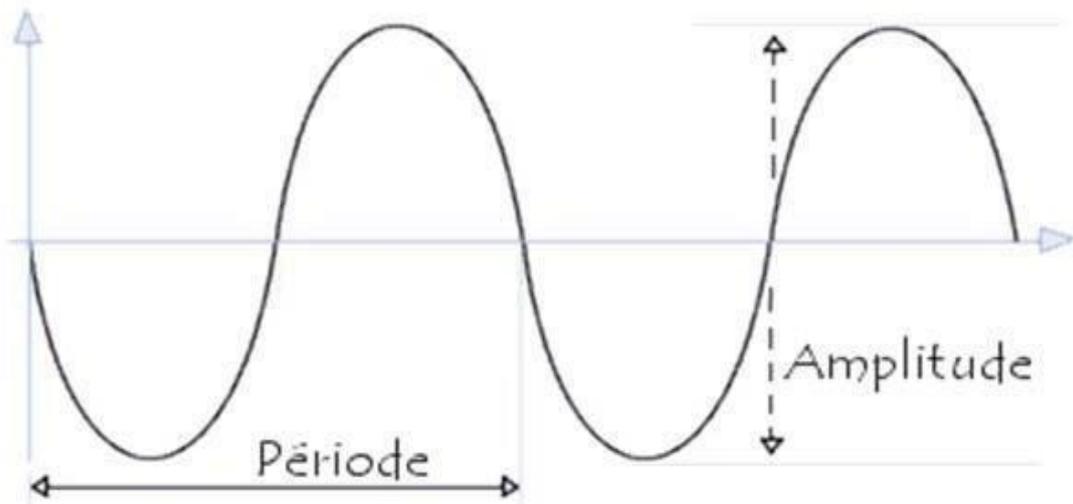


Figure.III.6 l'amplitude, de la période, de la fréquence.

III.3.1.5.3 Amplitude et période

Un phénomène est dit périodique s'il se reproduit avec les mêmes caractéristiques. La fréquence est le nombre de fois ou un phénomène va être observé durant une unité de temps fixée. La période est l'inverse de la fréquence. On note : $T = 1/f$. [13]

Si l'unité de temps choisie est la seconde, la fréquence sera mesurée en hertz (Hz).

III.3.2 Diagnostic des huiles

Introduction

Les lubrifiants en service dans les installations industrielles et les moteurs sont soumis à des phénomènes de dégradation et de contamination qui évoluent dans le temps et les rendent inaptes à leur emploi.

Il est également possible de surveiller régulièrement les lubrifiants en service, afin de ne les remplacer que lorsqu'ils présentent des niveaux de dégradation et de contamination trop importants. Dans ce cas, les analyses mises en oeuvre pour suivre les caractéristiques de l'huile fournissent aussi des informations utiles sur le fonctionnement des machines et leur usure.

III.3.2.1 Fonctions des lubrifiants

- Diminuer les frottements et les résistances passives dans les machines.
- Protéger les organes lubrifiés contre les diverses formes de corrosion et d'usure.
- Evacuer la chaleur produite dans les moteurs ou lors de l'usinage, favoriser l'équilibre thermique des machines.
- Améliorer l'étanchéité vis-à-vis des gaz, des liquides ou des poussières.
- Eliminer les impuretés et les débris d'usure.
- Transmettre de l'énergie ou de la chaleur.
- Assurer l'isolation électrique.
- Améliorer l'état de surface des pièces usinées.....

III.3.2.2 Classification des huiles

III.3.2.2.1 Classification des huiles industrielles

a) Les huiles machines

Selon la taille de la machine, on utilise des huiles différentes, par exemple les huiles spinales utilisées pour les mécanismes de précision (horlogerie, machine à coudre...)

b) Les huiles isolantes

Elles sont utilisées dans les domaines électriques pour certains condensateurs ainsi que pour les interrupteurs ou les disjoncteurs et les transformateurs. Ce sont en générale des huiles de type SPINDLE, avec un indice de viscosité très faible.

c) Les huiles de coupe

Utilisée pour les travaux des métaux.

d) Autres huiles industrielles

Il existe d'autres huiles industrielles telles que les huiles hydrauliques, les huiles turbines, l'huile caloporteur, les huiles pour compresseur à air et les huiles de rinçage.

III.3.2.2 Classification des huiles finies selon leurs viscosités

Pour mesurer les caractéristiques et performances des normes. Les performances d'une huile sont testées puis homologuées par des organismes internationaux:

➤ Classification ISO

Elle classe les huiles à partir de leur viscosité. La désignation normalisée est la suivante : **ISO VG (Viscosité Grade)** suivi d'un nombre précisant la viscosité cinématique exprimée en Centistoke à **40° C**.

➤ Classification SAE

La SAE classe les huiles motrices en fonction de leur viscosité.

On distingue deux catégories ,c'est à dire les "huiles d'été" indiquées par les chiffres SAE 20,30,40,50 et les huiles dites "d'hiver" indiquées par SAE 0W,5W,10W,20W et 25W ces derniers (huiles d'hiver") se réfèrent surtout au pouvoir pour procurer des résultats satisfaisants au démarrage à froid. Les huiles d'été toujours à 100° C, et les huiles d'hiver à des températures plus basses.

➤ Classification AGMA

L'AGMA établit divers tableaux de classification et spécifications de lubrifiants pour engrenages industriels tels que la catégorie FODDA fabriquée par la raffinerie d'ARZEW.

III.3.2.3 Surveillance et maintenance des lubrifiants

Les opérations de surveillance des lubrifiants consistent à effectuer des prélèvements représentatifs de la charge de lubrifiant en service dans le circuit, et à les faire analyser afin de déterminer les niveaux de dégradation et de contamination. Les résultats sont comparés avec ceux obtenus lors de l'analyse des prélèvements

antérieurs (fluide neuf et en service), afin d'en suivre l'évolution. Si ces niveaux demeurent dans des limites acceptables, le lubrifiant est maintenu en service. Si au contraire, ces niveaux s'écartent des limites admises, il faut, après vérification éventuelle, procéder au remplacement de la charge d'huile, à moins qu'il soit possible d'intervenir pour corriger les anomalies observées par des actions de maintenance adaptées).

III.3.2.4 Les méthodes d'analyse des lubrifiants

Les lubrifiants en service peuvent subir deux types d'altérations, des altérations par des corps étrangers (contamination des lubrifiants) et des altérations produites dans le lubrifiant lui-même (dégradation des lubrifiants). De là on peut déduire deux types d'analyses des lubrifiants

III.3.2.4.1 Analyse de la contamination des lubrifiants

La contamination du lubrifiant provient de particules d'usures des pièces internes mais aussi de l'eau et de particules solides en provenance de l'extérieur du système lubrifié. Ces particules solides ou ces fluides étrangers sont souvent à l'origine d'usures anormales.

➤ Analyse de la contamination par les solides

Parmi les méthodes de la contamination solide les plus utilisées l'analyse de comptage des particules solides

Cette analyse permet de surveiller les dimensions et les quantités de particules contaminants solides dans les huiles hydrauliques. L'analyse procure des informations essentielles pour utiliser un fluide dans les circuits exigeants des produits exempts de polluants solides.

Les particules contaminants sont établies selon le code **ISO 4406**. Si l'échantillon contient plus de 300 ppm d'eau (c'est-à-dire l'équivalent de 0,3 % d'eau présent dans l'échantillon), ce test ne peut être effectué. Les méthodes employées (en laboratoire) sont des comptages au microscope et automatique.

III.3.2.4.2 Analyse de la dégradation des lubrifiants (analyse physico-chimique)

L'analyse de la dégradation de l'huile s'intéresse aux propriétés des caractéristiques physico-chimiques et moléculaires du lubrifiant.

Les principes caractéristiques physico-chimiques d'un lubrifiant

➤ **Aspect visuel(ou limpidité)**

C'est un teste visuel effectué sur l'huile pour détecter la présence de corps en suspension, poussière, humidité (trouble), l'huile doit toujours être limpide.

➤ **Masse Volumique**

La densité ne peut être considérée comme une caractéristique d'identification du lubrifiant. Un important changement de densité dans sens décroissant indique une dilution et par contre un accroissement indique une pollution par l'eau. La masse volumique des huiles minérale varie de 0.85 à 0.95 kg/m³.

➤ **Viscosité**

La viscosité c'est la mesure de frottement interne du fluide, elle diminue lorsque la température augmente.

➤ **Indice de viscosité**

Il caractérise le comportement de la viscosité en fonction de la température. Les huiles dont l'indice de viscosité est élevé ont de faibles variations de viscosité.

➤ **Point éclair**

C' la température à laquelle un mélange de vapeur d'huile et d'air prend feu au contact d'une flamme, c'est le point d'inflammabilité .pour une huile neuve, il varie de 180 °C à 250 °C

➤ **Désémulsibilité**

Capacité de séparation des composants d'une émulsion (par exemple : l'eau et l'huile).

➤ **Indice d'acide Total (TAN)**

L'indice d'acide total est utilisé pour des lubrifiants dont le temps de service est élevé et permet de vérifier le niveau d'acidité du lubrifiant, de déterminer l'oxydation de l'huile, la présence de contaminants et la dépréciation des additifs. Il est mesuré suivant les normes NF T 60-112 et **ASTM D664**. Dans le cas ou l'acidité deviendrait très importante et donc corrosive, l'indice d'acidité total devient un déclencheur de vidange.

➤ **Indice de base Total (TBN)**

Permet de vérifier la réserve d'alcalinité de l'huile selon norme **ASTMD 2896**. Ce contrôle permet d'apprécier la faculté du produit à rester en service et de vérifier l'aptitude du

lubrifiant à neutraliser l'acidité continue dans l'huile devenant corrosif pour les éléments métalliques de l'organe lubrifié.

Conclusion

L'analyse d'huile permet de connaître l'état de l'huile mais surtout l'état de la machine. Et les données de l'analyse d'huile peuvent être une source inestimable d'information complémentaire à l'analyse vibratoire.

III.3.3 Diagnostic par l'analyse thermique

Introduction

Tous les objets placés à une température supérieure au degré absolu ($0^{\circ}\text{k}-273^{\circ}\text{C}$) émettent de l'énergie sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'onde sont dans la majorité des cas en dehors du spectre visible.

La plus grande partie de la puissance rayonnée se situe dans le domaine infrarouge dans une gamme de longueurs d'onde $1\ \mu\text{m} < \lambda < 100\ \mu\text{m}$. L'intensité et la longueur d'onde dépendent de la température et de l'état de surface du corps considéré.

La puissance rayonnée par un corps à une température T se transmet à un autre corps qui absorbe, transmet et réfléchit tout ou une partie du flux émis par le corps émetteur. Deux types de signature des températures sont utilisées en diagnostic industriel : les mesures de température par contact et sans contact.

III.3.3.1 Mesure de température par contact

Les signatures thermiques sont fournies par des capteurs qui peuvent être des thermocouples et des sondes à résistances, fixés directement sur les parties des matériels à surveiller. Ces signatures temporelles contiennent des informations fréquentielles qui dépassent rarement quelques Hz. Les gammes de température ainsi mesurées dépassent rarement 1000°C .

III.3.3.2 Mesure de température sans contact

Les signatures thermiques sans contact sont basées principalement sur la détection du flux infrarouge émis par la partie du matériel à surveiller. Le principe des détections infrarouge repose sur la conversion du flux infrarouge en un signal électrique à l'aide des détecteurs thermiques ou quantiques. Les mesures de température peuvent être ponctuelles ou

globales sous la forme d'image infrarouge. Parmi les très nombreuses technologies disponibles, les plus utilisées sont les suivantes :

- les pyromètres et radiomètres qui donnent des mesures ponctuelles.
- les scanners de ligne qui donnent une ligne de mesure d'environ 100 points.
- les caméras infrarouges qui fournissent une image bidimensionnelle traitée ensuite par la technique dite 'fausses couleurs'.

III.3.3.2.1. La thermographie infrarouge

La thermographie infrarouge est une technique de mesure qui permet de capter le rayonnement électromagnétique des différents objets de notre environnement.

Grâce à une caméra thermique et son ordinateur intégré, le rayonnement est converti en image visible avec différentes palettes de couleurs auxquelles sont associées des températures.

L'opérateur sera capable d'analyser cette image infrarouge (thermo grammes) en fonction du type de surface observée et de son environnement extérieur.

Cette technique présente un avantage majeur, en opérant à distance et sans contact, l'inspection se réalise sur les installations sous tension. L'opérateur réalise un balayage rapide des équipements avec la caméra infrarouge en respectant les distances de sécurité, sauvegarde sur une carte PCMCIA, les images numériques caractéristiques de défauts constatés et de retour à son bureau, procède, depuis son PC à l'analyse des résultats de l'intervention qu'il vient d'effectuer.

III.3.3.2.2 Notions en thermodynamique

Les notions de température et de chaleur restent souvent mal comprises et sont utilisées à tort comme des synonymes. Nous nous efforcerons de définir de manière précise et univoque ces deux termes afin d'éviter toute confusion. Ces définitions pourront également s'avérer utiles si vous envisagez une carrière de thermographiste.

III.3.3.2.3 Notions de température, chaleur

Afin de comprendre la température et la chaleur, nous devons regarder les molécules qui sont les blocs fondamentaux dont toute matière est constituée. Ces molécules d'une substance sont toujours plus ou moins en mouvement (aléatoire).

Les molécules chaudes se déplacent plus rapidement que les molécules froides. Pour une substance donnée, la vitesse aléatoire moyenne des molécules correspond au niveau de la température.

La substance contient également une certaine quantité de chaleur.

III.3.3.2.3.1 Chaleur

La chaleur est l'énergie associée à la quantité de molécules et d'atomes qui constituent la matière, et qui sont affectés d'une certaine vitesse moyenne aléatoire.

Elle est créée par la conversion d'autres formes d'énergie, comme par exemple la combustion d'un carburant, le mouvement ou la friction.

Lorsqu'une bûche se consume, une réaction chimique se produit impliquant la matière combustible de la bûche et l'oxygène contenu dans l'air.

Ce processus libère de la chaleur. En fait, la plupart des procédés de fabrication industriels et ceux de la vie courante impliquant une conversion énergétique produisent de la chaleur.

Un objet peut contenir de la chaleur ou de l'énergie thermique.

La chaleur et l'énergie sont par exemple mesurées en :

- joule (J)
- watt seconde (Ws) ou kilowatt heure (kWh)
- newton-mètre (Nm)

III.3.3.2.3.2 Température

La température est associée à la vitesse moyenne aléatoire des molécules et des atomes d'une matière.

La température permet de définir le milieu de l'objet. Contrairement à l'énergie, qui elle est une valeur absolue, la température est une valeur relative. Elle nous indique comment un objet interagit sur un autre. Nous devons considérer la température comme un niveau sur une échelle, alors que la chaleur peut être quantifiée. Comparons deux piles de pommes et utilisons la température pour décrire la hauteur des piles et la chaleur pour décrire le nombre de pommes dans la pile. Le fait que la pile soit large ne veut pas forcément dire qu'elle est grande.

La température n'est pas une forme d'énergie. Si c'était le cas, pourquoi utiliserions-nous différentes unités de mesure ? La température et l'énergie sont liées, mais ne représentent pas la même chose. La température d'un objet variera selon que l'énergie thermique de cet objet augmente ou diminue ; elle est donc la conséquence de la variation de l'énergie. Mais la température n'indique pas combien d'énergie est contenue dans un objet, elle révèle uniquement comment elle est stockée ! Et plus la pile est haute, plus la probabilité qu'elle s'écroule est grande.

La température d'un objet nous renseigne uniquement sur sa propension à libérer de la chaleur vers d'autres objets, et non sur la quantité d'énergie qu'il contient. Une tasse d'eau bouillante contient moins d'énergie qu'une baignoire remplie d'eau tiède, mais si elle est versée dans cette baignoire, l'eau de la tasse fournira de l'énergie à la baignoire. [14]

III.3.3.2.3.2.1. Unités de mesure de la température

Il existe plusieurs unités de mesure de la température. Dans ce manuel, nous en utiliserons deux, une échelle absolue et une échelle relative.

Existe-t-il une limite inférieure de température ? Oui ! Quelle est la température la plus basse que nous puissions imaginer ? Le zéro absolu !

Si nous partons du principe que la température est liée au mouvement des molécules, nous pouvons imaginer un arrêt total de leur mouvement, c'est-à-dire une immobilité. Nous sommes d'accord pour dire que lorsque cette phase est atteinte, le mouvement étant nul, il ne peut pas être encore diminué ?

Le zéro absolu est donc le point théorique auquel les molécules ne sont plus du tout en mouvement. Nous disons théorique car cette température n'apparaît pas naturellement, même pas dans les plus sombres recoins de l'espace interstellaire, où nous pouvons trouver les points naturels les plus froids de l'univers (2,7 K).

En partant du principe que la relation entre la température et la pression des gaz est linéaire, il a été prouvé, par extrapolation, qu'il existait un point auquel les molécules ne bougent plus. Ce point peut même être calculé, bien qu'il ne puisse être atteint.

III.3.3.2.3.2 Les échelles de température

a- Les échelles de température absolue

Le zéro absolu est le point logique de départ pour les échelles de température absolue, et c'est la manière dont elles sont définies : elles commencent au zéro absolu.

L'échelle de Kelvin est la norme légale mondiale, l'unité de mesure est le kelvin (K). Il existe d'autres échelles de température absolue, mais nous utiliserons celle de Kelvin.

b- Les échelles de température relative

Strictement parlant, si nous créons une échelle de mesure, il ne serait pas judicieux de placer le point zéro autre part qu'à l'un des deux bouts.

Néanmoins, c'est exactement ce que nous faisons dans le cas des échelles de température relative.

Sur ces dernières, un autre point zéro que le zéro absolu est utilisé, par exemple le point de fusion de l'eau ou de l'eau salée. Le point de référence doit être choisi de manière à pouvoir être facilement reproductible et ne pas être affecté par des facteurs externes, tels que la pression atmosphérique ou l'altitude. La raison pour laquelle un point de référence particulier a été choisi peut être liée à la science exercée par l'inventeur de l'échelle.

La plus commune des échelles de température relative est l'échelle de Celsius. L'unité de mesure est le degré Celsius ($^{\circ}\text{C}$).

Dans le système de mesure anglo-saxon, l'échelle de température relative utilisée s'exprime en degrés Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) ; avec ($^{\circ}\text{F} = ^{\circ}\text{C} + 32$).

Les échelles de température relative sont adaptées à une utilisation quotidienne et acceptées par usage ; s'il fallait exprimer la température d'une pièce en kelvin, nous devrions dire 293 au lieu de 20, ce qui paraîtrait certainement un peu étrange.

c- Comparaison des échelles de température :

Les échelles Celsius et Kelvin ont différents points zéro, mais la même taille d'incrément, un degré Celsius est identique à un kelvin ($1^{\circ}\text{C} = 1\text{K}$).

(Par opposition à l'échelle de Fahrenheit où la taille des incréments est différente de celle de Celsius et Kelvin).

La conversion de température entre Kelvins et degrés Celsius, et inversement, est très simple. Il suffit d'ajouter ou de soustraire 273, conformément à l'illustration ci-après.

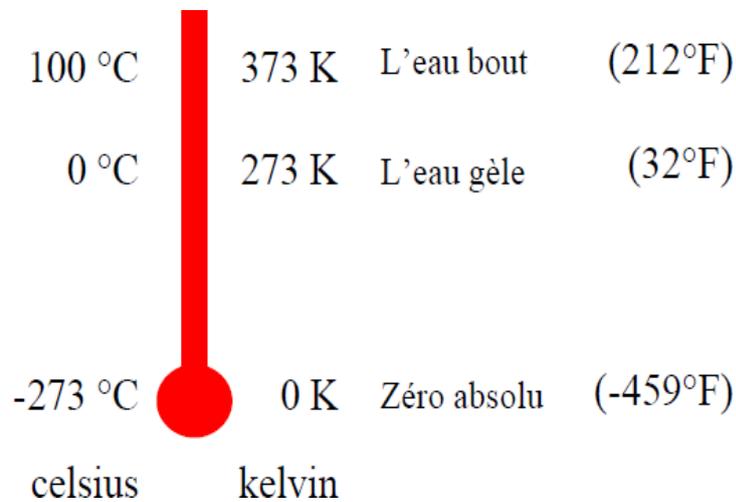


Figure.III.7 Conversion de températures en Celsius et Kelvin

III.3.3.2.4 Modes de transferts de chaleur

La chaleur peut être transférée de plusieurs façons et nous verrons ultérieurement les différents modes de transfert.

- Conduction
- Convection
- Rayonnement

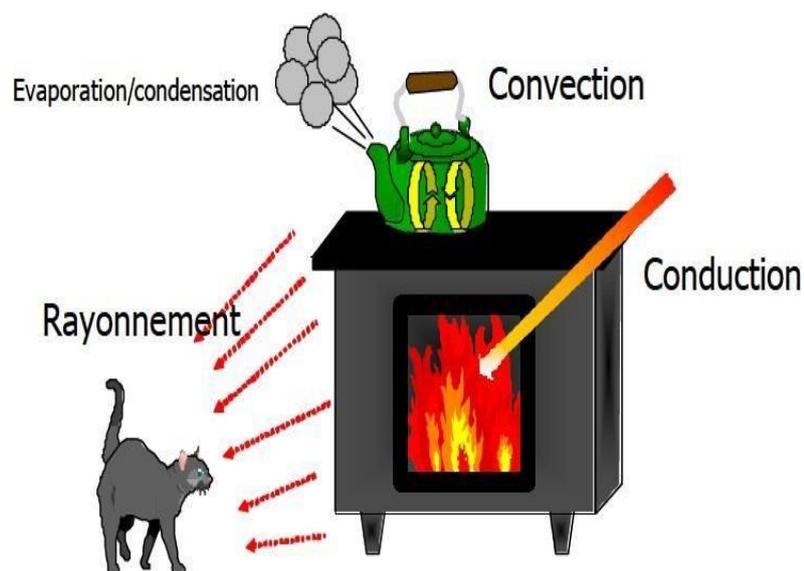


Figure.III.8 Modes de transferts de chaleur

III.3.3.2.4.1. Conduction

La conduction est le transfert thermique direct de molécule à molécule, par suite d'un contact.

La chaleur et la température sont liées au mouvement moléculaire. Lorsque deux molécules sont proches au point de se toucher, celle ayant la température la plus élevée aura un mouvement moléculaire plus important. C'est pourquoi, elle transférera une partie de son énergie à la molécule plus lente. Ce processus peut aboutir à une réaction en chaîne.

Les molécules qui sont très petites doivent se toucher pour qu'il y ait conduction. Par exemple, si vous utilisez une poêle sur une plaque de cuisson et que le fond de la poêle n'est pas entièrement plat, la plaque ne sera pas en contact direct. L'air entre la plaque et la poêle transférera néanmoins la chaleur, mais beaucoup moins efficacement que si les deux objets étaient en contact direct.

Le transfert peut avoir lieu tant entre différents objets qui se touchent qu'au sein d'un objet. La forme de l'objet ne joue aucun rôle. La conduction peut avoir lieu dans des solides, des liquides et des gaz.

Quelques exceptions mises à part, c'est le seul mode de transfert de chaleur dans un solide ! Il existe des solides qui transmettent le rayonnement thermique, mais ces matériaux sont rares et très chers ! La lentille de la caméra infrarouge, par exemple.

Le fait que les solides soient fortement affectés par les transferts de chaleur par conduction est un phénomène que les thermographistes doivent bien comprendre. La plupart des objets observés avec la caméra sont des solides ! Les formes typiques des répartitions de température en surface des objets ont souvent pour origine un transfert de chaleur par conduction. [15]

III.3.3.2.4.2 Convection

La convection est un mode de transfert thermique dans lequel la chaleur est véhiculée grâce à un milieu fluide annexe, lui-même mis en mouvement soit par la gravité soit par une autre force.

La convection se base sur le transport de masse d'un fluide, liquide ou gaz. Elle a lieu dans le fluide. Pour que le transfert de chaleur ait lieu entre un fluide et un solide ou entre deux fluides qui ne se mélangent pas, le mode de transfert est nécessairement la conduction. Directement

au bord d'un solide, il y a toujours une fine couche de fluide stationnaire appelée la couche limite où le transfert par conduction s'effectue.

Un thermographe doit comprendre le transfert de chaleur par convection, car bien que nous analysons généralement des solides, les images que nous observons sont également influencées par la convection.

La plupart des gaz étant invisibles en infrarouge, les rares fois où vous pouvez voir le flux thermique de convection de manière directe, c'est lors de l'observation de surfaces liquides. Dans la plupart des cas, les images de convection seront visibles de manière indirecte sur des surfaces solides.

Une simple expérience pour illustrer la convection consiste à regarder un seau d'eau chaude.

Un fluide est affecté en son sein de différences de température. Là où il est plus chaud, les molécules sont plus éloignées les unes des autres. Cet état est dû à un mouvement moléculaire plus important, qui renvoie les autres molécules plus loin. En conséquence, si les molécules sont plus espacées, le volume chaud du fluide sera d'une densité inférieure. À l'inverse, les parties les plus froides seront d'une densité plus élevée. Les différences de densité au sein du fluide induisent une différence au niveau de l'intensité de la force de gravité. Les parties les plus chaudes subissent une moindre influence, et remontent alors vers la surface. C'est l'inverse pour les zones froides.

Une circulation naturelle se crée au sein du fluide. Ce processus déplace de la chaleur d'un point à un autre ; on obtient alors un flux thermique. Si nous ouvrons la fenêtre d'une maison chauffée lors d'une journée froide, l'air chaud sort et l'air froid rentre. L'air chaud et l'air froid se mélangent, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur s'atténue. Le flux thermique s'est produit. La chaleur circule du chaud vers le froid. Le terme de "réchauffement" est erroné. Les fluides chauds montent, mais la chaleur circule toujours du plus chaud au plus froid. [15]

Le processus décrit ci-dessus est nommé convection naturelle, car seule la force de gravité est impliquée dans la circulation. Dans le cas d'une convection forcée, le fluide est soumis à une autre force extérieure, par exemple, un mélangeur, une pompe, ou encore le vent.

III.3.3.2.4.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Le transfert de chaleur par émission et absorption de rayonnement électromagnétique est appelé transfert de chaleur par rayonnement.

La molécule jouait un rôle important. Lors d'un transfert de chaleur par conduction, les molécules entrent en collision et échangent leur énergie cinétique. Lors d'un transfert de chaleur par convection les molécules circulent librement en fonction de la force de gravité et de forces externes. Le transfert de chaleur par rayonnement thermique est complètement différent, car il ne nécessite aucun support matériel. En fait, le rayonnement thermique se propage mieux quand il n'y a pas de molécules, c'est-à-dire dans le vide.

Le rayonnement thermique est un rayonnement électromagnétique.

Les objets émettent un rayonnement thermique en fonction de leur température. Comme ils possèdent une température supérieure à zéro, ils émettent donc tous un rayonnement thermique. Plus la température est élevée, plus le rayonnement thermique émis est intense.

Certaines matières émettent plus que d'autres. Le rayonnement thermique émis dépend de la température de l'objet et des caractéristiques de la matière.

Le rayonnement thermique traversera facilement un gaz, mais difficilement, ou pas du tout, la plupart des liquides et des solides.

Le transfert de chaleur par rayonnement a lieu par le biais de l'émission et l'absorption de rayonnement thermique. Tous les objets émettent et absorbent simultanément. Le transfert net de chaleur est la différence entre ce qu'un objet absorbe et émet. Nous abordons dans ce titre le comportement des rayonnements et des phénomènes d'échange. [16]

Nous emploierons une certaine terminologie, et afin d'éviter toute confusion voici au préalable quelques définitions :

III.3.3.2.4.4 Ondes

Est une déformation, ébranlement ou vibration dont l'élongation est une fonction périodique des variables de temps et d'espace.

Avant toute chose, précisons que si certaines ondes ont besoin d'un support matériel pour se propager dans l'espace (vibration, son, etc.), ce n'est pas le cas des ondes électromagnétiques.

Les différentes longueurs d'onde visibles sont perçues par l'œil humain comme couleurs différentes. Les limites de notre bande spectrale de sensibilité sont approximativement $0.4 \mu\text{m}$ (violet) et $0.7 \mu\text{m}$ (rouge). Les autres couleurs se trouvent entre les deux, réparties selon ce qui est appelé l'arc en ciel. [14]

Les bandes de longueur d'onde que nous utilisons couramment possèdent les dénominations suivantes :

- Rayons Gamma
- Rayons X
- Rayons ultraviolets
- Visible
- Infrarouge
- Micro-onde
- Onde radio

III.3.3.2.4.5 Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est arbitrairement divisé en un certain nombre de longueurs d'ondes, baptisés « bandes », distinguées par les méthodes employées pour produire et détecter le rayonnement. Il n'y a pas de différence fondamentale entre le rayonnement dans les différentes bandes du spectre électromagnétique. Elles sont toutes régies par les mêmes lois et les seules différences proviennent des différences entre les longueurs d'ondes.

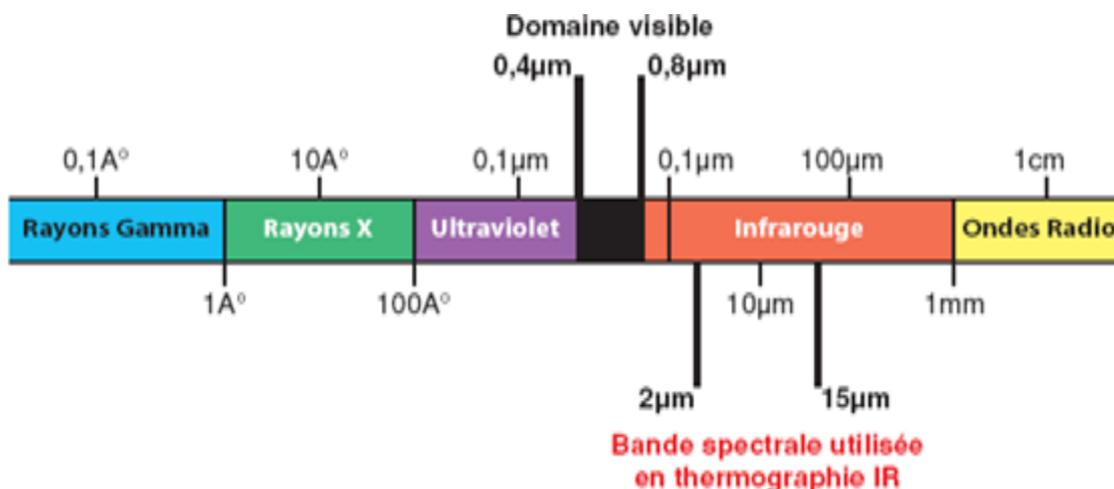


Figure.III.9 spectre électromagnétique

III.3.3.2.5 Corps noir

On définit également l'émetteur parfait appelé corps noir. C'est un objet idéal (n'existant pas physiquement) qui absorbe la totalité des rayonnements incidents quelles que soient leur longueur d'onde et leur direction et qui émet conformément à la loi de Planck.

III.3.3.2.5.1 Loi de Planck

Max Planck a su décrire la répartition spectrale d'un rayonnement émis par un corps noir à l'aide de la formule suivante :

$$W_{\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \cdot (e^{\frac{hc}{\lambda \cdot T}} - 1)} \cdot \left(\frac{1}{\lambda^5} \right)$$

W_{λ_b} = l'émittance spectrale du corps radiante du corps noir à longueur d'onde λ .

C = la vitesse de la lumière = 3×10^8 m/sec.

h = la constante de Planck = 6.62×10^{-34} joule sec. Watt.s²

k = la constante de Boltzmann = 1.4×10^{-23} joule/K.

T = la température absolue (K) d'un corps noir.

λ = la longueur d'onde(m).

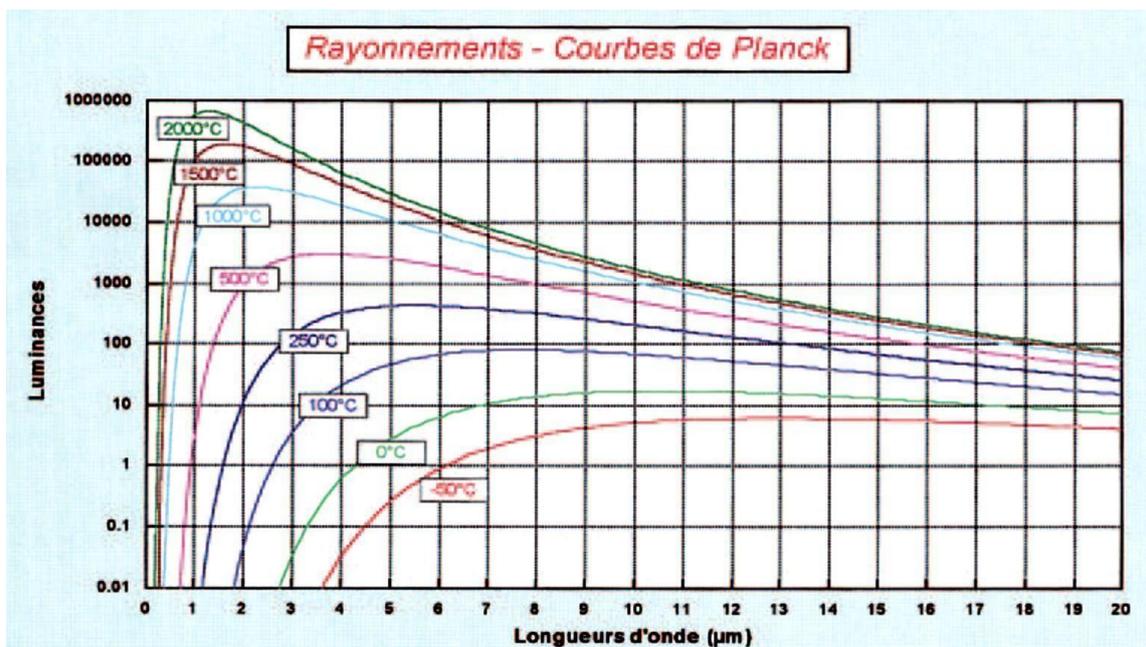


Figure.III.10 Emission spectrale radiante d'un corps noir

Par ce graphe, nous constatons que :

- Le spectre d'émission du corps noir est continu.
- La puissance électromagnétique émise croît avec la température du corps noir.
- L'émission de rayonnement passe par un maxima : ce maxima se produit à des longueurs d'onde de plus en plus faibles lorsque la température du corps noir croît.
- A partir d'une température de l'ordre de 520°C, l'émission du rayonnement infrarouge apparaît dans le domaine spectral visible (0,4-0,8µm) : les objets chauffés au moins à cette température deviennent donc visibles par l'œil humain de par la couleur rouge sombre. En dessous de cette température, nous ne "voyons" pas les températures car l'émission de rayonnement se fait au-delà de la bande spectrale sur laquelle sont calibrés nos yeux. Dès lors, pour visualiser des corps dont la T° est inférieure à 520°C, il faut utiliser des appareils dont le seuil de détection est inférieur à celui de l'œil humain.

III.3.3.2.5.2 Loi de déplacement de Wien

Par dérivation de la loi de Planck on obtient la loi de Wien :

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} [\mu m]$$

- λ_{\max} : Longueur d'onde à laquelle se produit l'émission maximale;
- T : Température absolue du corps en Kelvin.

La courbe définie par cette équation est représentée en pointillé sur la figure ci-dessous. Celle-ci est modélisée par les maxima des courbes de Planck. Elle indique que lorsque la température croît, le maximum d'énergie émis se déplace vers les faibles longueurs d'onde.

Plus simplement, cette loi exprime le fait que la couleur d'un objet chauffé à haute température varie du rouge sombre au blanc.

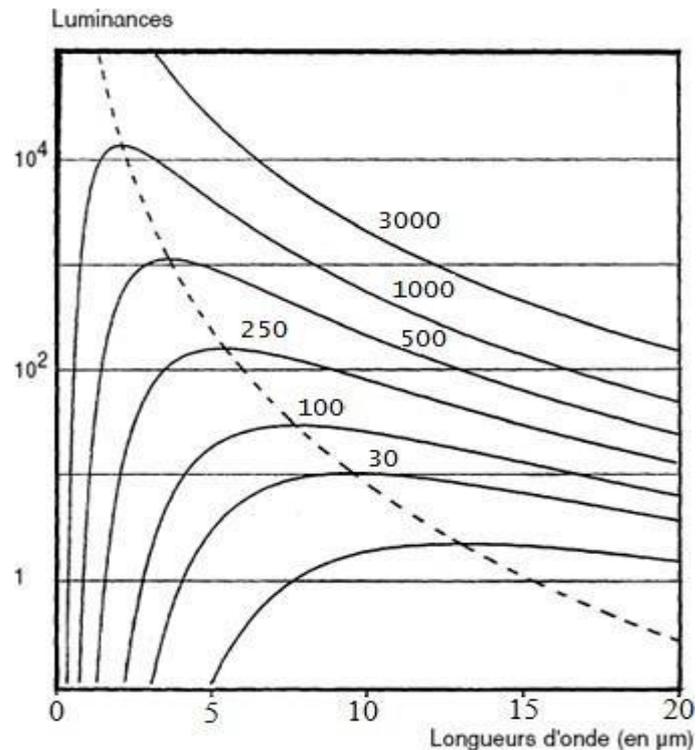


Figure.III.11 Courbe définie la loi de Wien.

III.3.3.2.5.3 Loi de stefan-boltzmann

La loi de stefan-boltzmann établit la relation entre la température et la puissance rayonnée, pour un corps noir.

En intégrant la formule de Planck de $\lambda = 0$ à $\lambda = x$, on obtient l'émittance radiante totale (W_b) d'un corps noir :

$$W = \sigma T^4 [\text{Watts} / \text{m}^2]$$

Où

$\sigma = 5.7 \times 10^{-8} \text{ Watts/m}^2$ est la constante de Stefan-boltzmann

Nous constatons que la température absolue T est élevée à la puissance quatre. Ce n'est donc absolument pas linéaire. La température absolue indique que l'unité doit être le Kelvin ($^{\circ}\text{K}$). Le résultat est ensuite donné en W/m^2 . Un autre facteur, σ , apparaît dans la formule. Il s'agit de la constante de Stefan-Boltzmann. Nous pouvons considérer cette constante comme un simple facteur de correction qu'il n'est pas nécessaire de retenir. A l'aide de cette formule nous pouvons calculer par exemple la puissance de rayonnement de la pièce où nous nous trouvons. Nous ignorons volontairement qu'il ne s'agit pas d'un corps noir parfait.

III.3.3.2.6 Corps cible (corps réel)

En fait, les objets réels émettent un flux toujours inférieur à celui du corps noir idéal, quelles que soient la longueur d'onde et la température. On définit ainsi l'émissivité spectrale directionnelle $\varepsilon(\lambda, \delta, T)$ de l'objet comme étant le rapport de la luminance énergétique spectrique directionnelle de l'objet à celle du corps noir, placés dans des conditions identiques de mesure. C'est une grandeur sans dimension comprise entre 0 et 1 dont la valeur est influencée par l'état de surface, la longueur d'onde, la direction d'émission et la température du matériau. Lorsque $\varepsilon(\lambda, \delta, T)$ ne dépend pas de la longueur d'onde, on dit qu'il s'agit d'un corps gris. La connaissance de $\varepsilon(\lambda, \delta, T)$ et une mesure de température relative permettent de remonter à la température de surface vraie de l'objet. La détermination de cette valeur est donc fondamentale en thermographie infrarouge quantitative.

Loi de Stefan-Boltzmann pour un corps réel

Nous avons abordé plus haut la loi de Stefan-Boltzmann et la relation qu'elle établit entre l'intensité de rayonnement d'un corps noir et la température absolue élevée à la puissance quatre. Que se passe-t-il si l'objet cible n'est pas un corps noir, mais un corps réel ?

En situation de mesure réelle, nous ne rencontrons jamais des corps noirs. Nos objets ne seront pas des corps noirs, mais des « corps dite réels » les corps réels peuvent avoir toutes les caractéristiques mentionnées dans ce chapitre, à savoir, la capacité d'émettre, d'absorber, de réfléchir et de transmettre. Toutefois, la plupart des objets cibles ne sont pas transmissifs mais opaques, donc : $\tau = 0$

Quel que soit la température, le rayonnement émis est inférieur à celui du corps noir !

Nous devons simplement introduire le facteur d'émissivité pour pouvoir appliquer.

Lorsque ces deux conditions seront remplies, notre formule de rayonnement devient :

$$W_{cr} = \varepsilon \sigma T^4 [W/m^2]$$

III.3.3.2.7 Utilisation de la thermographie Infrarouge en Maintenance prédictive

Les applications de la thermographie pour la maintenance sont nombreuses. Dans le monde entier des entreprises les solutions thermographie dans leurs programmes d'inspections en maintenance prédictive, pour l'inspection et la surveillance électriques (BT, HT), en mécanique, sur des fours et sur des bâtiments. Par ailleurs, de nouvelles applications de la thermographie infrarouge sont développées régulièrement.

Tenons comme exemple de l'application de la thermographie dans la maintenance électrique le contrôle des lignes aériennes à haute tension, des alternateurs et des moteurs, des stations électriques, des transformateurs, des distributions électriques, des tableaux et chaînes de production.

Pour l'utilisation de la thermographie dans la maintenance mécanique on prend l'exemple des équipements mécaniques tels que moteurs, paliers, pompes, compresseurs qui peuvent être contrôlés par thermographie. Même si en mécanique l'analyse vibratoire sera l'outil de diagnostic principal de la maintenance prédictive, la thermographie est complémentaire à cette technologie et a pour avantage, une mesure sans contact, donc plus rapide.

III.3.3.2.8 Détecteur infrarouge

Un détecteur infrarouge est en principe un convertisseur d'énergie infrarouge absorbée en signal de sortie, habituellement un courant ou une tension. On distingue deux types de détecteurs :

- Détecteurs quantiques.
- Détecteurs thermiques

III.3.3.2.8.1 Détecteurs Quantiques

Ce sont des détecteurs photoélectriques fournissant un signal électrique qui suit l'excitation directe de leurs propres particules sous l'action des photons incidents émis par un émetteur (cible thermique examinée), tous les détecteurs quantiques sont composés de matériaux semi-conducteurs dans lesquels la génération de charge (par exemple les électrons) est directement associée à l'absorption d'un photon. [16]

III.3.3.2.8.2 Détecteurs Thermiques

Ce sont des récepteurs dans lesquels le flux de rayonnement électromagnétique incident est absorbé et transformé en chaleur. Les variations de résistances d'origine thermique du matériau, sont génératrices d'un signal proportionnel au flux provoquant l'échauffement. Le défaut principal des détecteurs thermiques est leur temps de réponse relativement long en fonction des processus thermiques en jeu.

L'avantage du détecteur quantique par rapport au détecteur thermique est dû à sa réponse rapide et sa sensibilité plus élevée. [16]

III.3.3.2.9 Système de Mesure par thermographie Infrarouge

La caméra de mesure est étalonnée sur corps noir à courte distance et dans des conditions maîtrisées de laboratoire. C'est la situation d'étalonnage. Cette caméra est ensuite mise en œuvre sur un corps réel dans des conditions pouvant être quelconques, sur site. C'est une Situation de mesure. [16]

Pour que la mesure soit correcte, l'opérateur doit tenir en considération les Grandeur d'influence et les conditions usuelles de validité suivantes :

- **L'émissivité e** : le corps est opaque et gris dans la bande spectrale de la caméra et l'émissivité directionnelle est quasiment constante.
- **La température d'environnement T_e** : la température d'atmosphère.
- **Le facteur de transmission atmosphérique τ_a** : il dépend de la bande spectrale de la caméra, de la distance de mesure et de divers paramètres secondaires

III.3.3.2.10 Les avantages de La thermographie dans l'industrie

L'intérêt de la thermographie est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet ; c'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques :

- Température très élevée (supérieure à 2000 °C).
- Mesures à grande distance.
- Environnement très agressif.
- Pièce en mouvement.
- Localisation des points chauds.

III.3.3.2.11. La caméra infrarouge

La caméra infrarouge moderne ressemble extérieurement de plus en plus à un caméscope. Si son aspect s'assimile à celui d'une caméra vidéo normale, son mode de fonctionnement en est tout différent.

➤ **Principe**

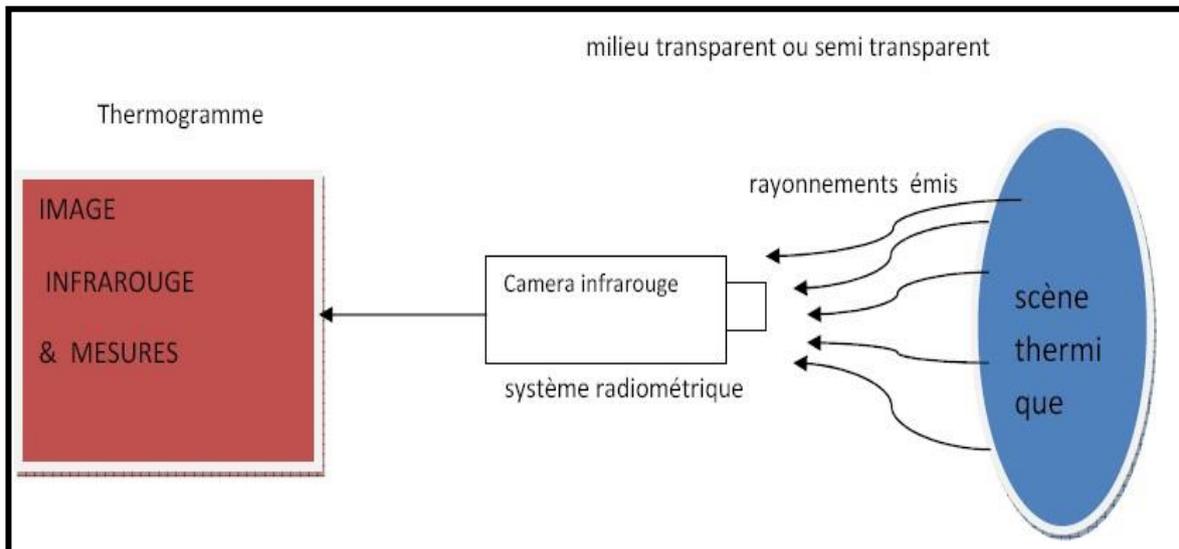


Figure.III.12 principe de fonctionnement de la caméra infrarouge

➤ **Fonctionnement**

La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur (ex : l'atmosphère) les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques : ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle "Thermogramme".

➤ **Les détecteurs :**

Il existe 2 types de détecteurs :

- **Les détecteurs thermiques** : ceux-ci sont basés sur la détection d'une augmentation de température au niveau du détecteur. La variation de température fait varier l'une des propriétés physiques du matériau détecteur (résistance électrique par exemple) et provoque une variation du signal délivré. Ce type de détecteur a un temps de réponse relativement long.

- **Les détecteurs quantiques** : ceux-ci sont constitués de semi-conducteurs où l'absorption d'un photon (particule d'énergie lumineuse) provoque la libération ou le transfert d'électrons. Ce type de détecteur a une sensibilité élevée et un temps de réponse extrêmement faible.

L'utilisation de ces détecteurs au maximum de leur sensibilité nécessite leur refroidissement à des températures très basses :

- système refroidi par de l'azote liquide : - 196°C;
- refroidisseur thermoélectrique à effet Peltier : -70°C;
- refroidisseur "Stirling" à mini compresseur : -196°C.

On utilise principalement les détecteurs quantiques dans les appareils de thermographie; ceux-là travaillent dans les bandes spectrales 2 à 5 μm et 8 à 13 μm (pour les raisons définies préalablement).

➤ **Les systèmes de mesure des caméras infrarouges**

Il existe deux systèmes de mesure des flux électromagnétiques ou luminances :

1) La caméra à monodétecteur ou système à balayage spatial

Comme le nom l'indique, l'appareil est muni d'un détecteur unique couplé à un système optomécanique à balayage horizontal (ligne) et à balayage vertical (trame). L'addition des deux balayages à des fréquences spécifiques autorise l'analyse d'une scène thermique par l'image successive du détecteur ou de la surface élémentaire {dS}.

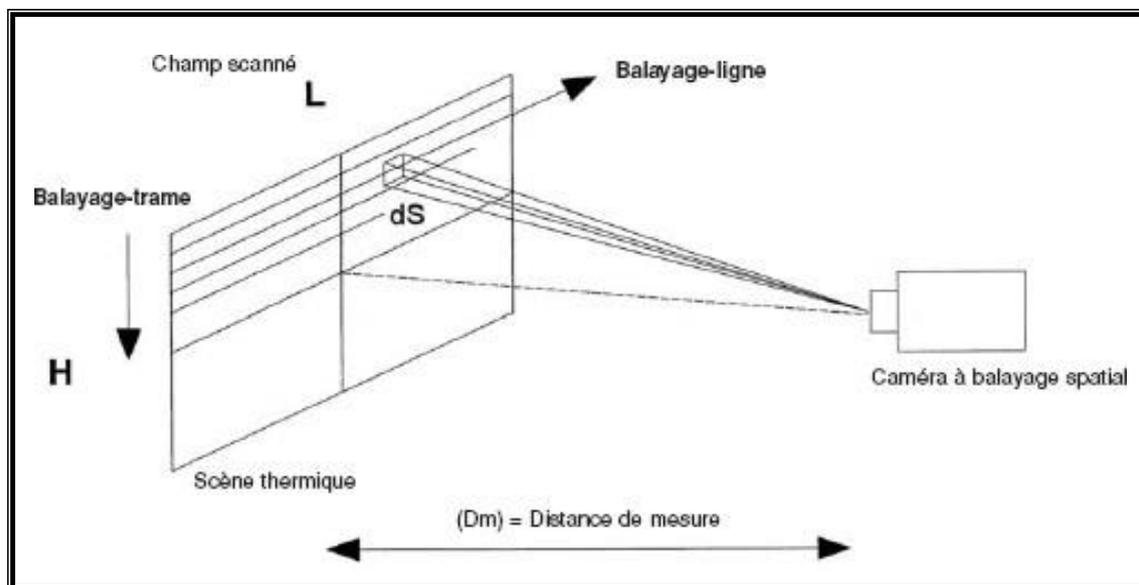


Figure.III.13 La caméra à monodétecteur

La taille du champ scanné (LxH) est fonction :

- du système de balayage optomécanique.
- de l'objectif de la caméra.
- de la distance de mesure.

1) La caméra à plan focal

Celle-ci est équipée d'une matrice de détecteurs. L'image de chaque détecteur couvre de façon permanente une surface élémentaire dans le champ scanné. La scène thermique est ainsi quadrillée et analysée simultanément en tout point par le "détecteur matriciel".

On peut trouver sur le marché des caméras à plan focal avec une matrice de 240x320 éléments détecteurs.

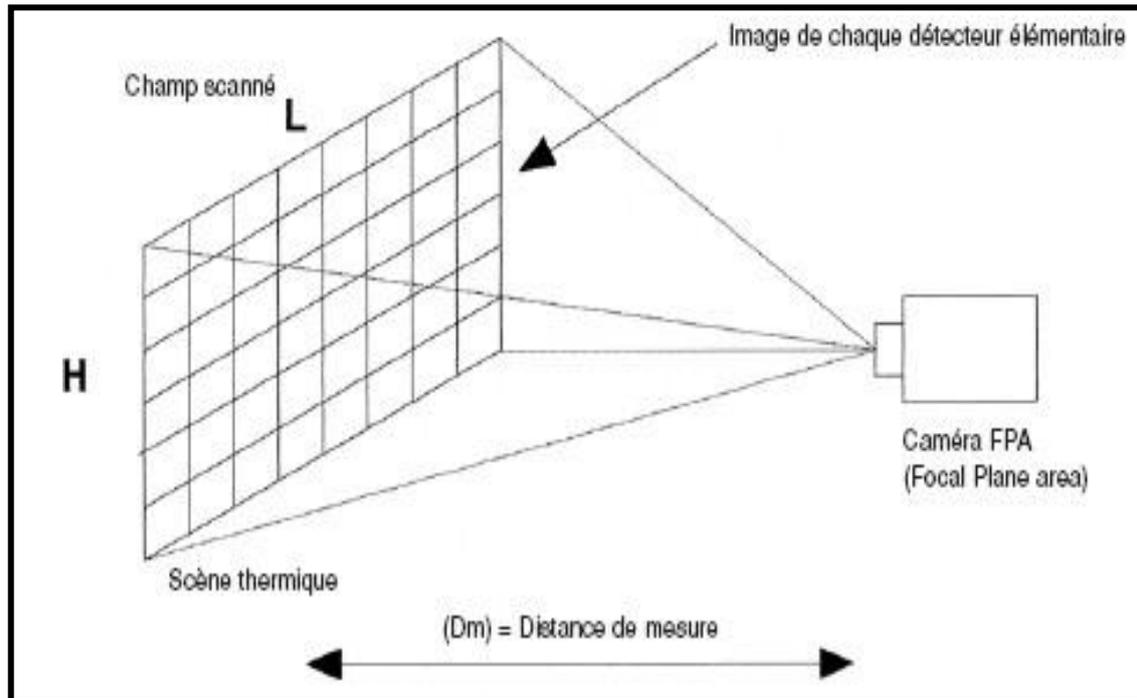


Figure.III.14 La caméra à plan focal

La taille du champ scanné est fonction de :

- la taille de la matrice de détecteurs.
- l'objectif de la caméra.
- la distance de mesure.

Dans chaque cas, les détecteurs influencés par les rayonnements émis par une scène thermique délivrent un "thermosignal" ou réponse thermique individuelle : celle-ci est amplifiée dans une unité de traitement et ensuite convertie en points lumineux sur un écran.

Généralement, l'intensité lumineuse délivrée sur l'écran est en corrélation avec l'intensité des rayonnements infrarouges captés : la visualisation d'une scène thermique est donc réalisée par transcription des rayonnements électromagnétiques suivant une échelle de gris ou de couleurs dont les intensités lumineuses varient de manière proportionnelle avec les intensités du rayonnement infrarouge.

➤ L'environnement

Le réglage d'une caméra infrarouge pour un certain domaine spectrale s'avère nécessaire en raison de la transmissivité spécifique du parcours effectué par les radiations, c'est-à-dire de l'environnement.

Certains composants de l'atmosphère, comme la vapeur d'eau et le gaz carbonique, absorbent les radiations infrarouges à une certaines longueurs d'ondes et provoquent des pertes de transmission. De nos jours, les fabricants ont pratiquement tous équipé leurs appareils de mesure par infrarouge de filtre de correction atmosphérique. L'utilisateur ne doit donc plus craindre les éventuelles pertes de transmission.

Il faut également tenir compte des sources de rayonnements thermiques situés à proximité de la cible, mais également les poussières, les fumées et les particules en suspension qui peuvent encrasser l'optique et ainsi fausser les mesures.

➤ **Type d'Applications**

1) Maintenance et prévention

La maintenance et la prévention bénéficient depuis longtemps de l'emploi des caméras Thermiques ; mais la croissance des applications a été propulsée par l'arrivée des caméras portables à matrice, petits systèmes intégrés à l'ergonomie souvent attractive. Leurs qualités instrumentales sont assez délimitées mais restent suffisantes pour ces applications.

Les gains financiers générés par la thermographie sont très importants, voire inestimables, quand une seule intervention de quelques heures évite des incendies, des arrêts de production ou des bris de machines.

L'avantage décisif de la thermographie en maintenance est de permettre l'estimation de la qualité d'un équipement ou d'une installation en exploitation normale, sans arrêt des machines et bien avant la défaillance effective.

On distingue l'inspection et la surveillance (bien que ce terme porte désormais à confusion avec l'imagerie thermique). Cette inspection est exécutée périodiquement par un opérateur qui intervient sur le site avec un matériel approprié.

La seconde est une inspection permanente destinée à éviter les conséquences d'événements aléatoires pouvant se produire à tout instant. L'appareil de mesure est alors installé à poste fixe et équipé d'une électronique de seuillage et d'alarme.

2) Maintenance électrique

La maintenance électrique est actuellement la plus importante application de la Thermographie en maintenance.

L'inspection va du centre de production d'énergie électrique jusqu'au moindre tableau de distribution dans les étages d'un immeuble d'administration. On inspecte les transformateurs, les têtes de disjoncteurs, les sectionneurs, les raccords et cosses de toutes natures, les

contacteurs, les portes fusibles...

3) Maintenance mécanique

Dès qu'il y a échauffement par un frottement devenu anormal (usure, manque de lubrification, déformation dynamique des pièces mécaniques...), la camera thermique peut dénoncer les points défectueux : paliers de moteurs, roulements à billes, courroies (défauts d'alignement de poulies), chaînes, accouplements.

➤ Cas d'application

Détection de défauts électriques :

- Défaut de serrage, de sertissage de connexions
- Câbles sous dimensionnés.
- Composants électriques défectueux (fusibles, relais,, transformateurs, accumulateurs...).
- Déséquilibre de phase.

Détection de défauts mécaniques

Echauffement de paliers, de roulements dus à un problème de graissage, d'alignement, d'équilibrage.

Conclusion

Les mesures de température par thermographie infrarouge demandent une grande maîtrise de la physique des rayonnements infrarouges, l'imagerie infrarouge est une technique très performante pour la surveillance thermique des machines ou des points chauds dans des installations électriques.

Chapitre IV
Application de l'analyse
thermique

IV.1 Introduction

La thermographie infrarouge permet de déterminer la température sans contact avec l'objet, est mesurer les températures très élevées (supérieure à 1500 °C), à grande distance aussi. Donc c'est une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques

Alors dans ce chapitre nous réalisons des applications par l'analyse des images thermiques et à l'aide de ces applications on peut déterminer l'état de ces équipements contrôlés.

IV.2 Matériel utilisé

IV.2.1 Camera AGEMA 570 : C'est une caméra vraiment portable, très légère, qui fonctionne plus d'une heure et demie avec la batterie interne. Elle fournit en temps réel une image couleur de résolution élevée soit dans le viseur intégré soit sur un moniteur externe.



Figure IV.1 Camera AGEMA 570

IV.2.2 Logiciel IRWIN OLE : c'est qui permet de traiter images thermiques infrarouges, il permet aussi de faire le calcul de la température à chaque point de l'image captée et de faire la représentation des profils.

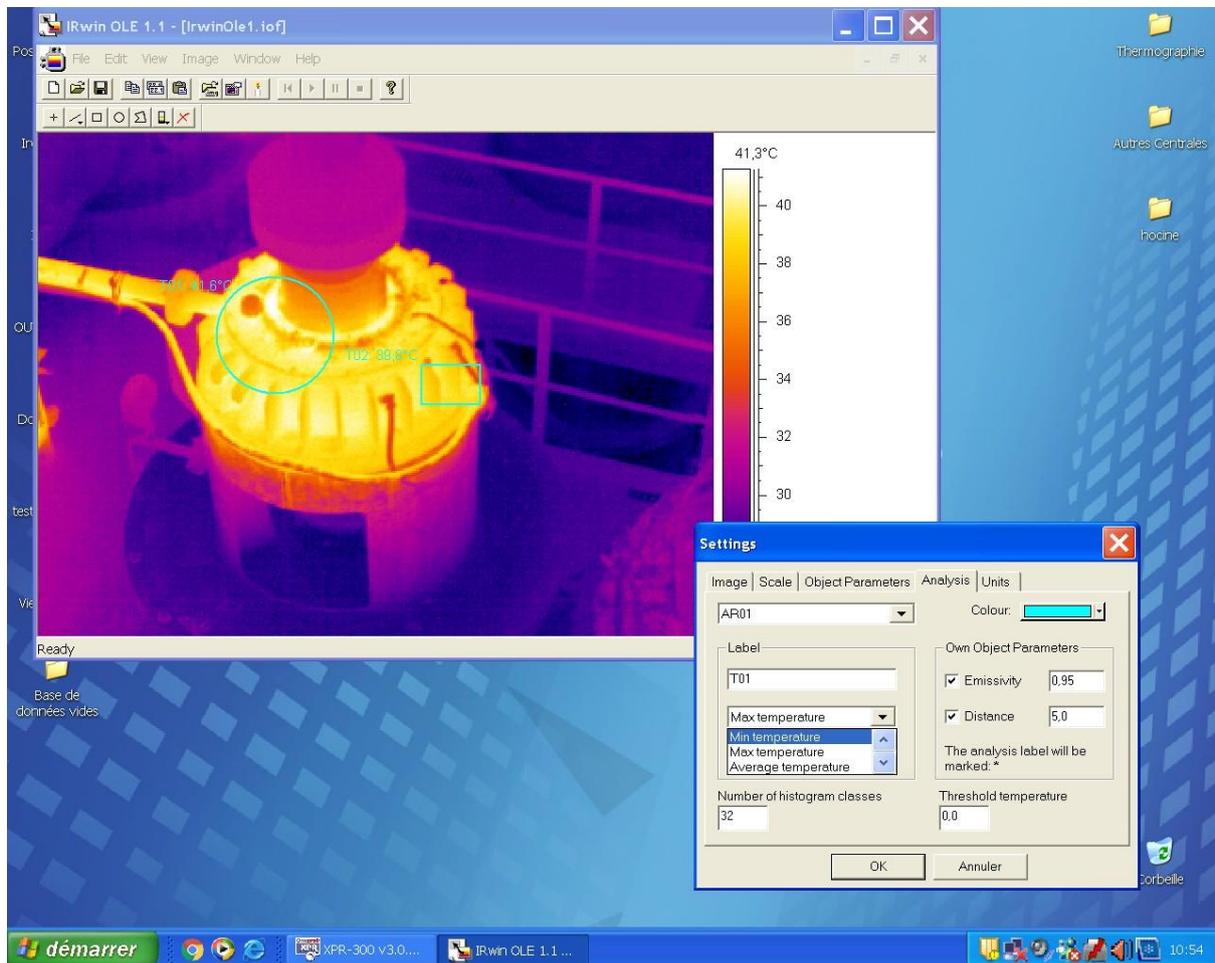


Figure IV.2 Logiciel IRWIN OLE

IV.2.3 Caractéristiques de logiciel

Tableau IV.1 Caractéristiques du logiciel [15]

Plage de mesure de température du sujet	-20 °C à 500 °C jusqu'à 1500 °C avec l'obtention de température élevée
Précision de mesure	± 2 % de plage ou ± 2 %
Sensibilité thermique	≤ 0.15 °C
Lecteur de carte pc	Carte pc type II ou type III. Carte PLASH ou disques

IV.3 La première application sur la porte visible d'une chaudière

On appliqué l'analyse thermographie infrarouge sur une porte visible avant et après l'intervention.

Avant l'intervention

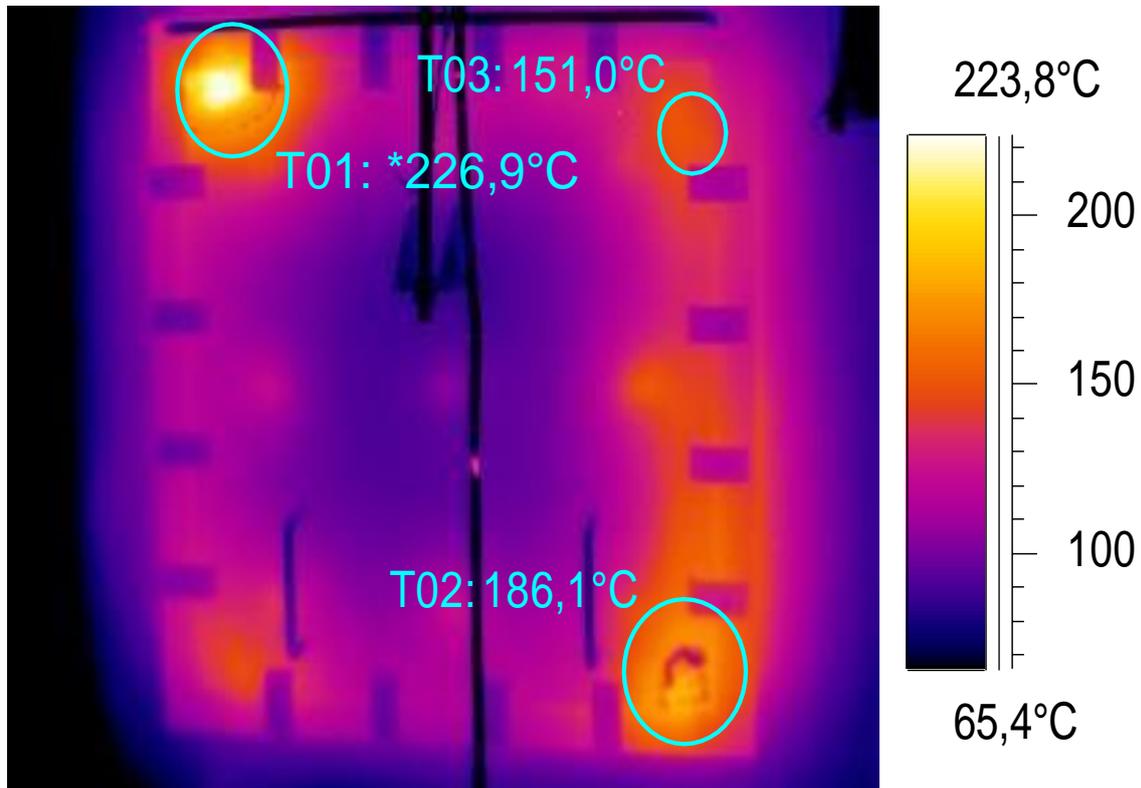


Figure IV.3 Porte visible avant l'intervention

Tableau IV.2 Température avant intervention

T 01	T 02	T 03
226.9°	186.1°	151°

Constat

- On a remarquer que le dégagement de chaleur est très élevée .
- L'inspection de la porte ciment réfractaire fissurée et laine de verre et laine de roche endommagée

Après l'intervention

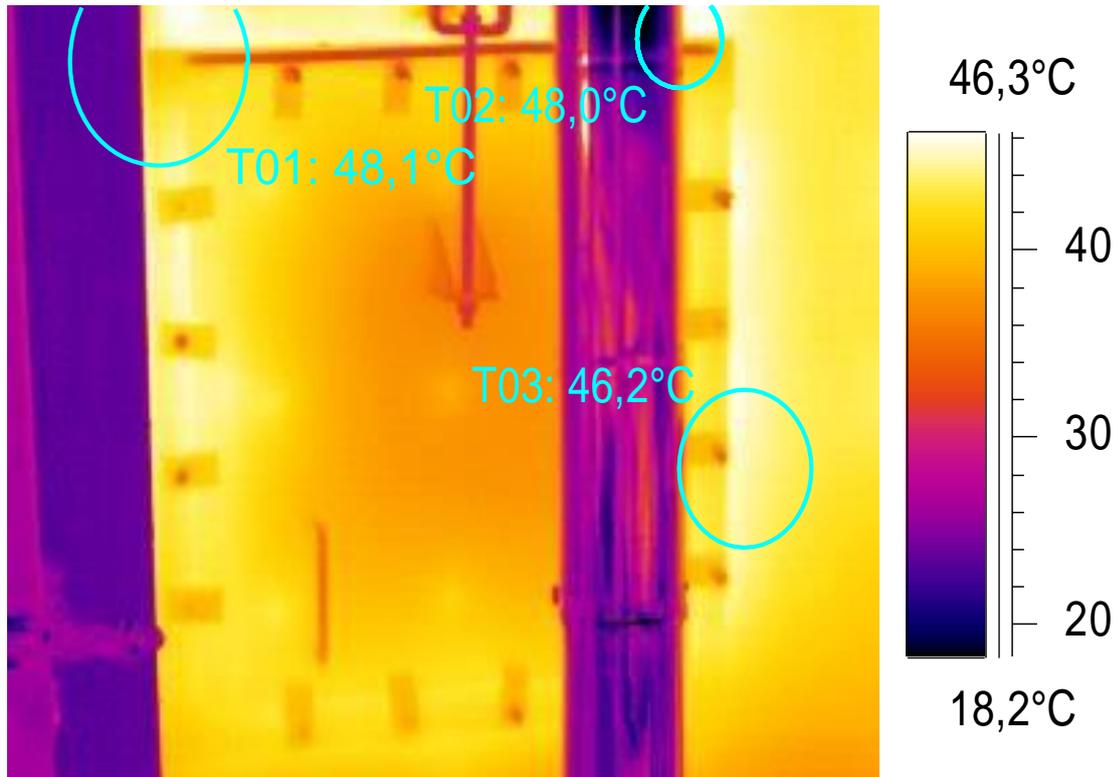


Figure IV.4 Porte visible après l'intervention

Tableau IV.3 Température après intervention

T01	T02	T03
48.1°	48°	46.2°

Constat

- Réfection de ciment réfractaire.
- Changement de laine de verre et laine de roche.

Résultat

Pas de dégagement de chaleur important et les résultats obtenir sont dans les normes.

Donc jugée acceptable et ne présente pas de risque.

IV.4 La deuxième application sur les isolateurs de transformateur principale

Dans cette application on a un cas sans défaut, où nous avons fait une analyse préventive au niveau de transformateur tranche 50 le mois de mars 2021.

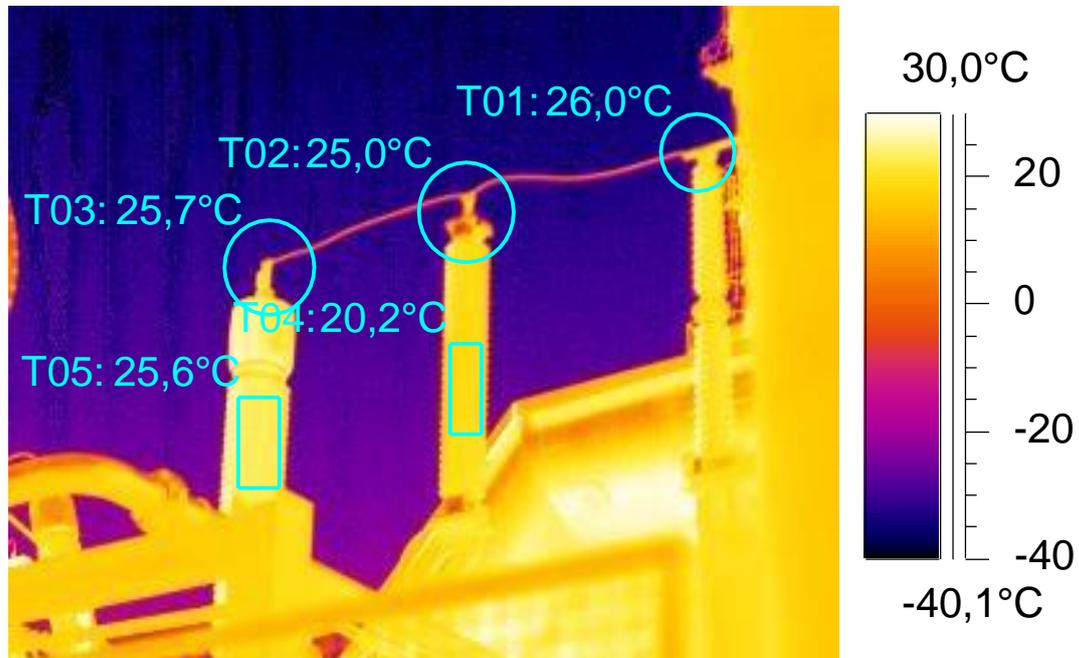


Figure IV.5 Vue de sud



Figure IV.6 Vue d'ouest

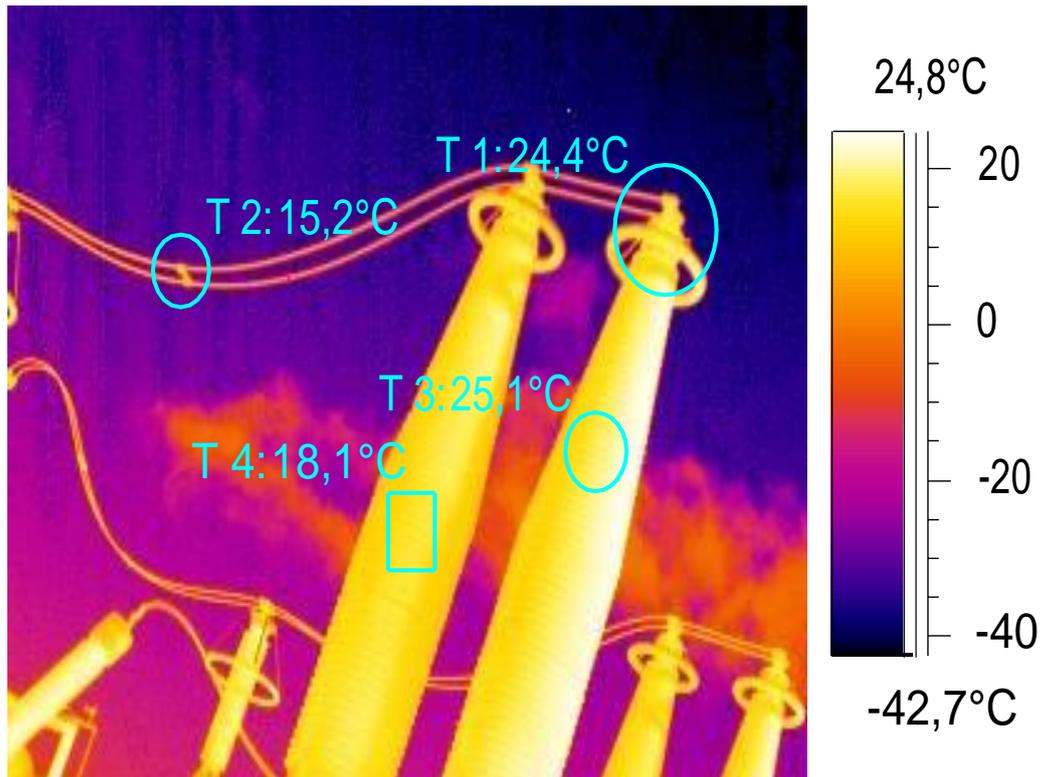


Figure IV.7 Vue de lest

Tableau IV.4 Les températures TP dans les trois vue

Vue de sud					Vue d'ouest					Vue de lest			
T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4	T5	T1	T2	T3	T4
26°	25°	25.7°	20.2°	25.6°	15.5°	23.7°	21.9°	21.6°	25°	24.4°	15.2°	25.1°	18.1

Diagnostic :

Suite à l'analyse des trois images thermographe prise de différent position, les mesure prise sont dans les normes et jugée acceptable donc l'équipement se trouve dans un bon état.

IV.5 La troisième application sur les vannes

On appliqué aussi cette méthode sur une vanne, et nous avons obtenu des résultats avant et après l'intervention comme suit :

Avant l'intervention

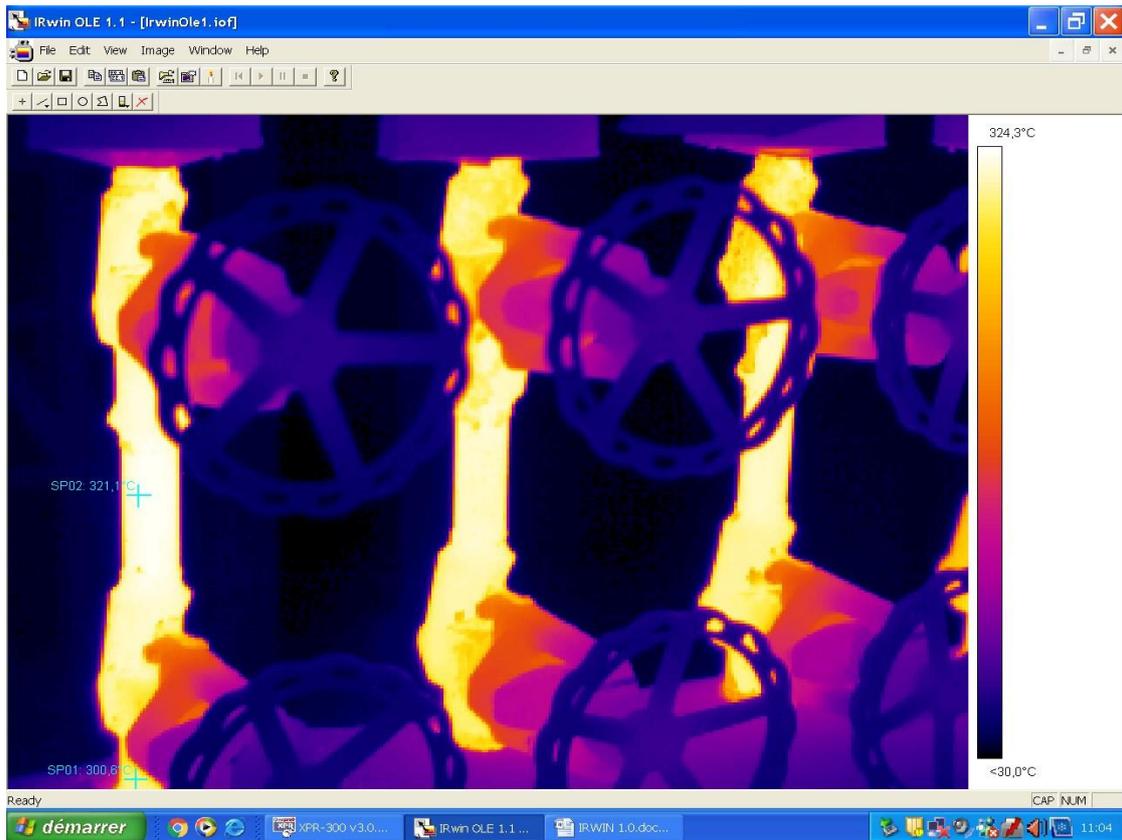


Figure IV.8 La vanne avant l'intervention

Tableau IV.5 Les températures obtenir avant l'intervention

Point de mesure	Température
En amont de la vanne	300.6°
En avant de la vanne	321.1°

Constat

On constat qu'il n'y a pas un grand écart de température en amont et en avant de la vanne, donc la vanne est passante.

Il nécessite une réparation ou bien un remplacement de ladite vanne.

Après l'intervention

On a remplacé cette vanne passante avec une autre vanne.

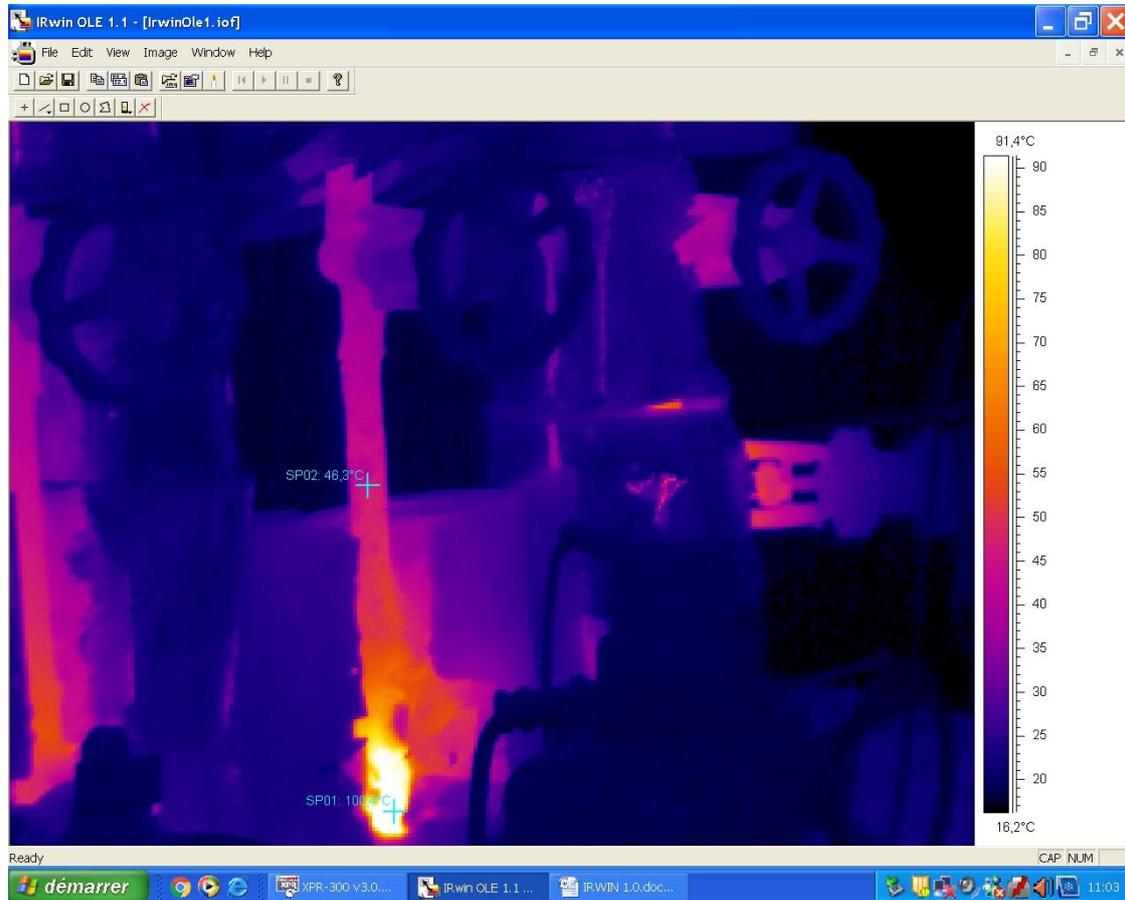


Figure IV.9 La vanne âpres l'intervention

Tableau IV.6 Les températures obtenir âpres l'intervention

Point de mesure	Température
En amont de la vanne	100.4
En avant de la vanne	46.3

Constat

Il y a un écart de température très important en amont et en aval de la vanne si qu'implique que la vanne est bonne.

Conclusion

Ce travail permet de faire une analyse directe sur une scène thermique et d'après ces applications nous avons donné l'état de santé de ces équipements, et nous sommes intervenus dans la première et la troisième application car les températures de ces équipements sont très élevées, donc cette analyse est très efficace pour la détection des pannes ou anomalies.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire et à partir du stage pratique qui nous avons fait à la centrale thermique de Ras-djinet on a compris le fonctionnement des différents mécanismes et machine tournante dans l'usine, et nous a permis d'acquérir et approfondir nos connaissances théoriques à l'effet de les maitres en pratique. D'autre part on a traité un sujet d'une grande importance.

L'étude que nous avons réalisé au sein de cette centrale, nous a été très bénéfique tant en un apport supplémentaire en connaissances mais aussi sur le monde industriel et surtout sur la maintenance et surveillance des équipements existant au niveau de centrale.

Et l'augmentation de la durée de vie des ces équipements devient important dans l'investissement industriel, donc la mise en place d'un programme de maintenance permet de répondre à un tel défaut, dans la maintenance il y a des techniques d'investigation modernes très spécifiques, telles que l'analyse vibratoire, la thermographie infrarouge, l'analyse d'huile.

Dans notre stage nous avons approfondis dans la technique thermographie infrarouge et notre travail nous a permet de faire une analyse direct sur une scène thermique pour donner l'état de santé de l'équipement et des installations à contrôler qui a pour objet de déceler et d'anticiper les échauffements anormaux, cette technique utilise une camera infrarouge qui permettant d'obtenir des images pour relevé les zones froides et chaudes des scènes avec des couleurs.

D'âpre cette étude et ses applications, la thermographie en maintenance prédictive est un outil nécessaire pour contrôler les équipements électriques, et aussi outil principal pour contrôler d'autre équipement.

Enfin, nous espérons que ce modeste travail peut constituer une bonne plateforme pour génération futur.

*Références
Bibliographiques*

Références Bibliographiques

- [1] Basic-01_Description générale de la centrale électrique_Rev (documents interne de la centrale électrique) 2018.
- [2] Basic 12 & 13 Description générale-Turbine a gaz SGT5 4000F et ses composants (documents interne de la centrale électrique) 2018.
- [3] Basic 07 Principaux éléments électrique (documents interne de la centrale électrique) 2018.
- [4] Djemai Mohammed Amine Ait Ziane Mohamed Abdelwahid <<Etude du Système D'excitation Statique de l'alternateur 400 MW de la Centrale SKT Terga>>Projet de fin d'études Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
- [5] EDDINE, BOUMAILA AHMED DHIA. Diagnostic des défauts d'un ventilateur M14A par analyse vibratoire au niveau de l'unité SIDER TSS. ANNABA : UNIVERSITE BADJI MOKHTAR DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, 2017/2018.
- [6]. Ahmed, LAOUARI. Etude en CFD d'une turbine hydraulique. Boumerdes : Université M'hamed Bougara, 2010/2011
- [7]. DJEBILI, Omar. Contribution à la maintenance prédictive par analyse vibratoire des composants mécaniques tournants. Application aux butées à billes soumises à la fatigue de contact de roulement. Boumerdes : UNIVERSITE DE REIMS CHAMPAGNE ARDENNE, 2013
- [8] SACI, Tahar BELKHIR & Med Mohcen BEN. La maintenance des équipements par l'analyse vibratoire. OURGLA : UNIVERSITE KASDI MARBAH DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE, 2015 / 2016.
- [9] Zohra, Laallam Fatima. Modélisation et gestion de la maintenance dans les systèmes de production. ANNABA : UNIVERSITE BADJI MOKHTAR Département Informatique, 2007.
- [10] Jean Héng : PRATIQUE DE LA MAINTENANCE PREVENTIVE –Mécanique-Pneumatique-Hydraulique-Electrique-FroideÉditionAFNOR2002DUNOD
- [11] <http://tpmattitude.fr/maintcond.html>
- [12] Au geix D Technique de l'ingénieur (traité génie mécanique – analyse vibratoire.
- [13] Document realise par : Jacky DUMAS (01db-STELL)
-

Références Bibliographiques

Groupe MVI technologies Version Février2001.

[14] SONATRACH Manuel de cours Niveau I–Publ. No1560093_C-Rev.0.9E–

[15] Gilbert Gauss orgues « La thermographie infrarouge » 4ème édition Paris Tec&Doc 1999

[16] J.Crabol «Transfert de chaleur» tome1-lesprincipes.



Annexes

Annexe 1

Matériau	Conductivité (W/m*k)
Cuivre	401
Aluminium	237
Acier	52
Glace pure	2.04
Brique	1
Verre (vitre)	0.9
Eau	0.6
Bois	0.14
Fibre de verre	0.04
Air (immobile)	0.025
Argon	0.018
Xénon	0.0051

Tableau. Valeur de conductivité pour différent matériau

Annexe 2

Type d'Applications de la thermographie infrarouge :

- 1 Electrotechnique et électronique.
 - 2 Matériaux et mécanique du solide.
 - 3 Thermique.
 - 4 Industrie automobile et des transports.
 - 5 Métallurgie, traitements thermiques, soudage.
 - 6 Industrie du verre.
 - 7 Électroménager et industries agroalimentaires
 - 8 Papier, textile et plastique
 - 9 Médical et pharmaceutique
 - 10 Maintenance et prévention
 - 11 Maintenance électrique
 - 12 Maintenance mécanique.
 - 13 Pétrochimie.
-

Annexe 3

Les types des caméras infrarouges :

Aujourd'hui toutes les caméras thermographiques sont des caméras matricielles et elles utilisent toutes un détecteur micro bolomètre au même titre que tous les PC utilisent un processeur Pentium. Néanmoins, sur le marché de la thermographie infrarouge, toutes les caméras n'utilisent pas le même détecteur et certains constructeurs vont même jusqu'à demander une fabrication spécifique de détecteurs micro bolomètres selon leur propre cahier des charges. Le détecteur est le principal responsable des caractéristiques techniques de la caméra en terme de sensibilité thermique et de qualité d'image. Chaque fabricant de caméra thermographique propose par ailleurs des logiciels spécifiques pour l'édition de rapports.



Caméra AR-40



Camera FTI Mini LAND



Caméra IR-032