



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

PRESENTE PAR :

DIALLO Mamadou Moustapha

ANNEE 1994-1995

AUDIT ENERGETIQUE
D'UN
ENTREPOT FRIGORIFIQUE

Mention :

E. I. E. R.
Enregistré à l'Arrivée le 03 JUIN 1995 250/15

Encadrement

T. DJIAKO

A mes Parents...

Mes Remerciements

A **Mr T. DJIAKO**, Professeur à l'EIER, mon maître de mémoire, pour son encadrement et pour ses multiples conseils.

A **Mr SY**, Directeur de S.E.E.E Burkina, pour sa constante disponibilité.

A tous **les techniciens du Laboratoire de froid**, pour les appareils de mesure mis à ma disposition.

A tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

SOMMAIRE

PREMIERE PARTIE: SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

RESUME

INTRODUCTION

I-NOTION D'ENERGIE

II-AUDIT ENERGETIQUE: Définition, objectifs

III-TECHNIQUES D'AUDIT ENERGETIQUE

III.1-AUDIT DANS LE BATIMENT

III.1.1-Objectif

III.1.2-Méthodologie

III.1.2.1-Recueil des données de base

III.1.2.2-Relevés et mesures

III.1.2.3 Exploitation et traitement des données

III.1.2.3-Elaboration d'un programme d'intervention

III.2-AUDIT ENERGETIQUE D'UNE ENTREPRISE INDUSTRIELLE

III.2.1-Audit préliminaire

III.2.2-Audit approfondi

DEUXIEME PARTIE: AUDIT ENERGETIQUE D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

I-NECESSITE DE L'AUDIT ENERGETIQUE D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

II-DESCRIPTION D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

II.1-Typologie

II.2-Caractéristique

II.3-Equipement frigorifique des entrepôts

III-AUDIT D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

III.1-Méthodologie

III.2-Recueil des données de base

III.2.1-Données générales

III.2.2-Mode de fonctionnement

III.2.3-Données climatiques

III.2.4-Organisation de la gestion et de la maintenance

III.2.5-Consommation d'énergie et d'eau

III.3-Descriptions des installations

III.3.1-L'enveloppe

III.3.2-Installations frigorifiques

III.3.2.1-Compresseur

III.3.2.2-Condenseur

III.3.2.3-Evaporateur

III.3.2.4-Appareillage annexe du circuit

III.3.3-Installations électriques

- III.4-Exploitation et traitement des données
 - III.4.1-Etude de l'isolation
 - III.4.1.1-Etude de l'isolation des parois
 - III.4.1.2-Etude de l'isolation des tuyauteries
 - III.4.1.3-Les portes isolantes
 - III.4.2-Etude de l'entreposage
 - III.4.3-Etude des installations frigorifiques
 - III.4.3.1-Dimensionnement des installations frigorifiques
 - III.4.3.2-Etude de l'installation existante
 - a-Etude du compresseur
 - b-Etude de l'évaporateur
 - c-Etude du condenseur
 - c.1-Condenseur à air
 - c.2-Condenseur à eau
 - c.3-Tour de refroidissement
 - d-Etude de la tuyauterie
 - III.4.4-Etude des installations électriques
 - III.4.5-Etude des conditions de sécurité
 - III.4.6-Organisation de la gestion et de la maintenance
- III.5-ELABORATION D'UN PROGRAMME D'INTERVENTION
 - III.5.1-Isolation
 - III.5.2-Condition d'entreposage
 - III.5.3-Installations frigorifiques
 - III.5.3.1-Evaporateur
 - III.5.3.2-Condenseur
 - III.5.3.3-Compresseur
 - III.5.4-Installations électriques
 - III.5.5-Gestion et maintenance des installations

TROISIEME PARTIE: ETUDE DE CAS

Introduction

I-RECUEIL DE DONNEES

- I.1-Etats des lieux
- I.2-Description de l'enveloppe
- I.3-Description de l'équipement frigorifique
 - I.3.1-Goupes moto-compresseurs
 - I.3.2-Evaporateur
 - I.3.3-Appareils annexeS du circuit
 - I.3.4-Tuyauterie
 - I.3.5-Installation électriques

II-EXPLOITATION ET TRAITEMENT DES DONNEES

II.1-Situation générale des installations

II.2-Diagnostic des installations

II.2.1-Isolation

II.2.2-Conditions d'entreposage

II.2.3-Dimensionnement des installations

II.2.4-Analyse du fonctionnement des compresseurs 1 et 2

II.2.5-analyse du fonctionnement des évaporateurs

II.2.6-Analyse du fonctionnement des condenseurs

II.2.7-Analyse du fonctionnement de l'appareillage annexe

II.2.8 Dimensionnement des tuyauteries

II.2.9 Installations électriques

II.2.10 Sécurité

II.2.11 Gestion et maintenance

III-RESULTATS DE L'AUDIT

III.1 Isolation

III.2 Conditions d'entreposage

III.3 Fonctionnement des installations

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES

RESUME

L'audit énergétique d'un entrepôt frigorifique se divise en trois étapes: audit préliminaire, audit approfondi et un programme d'actions.

L'audit préliminaire est axé sur une visite des installations pendant quelques jours. Il a pour but de recueillir les données relatives au fonctionnement, à la gestion et à la maintenance des installations. Il s'agit également dans cette partie de décrire les locaux, les installations électriques et frigorifiques. C'est une étape fondamentale dans le processus d'audit énergétique. L'objectif visé est la mise en évidence de l'état des installations, des paramètres de fonctionnement et des conditions d'exploitation. A ce niveau l'auditeur est en mesure d'évaluer la capacité de l'entreprise à gérer l'énergie. Ceci devra permettre de faire une estimation de l'ordre de grandeur du potentiel d'économie envisageable.

L'audit approfondi permet d'aborder l'aspect énergétique proprement dit, la problématique des procédés d'isolation, d'exploitation de l'installation frigorifique et de conservation des denrées. Il a pour objet de calculer pour chaque composante de l'installation, le rendement énergétique, de faire ressortir par l'intermédiaire d'un bilan énergétique et par le calcul de ratios le niveau de performance de l'installation.

Il s'agit ensuite de décrire les mesures d'économie d'énergie ainsi que leur impact sur le plan économique et social. L'accent est mis sur les mesures à coût nul ou à coût faible dont la période de retour est inférieure à trois années. Ces mesures sont proposées dans le cadre d'un rapport de synthèse devant permettre au maître d'ouvrage de faire un choix cohérent de travaux dans les meilleures conditions de coût et de rentabilité. Pour chaque mesure envisagée il s'agira de calculer l'investissement requis, le temps de retour induit et l'économie attendue.

L'étude de cas concerne un entrepôt frigorifique de moyenne envergure situé dans la zone résidentielle du Bois. Il est constitué de deux chambres froides à température positive équipées de groupes individuels fonctionnant au R12. L'installation frigorifique est essentiellement du matériel de récupération importé d'Allemagne pour les compresseurs et venant de la Côte d'Ivoire pour les évaporateurs. L'appareillage annexe (détendeur, voyant liquide, filtre-déshydrateur) est constitué d'éléments normalement destinés à un circuit fonctionnant au R22.

L'isolation d'une manière générale a été bien menée, mis à part, au niveau des portes d'accès où il a été constaté une forte déperdition de froid. Les conditions d'entreposage sont relativement bonnes à l'exception de la densité d'entreposage élevée, du renouvellement d'air drastiquement limité pour des raisons d'économie d'énergie et des risques d'assèchement des produits liés à un brassage d'air élevé. La puissance de l'une des compresseurs est faible par rapport au besoin de froid et entraîne des cycles de fonctionnement longs. Les groupes moto-compresseurs sont installés sous un abri vétuste recouvert d'un toit métallique qui contribue en période de chaleur à réchauffer l'air ambiant affectant ainsi l'efficacité des condenseurs.

L'étude de la facturation montre que les installations souffrent d'un mauvais cos ϕ et qu'il est nécessaire d'installer une batterie de condensateurs de puissance réactive minimale égale à 7KVar.

Enfin, les mesures d'économie d'énergie proposées dans ce document donnent des solutions aux différents problèmes évoqués ci-dessus.

PREMIERE PARTIE

SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION

Le renchérissement du coût de l'énergie a obligé les entreprises industrielles des pays en voie de développement à mettre en oeuvre des programmes de gestion de l'énergie. L'utilisation rationnelle de l'énergie est donc devenue une préoccupation majeure pour bon nombre d'industriels de gouvernements, d'Agences d'aide des pays du Nord et des Institutions financières internationales.

La gestion de l'énergie commence naturellement par un audit énergétique qui permet d'une part de quantifier le coût de l'énergie et d'autre part de faire ressortir l'intérêt de la réduction des coûts énergétiques dans la vie de l'entreprise. En conséquence, l'audit apparaît donc comme un ensemble de mesures techniques et économiques à mettre en oeuvre dans un effort de maîtrise des coûts de l'énergie.

Notre étude sur les économies d'énergie portera sur les entrepôts frigorifiques qui sont essentiellement destinés au stockage de denrées alimentaires périssables. Cela suppose un maintien continu de la chaîne de froid d'où une consommation d'énergie relativement importante.

Après la synthèse bibliographique des différentes méthodes d'audit énergétique dans le bâtiment et dans le secteur industriel en général, nous nous proposons de définir une méthodologie d'audit adaptée à un entrepôt frigorifique. Cette méthodologie va se différencier en deux phases. La première phase permet de recueillir les données nécessaires à l'audit. La seconde consiste à traiter les données acquises. Il s'agit dans la troisième phase de proposer un programme d'intervention hiérarchisant les priorités et les actions à entreprendre afin de réduire les consommations énergétiques.

Enfin l'étude de cas, qui concerne un petit entrepôt frigorifique de la place, nous permettra d'appliquer la méthodologie que nous avons développée

I-NOTION D'ENERGIE

Un système possède de l'énergie lorsqu'il peut produire du travail. Par exemple, un courant d'eau traversant une turbine peut produire du travail; le courant électrique peut produire du travail dans un moteur. L'énergie rend des services à l'activité humaine grâce à son existence sous différentes formes qui permettent chacune des utilisations différentes. Aussi peut-on distinguer l'énergie calorifique (chaleur), l'énergie mécanique fournie par les moteurs, l'énergie électrique, l'énergie chimique ou nucléaire, etc.

Ces différentes formes d'énergie peuvent se classer suivant le niveau et la nature des transformations subies:

-L'énergie primaire disponible dans l'environnement physique: énergie hydraulique, éolienne, énergie fossile etc.

-L'énergie intermédiaire qui a déjà subi plusieurs transformations: combustibles, carburant, électricité...

-L'énergie utile désirée par le consommateur (lumière, chaleur, travail mécanique..). Elle est obtenue par transformation de l'énergie intermédiaire des appareils tels que les lampes électriques , les chauffe-eau , les chaudières. Toutes ces transformations d'énergie s'opèrent à travers des équipements ou procédés énergétiques.

II-AUDIT ENERGETIQUE: Définition, objectifs

La plupart des pays du tiers-monde sont démunis de ressources énergétiques suffisantes pour leurs besoins. Ils sont donc sensibles à la hausse des prix des produits pétroliers dont ils sont très dépendants. Cette situation a entraîné un déséquilibre dans la balance des paiements et a contribué à accroître l'endettement extérieur. Ainsi pour faire face à cette situation, ces pays, en particulier les pays importateurs de pétrole, ont mis en oeuvre des programmes d'économie d'énergie dans tous les secteurs de l'activité économique. C'est ainsi, de nombreuses missions ont été diligentées afin de proposer des mesures allant dans le sens de la réduction du coût de l'énergie dans les entreprises. Le secteur privé n'est pas en reste puisque certains chefs d'entreprises ont également mis en oeuvre des programmes à l'échelle de leur établissement destinés à réduire les factures d'électricité afin d'améliorer la compétitivité de leur produit.

L'audit est la première phase d'un programme d'économie d'énergie. Il permet d'identifier les mesures technique et économiques à mettre en oeuvre dans un effort de maîtrise de l'énergie.

Les audits ont également pour objectif de contribuer à la sensibilisation du personnel de l'établissement concerné à l'utilisation rationnelle de l'énergie. Il est donc souhaitable d'impliquer le personnel le plus possible dans la collecte des informations de façon à le préparer aux opérations de suivi ou de modifications qui seront éventuellement proposées.

III-TECHNIQUES D'AUDIT ENERGETIQUE

Différentes méthodes de diagnostic énergétique des bâtiments ont été développées dans les pays industrialisés et dans certains pays africains. Ces méthodes dépendent généralement du type particulier d'habitat et de climat. Nous présenterons dans ce qui suit la démarche généralement adoptée. En ce qui concerne le secteur industriel il n'existe pas, en raison, sans doute, de sa diversité, une méthodologie universelle mais un ensemble de démarches qui devra nécessairement être adapté à chaque cas précis.

III.1-AUDIT DANS LE BATIMENT

III.1.1-Objectif

L'audit dans le bâtiment a deux objectifs: assurer de bonnes conditions de confort aux occupants tout en limitant, autant, faire se peut, la consommation d'énergie liée à ce confort.

III.1.2-Méthodologie

La première étape est un examen approfondi du bâtiment et de ses paramètres de fonctionnement: état du bâti et des installations, conditions d'exploitation, consommation et équipements particuliers. Cet examen permettra de déterminer par calcul, par mesure ou à défaut par estimation, l'ensemble des paramètres de son état actuel.

La seconde étape est l'exploitation et le traitement des données acquises. Il s'agit surtout, à travers les observations, les mesures et les calculs qui en résultent, de décrire les améliorations à envisager en indiquant pour chaque intervention l'investissement nécessaire, le temps de retour et l'économie induite.

La troisième étape d'un audit dans le bâtiment est constitué par l'élaboration d'un programme d'intervention cohérent indiquant la priorité des actions à mener.

III.1.2.1-Recueil des données de base

Avant toute opération d'audit, l'auditeur doit réunir un certain nombre de données ou documents caractérisant le bâtiment et ses installations. Il s'agit:

- des plans du bâtiment: plan de masse, plan de structure indiquant l'environnement et l'orientation du bâtiment ou tout autre document d'architecture susceptible de faire ressortir au mieux toutes ses spécificités.
- descriptif de la structure indiquant la nature et état de l'étanchéité, des ouvertures, etc.
- descriptif de la nature des parois indiquant les matériaux et leurs épaisseurs
- factures d'électricité et de combustible relevées sur plusieurs années.
- caractéristiques du site, données climatiques (température, humidité, ensoleillement, vent...)

- fiche technique des installations thermiques: type, caractéristiques des installations de conditionnement d'air (climatisation, chauffage).

- descriptif des équipements particuliers, cuisine, buanderie, salle d'ordinateurs, patinoire, piscine, etc.

- usages spécifiques de l'électricité: type, caractéristiques et états de l'éclairage, des pompes, des moteurs, des ascenseurs.

L'entretien avec les responsables de la gestion et de la maintenance du bâtiment est primordial pour la bonne marche de l'audit notamment pour la connaissance de l'historique du fonctionnement des installations. Cet entretien permet également à l'auditeur de recueillir un certain nombre de renseignements tels que:

- le taux et la durée d'occupation des locaux.

- durée de fonctionnement des installations de climatisation, d'éclairage, des ascenseurs, etc.

- mode d'exploitation des installations de conditionnement d'air: suivi, entretien, périodicité de la maintenance.

III.1.2.2-Relevés et mesures

Les relevés et mesures dans le bâtiment et ses installations permettent de compléter au besoin les données descriptives, de vérifier les conditions de fonctionnement des équipements. L'exploitation de ces mesures favorise l'établissement d'un bilan thermique sur chaque poste de consommation énergétique. Différentes mesures peuvent être effectuées en fonction du niveau d'équipement du bâtiment. Nous présenterons dans ce qui suit les principales mesures et les relevés couramment effectués lors des procédures d'audit dans le bâtiment. Il appartient cependant à chaque auditeur en fonction de son expérience et des caractéristiques du site, d'établir un protocole de mesures susceptible de faire ressortir au mieux les caractéristiques du bâtiment et de ses installations.

Eclairage

- relevé des types d'équipement lumineux(lampe ,luminaire, ballast..)

- mesure des niveaux d'éclairement

- relevé des conditions d'exploitation (hauteur des luminaires, couleur des murs..).

- caractéristiques des dispositifs de commande (commande par pièces, commande par zone, horloge).

Conditionnement d'air

- mesure des températures et humidités intérieures et extérieures.

- mesure des taux de renouvellement d'air.

- vérification de l'étanchéité des locaux climatisés (perméabilité des menuiseries, des joints entre panneaux, des portes donnant sur l'extérieur).

- mesure des températures de l'air neuf, air rejeté, air repris.

- examen des batteries de chauffage et de refroidissement.

- vérification des conditions de fonctionnement des ventilateurs de soufflage et de reprise.
- vérification de l'état des filtres (type, perte de charge), des laveurs d'air
- examen de la machine frigorifique (caractéristiques, constructeur, type de fluide frigorigène).
- mesure des températures et pressions aux condenseurs et évaporateurs.
- mesure des température "entrée et sortie" eau ou air si le condenseur est à eau ou à air.
- étude du circuit de refroidissement.
 - caractéristiques de la tour.
 - emplacement.
 - consommation d'eau.
 - mesure des températures d'entrée et de sortie d'eau de la tour.

Installations électriques

- relevé des postes de comptage: type, calibrage.
- examen des postes de transformation: nombre, type, puissance installée, puissance appelée, pertes théoriques pertes facturées..
- examen des batteries de condensateurs.
- étude des moteurs: type caractéristiques, puissance absorbée, rendement.
- mesure du facteur de puissance.

III.1.2.3 Exploitation et traitement des données

Les relevés, les mesures et les anomalies observées sur le site permettent de procéder à une analyse critique sur les points suivants:

- analyse des conditions d'utilisation et d'exploitation
- analyse de la qualité du bâti. Elle doit mettre en évidence les qualités thermiques du bâtiment.
- appréciation du taux de renouvellement d'air (trop ou peu abondant).
- analyse de la qualité des installations de conditionnement d'air. Elle doit montrer les points sensibles concernant tout ou partie des installations.
- étude du système d'éclairage. Il s'agit de calculer la densité de puissance électrique et de la comparer avec les valeurs habituellement admises.
- calcul des batteries de condensateurs

III.1.2.3-Elaboration d'un programme d'intervention

L'exploitation des relevés, mesures et calculs permettent de dresser une liste des mesures d'économie d'énergie. Ces mesures sont classées par ordre de priorité en mettant en premier lieu celles à coût nul ou faible.

Les mesures à coût nul ou faible

- optimisation des contrats de fournitures d'électricité.

- amélioration du cos ϕ .
- modification des horaires de fonctionnement.
- réduction du nombres de lampes.
- extinction des lumières lorsque l'éclairage naturel est suffisant.

Cette liste n'est par exhaustive . On pourra se reporter utilement à la bibliographie annexée à la fin du document.

Mesures avec investissement

Les mesures avec investissement concernent les modifications plus ou moins importantes des structures des installations ou des équipements. La priorité est accordée aux mesures présentant la meilleure rentabilité et fournissant le plus gros impact sur le bilan énergétique du bâtiment. Le choix des investissement dépend des critères suivants:

- temps de retour. .
- économie financière globale.
- confort, sécurité, amélioration de la productivité.
- augmentation du coût de la maintenance.

Une fois les priorités définies, l'auditeur rédige à l'intention du maître d'ouvrage un rapport pour chaque projet d'investissement. Ce rapport comporte les éléments suivants:

- description des interventions à mettre en oeuvre.
- détermination de l'enveloppe financière.
- analyse économique (investissement, temps de retour, économie induite).
- calendrier de réalisation des interventions.

III.2-AUDIT ENERGETIQUE D'UNE ENTREPRISE INDUSTRIELLE

Le secteur industriel est un gros consommateur d'énergie . La compétitivité de certaines branches est particulièrement sensible au coût de l'énergie. La maîtrise de l'énergie dans l'industrie peut se traduire par des interventions très diverses qui dépendent de la nature même de l'activité de production, des procédés employés et du coût des différentes sources d'énergie utilisées.

L'audit dans l'industrie peût être également décomposé en deux parties: *l'audit préliminaire et l'audit approfondi* suivis éventuellement d'études de faisabilité particulières.

III.2.1-Audit préliminaire

Au cours de cette phase l'auditeur se préoccupe de recueillir des données relatives à la consommation et à la production telles que:

- découpage de l'entreprise par secteur de production.
- recensement des machines et de leurs caractéristiques.
- shémas des circuits matières, des fluides caloporteurs, des combustibles.
- recensement des appareils de comptage de l'énergie

A la fin de l'audit préliminaire, l'auditeur établit un prédiagnostic évaluant la capacité de l'entreprise à gérer l'énergie et estimant l'ordre de grandeur du potentiel d'économie envisageable.

III.2.2-Audit approfondi

Il aborde le volet énergétique en analysant les procédés de fabrication, les méthodes de production et d'organisation de l'entreprise. Pour chaque secteur de production, Il établit le bilan matière, le bilan énergétique, les ratios de consommation et propose à l'industriel un programme d'actions. Pour chaque étape de ce programme, l'auditeur indique l'investissement nécessaire, l'économie d'énergie attendue et le temps de retour de l'investissement.

L'audit approfondi est parfois suivi d'une étude de faisabilité pour les mesures d'économie d'énergie complexe à réaliser.

DEUXIEME PARTIE

**AUDIT ENERGETIQUE D'UN ENTREPOT
FRIGORIFIQUE**

I-NECESSITE DE L'AUDIT ENERGETIQUE D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

Si l'on examine avec attention les différents postes du bilan thermique d'une chambre froide, on peut se rendre compte que le calcul de dimensionnement n'est pas tout à fait précis. En effet, une chambre froide est dimensionnée pour une quantité de produits déterminée, et elle doit assurer le refroidissement de ces produits selon des conditions déterminées. Cependant au cours de son exploitation, la nature et les quantités de produits introduits dans la chambre froide sont susceptibles de varier. Par conséquent la production frigorifique nécessaire pour assurer leur refroidissement varie également. Par ailleurs, l'apport thermique dû au travail du personnel dans les chambres froides a été fixé à l'origine à une certaine valeur. Mais il reste certain que cette valeur ne peut être constante et subira quelques variations liées à l'exploitation de la chambre froide. D'un autre côté on peut évoquer l'aspect imprécis du taux de renouvellement d'air, qui du reste, demeure l'un des postes importants de déperdition calorifique.

Le but de l'isolation thermique est de réduire la transmission de chaleur vers la chambre froide à une valeur pratique et économique. Les matériaux utilisés sont nombreux et variés. Leur choix est fait à partir de leurs caractéristiques physiques, notamment de leur conductivité thermique. Cependant celle-ci est largement variable en fonction de la température et de l'humidité. De même, il n'est rare pour un même matériau issu de deux fabricants différents d'avoir des valeurs de conductivité thermique relativement différentes. On peut donc en déduire que le calcul de l'isolation n'est pas exempt d'erreurs ou d'imprécisions. Aussi, peut-on penser que le calcul des installations est très approximatif et peut être à l'origine de déperditions d'énergie importante. Aussi est-il nécessaire de procéder à l'audit énergétique d'un entrepôt frigorifique afin d'identifier les gisements d'économie d'énergie et de proposer des solutions visant à réduire les imperfections liées au dimensionnement des installations. L'audit énergétique est également nécessaire puisqu'il doit proposer des solutions liées à l'exploitation et à l'entretien des installations frigorifiques allant dans le sens de la réduction des coûts énergétiques.

II-DESCRIPTION D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

II.1-Typologie

Un entrepôt frigorifique est une construction destinée à maintenir pendant une période plus ou moins longue des conditions d'ambiance bien déterminées et le plus souvent très éloignées des conditions atmosphériques extérieures. On distingue:

-les *entrepôts polyvalents*. Ils permettent d'entreposer plusieurs variétés de marchandises dans des conditions variées. Ce sont en général des entrepôts publics destinés à l'entreposage de marchandises pour le compte de tiers.

-les *entrepôts d'usines*. Elles font partie de complexes industriels et permettent de stocker des matières premières et souvent dans un temps relativement court, des produits finis (abattoirs, laiteries, usines de conserves etc.)

-les *entrepôts de production* généralement intégrés à une industrie ou à un complexe agricole (station fruitière, fabrique de crème glace)

-les *entrepôts spécialisés* destinés à la conservation d'une seule catégorie de produit (entrepôt portuaire).

II.2-Caractéristiques

Le plan d'un entrepôt frigorifique à un seul niveau est relativement simple. Il comprend généralement une ou plusieurs chambres à même température ou à température différente. Des tunnels de congélation peuvent également être prévus. Il faut cependant garder à l'esprit que la conception d'une chambre froide est surtout fonction de sa destination. Par exemple, les stations fruitières et/ou légumières comprennent en général les installations suivantes:

- aire de réception des produits.
- hall de tri-calibrage-emballage
- chambres froides.
- dépôt d'emballage.

Les chambres froides sont généralement conçues en fonction du système de manutention adopté. La hauteur sous plafond est commandée par le nombre et par le type de palettes adopté.

Dans les entrepôts à un seul niveau l'ossature est souvent porteuse avec isolation à l'intérieur ou à l'extérieur. Elle peut être métallique, en bois ou en béton armé. Les sous-sol des chambres à températures négatives sont munis de protection anti-gel qui peuvent être réalisées en prévoyant un vide sous la dalle ou un réseau de chauffage dans le béton avant l'isolant. Le toit est généralement à double pente avec une très bonne étanchéité. Les murs extérieurs sont en matériaux conventionnels ou en préfabriqué. L'isolation des chambres froides est très importante. Elle peut représenter jusqu'à 30% du coût total de l'installation frigorifique. Les matériaux généralement utilisés sont la fibre ou la mousse de verre, le polystyrène, le polyuréthane. Un écran est généralement appliqué sur la face extérieure de l'isolant afin d'éviter la pénétration d'humidité.

II.3-Equipement frigorifique des entrepôts

Dans les entrepôts frigorifiques, la production de froid par détente directe du fluide frigorigène est la plus répandue. On peut distinguer:

- les installations centralisées qui utilisent le plus souvent du NH₃ comme fluide frigorigène, les compresseurs étant du type à piston ou rotatif.
- les installations décentralisées. Elles sont constituées de groupes individuels fonctionnant généralement au R12, R22 ou R502. Chaque groupe comporte un ou

plusieurs compresseurs pouvant desservir un ou plusieurs circuits. Les compresseurs sont disposés le plus près possible des évaporateurs.

Les évaporateurs des installations frigorifiques constituent la source de production de froid. Ils sont à convection naturelle ou forcée.

Les condenseurs sont quelquefois à eau ou souvent à air pour les puissances inférieures ou égales à 6 kW. Cependant, étant donné le prix actuel du m³ d'eau, il existe de plus en plus de machines frigorifiques industrielles équipées de condenseur à air.

Le bon fonctionnement du circuit frigorifique est assuré par un ensemble d'appareillage automatique d'alimentation, de régulation et de sécurité (détendeur, filtre-déshydrateur, thermostat, pressostat, vanne électromagnétique...). La salle des machines, généralement située non loin des chambres froides, abrite les compresseurs, et les transformateurs. L'alimentation électrique est souvent assurée par une ligne haute tension via un poste de transformation-distribution.

III-AUDIT D'UN ENTREPOT FRIGORIFIQUE

III.1-Méthodologie

• Recueil de données

Il s'agit de recueillir un certain nombre d'informations qui serviront au diagnostic énergétique. La collecte de ces informations se fera au sein de l'entreprise, à l'extérieure si nécessaire, à travers des séries d'entretiens de discussions et de visites. A ce stade, l'auditeur doit s'assurer la collaboration de tous le personnel de l'entrepôt. Dans le cas des entrepôts faisant partie d'une chaîne industrielle ou commerciale, l'auditeur prendra attache avec les responsables du service technique intervenant dans la gestion et la maintenance. Cependant il arrive souvent que certains entrepôts fassent appel à des services extérieurs pour faire la maintenance aussi bien préventive que curative. Il convient, dans ce cas de contacter les compétences extérieures concernées.

Les données climatiques sont recueillies au niveau de la station météorologique la plus proche. Nous indiquerons plus loin le type de données et la forme sous laquelle il conviendra de les collecter.

La documentation des constructeurs ou des fournisseurs de machines et d'équipements frigorifiques peut s'avérer nécessaire notamment pour le traitement des données et l'élaboration d'un programme d'actions. Selon la nécessité, il s'agira de prendre contact par visite ou par correspondance avec les établissements concernés. Cependant l'idéal serait de disposer, bien en amont de l'opération d'audit, d'un certain nombre de documents relatifs aux équipement frigorifiques avec indication des coûts et délais de livraison.

L'énergie électrique est généralement la source d'énergie utilisée dans les entrepôts frigorifiques. Il importe donc de connaître la société distributrice d'électricité

ainsi que son mode de tarification. Il en est de même pour l'eau lorsqu'elle est utilisée dans les tours de refroidissement.

•Description et examen des installations frigorifiques

C'est une étape fondamentale dans le processus d'audit énergétique. Il s'agit d'examiner minutieusement l'entrepôt frigorifique. L'objectif visé est la mise en évidence de l'état des installations, des paramètres de fonctionnement et des conditions d'exploitations. Ce sont là autant d'éléments qui permettent d'établir un pré-diagnostic identifiant les gisements d'économie d'énergie. A ce niveau l'auditeur est en mesure d'évaluer la capacité de l'entreprise à gérer l'énergie.

•Exploitation et traitement des données

L'exploitation des données les calculs et leurs interprétations permettent à l'auditeur de proposer des améliorations allant dans le sens de la réduction des consommations énergétiques et de l'amélioration des conditions d'exploitation.

III.2-Recueil des données de base

Les données à recueillir sont les suivantes:

III.2.1-Données générales

-situation géographique de l'entrepôt:

-vocation de l'entrepôt. est-il polyvalent ou spécialisé? Quels sont les types de produits entreposés?

-Quantité de personnel. On indiquera leurs qualifications et leurs fonctions.

On indiquera également, si possible, la situation financière et les raisons précises ayant conduit l'entreprise à engager une procédure d'audit énergétique.

III.2.2-Mode de fonctionnement

-horaire de travail

-nombre de chambres froides. Indiquer les températures de consigne et les humidités relatives.

-nature des marchandises traitées.

-nature des opérations frigorifiques: prérefrigération, réfrigération, congélation

-durée moyenne d'entreposage des produits

-déterminer pour chaque type de produit entreposé les quantités moyennes journalières stockées.

-mode de gerbage et de dégerbage: matériel de manutention, nombre, type, durée de séjour dans la chambre froide, dimensions et dispositions des palettes ou autre support de stockage.

-nombre maximal d'employés affectés à une chambre froide.

-durée d'ouverture des portes

- nombre ou taux de renouvellement d'air
- taux de brassage de l'air dans la chambre froide
- mode d'éclairage des chambres froides: nombre de lampes, type, puissance
- durée de marche des installations

III.2.3-Données climatiques

Les données climatiques à recueillir sont les suivantes: température de l'air extérieur, humidité relative. Ces paramètres doivent être collectés au niveau de la station météorologiques la plus proche de l'entrepôt étudié sur une période d'au moins cinq(5) années.

- recueillir les moyennes mensuelles des températures maximales journalières
- relever les moyennes mensuelles des humidités relatives maximales journalières

III.2.4-Organisation de la gestion et de la maintenance

L'auditeur recherchera la réponse à un certain nombre de questions:

- problème de maintenance: comment se fait-elle? Qui le fait? Est-elle élaborée? Existe-il une fiche journalière de suivi des installations?
- l'entrepôt est-il outillé pour contrôler le bon fonctionnement des installations. indiquer les outils et appareils disponibles.
- existe-t-il des pièces rechange en stock ou un planning d'approvisionnement?
- les normes de sécurité sont-elles respectées?

III.2.5-Consommation d'énergie et d'eau

-recueillir sur une période de trois années au moins les factures d'électricité et d'eau.

Pour les entrepôts disposant d'un condenseur à eau, on indiquera également les paramètres suivants:

- dureté de l'eau de refroidissement
- dureté maximale admissible.

III.3-Descriptions des installations

III.3.1-L'enveloppe

- plan des locaux: plan de masse plan, de situation, orientation
- isolation des parois: disposition; matériau, conductivité thermique, épaisseur. Si possible, on indiquera les coefficients de transmission ayant servi au dimensionnement des isolants.
- isolation du sol: nature du dispositif anti-gel pour les chambres à températures négatives.
- parois support (isolation traditionnelle): nature, épaisseur, conductivité thermique

-porte: type, disposition, nature de l'isolation.

A la suite de cela l'auditeur examinera minutieusement l'état intérieur et extérieur de la chambre froide afin de rechercher des blessures au niveau de l'isolation ou des défauts de conception ou de construction.

III.3.2-Installations frigorifiques

Les installations frigorifiques à compression se composent de quatre parties principales qui sont: le compresseur, le condenseur, l'évaporateur et le détendeur. Ces différents éléments sont liés entre eux par un réseau de tuyauterie adéquat.

L'auditeur devra examiner minutieusement les installations et contrôlera le bon fonctionnement des différents éléments constitutifs du circuit. Cet examen s'accompagne d'un certain nombre de mesures à faire sur le circuit frigorifiques à des endroits précis qui seront précisés en temps utile.

III.3.2.1-Compresseur

•Description

-Indiquer le type de compresseur:

- volumétrique (alternatif, à piston, à vis, rotatif...)
- à impulsion (centrifuge..).

On indiquera également si le compresseur est ouvert, hermétique, ou semi-hermétique

-nature du fluide frigorigène

- relever les éléments suivants:

- puissance frigorifique nominale
- pression maximale de service, puissance effective en régime d'utilisation.
- vitesse de rotation
- dispositif d'entraînement du compresseur (arbre commun, arbre en ligne ou courroie de transmission)
- caractéristiques du lubrifiant
- nombre de cylindres, cylindrée, volume balayé, rendement indiqué, rendement mécanique, COP constructeur
- système de lubrification
- date de fabrication du compresseur

•Examen et mesures

-contrôler superficiellement l'encrassage et la corrosion

-mesurer les pressions d'aspiration et de refoulement .

-vérifier le niveau d'huile.

-relever la pression de l'huile et mesurer les températures de l'huile en amont et en aval du refroidisseur d'huile.

-vérifier l'étanchéité du compresseur.

-vérifier l'état du système de transmission moteur-compresseur.

III.3.2.2-Condenseur

•Description

Condenseur à air

-On indiquera les éléments suivants:

- le type d'appareil et le nombre d'éléments.
- la puissance calorifique.
- la surface de condensation.
- type, nombre, puissance électrique, vitesse de rotation des ventilateurs.
- section frontale
- pas, dimensions et nature des ailettes.
- diamètre et nature des tubes.
- écart de température maximale entre la température de condensation et la température d'entrée de l'air de refroidissement.
- système de régulation de la pression de condensation.

Condenseur à eau

Indiquer:

- le type d'appareil et le nombre d'éléments
- la puissance calorifique
- la surface d'échange, longueur du faisceau tubulaire.
- nombre de tubes, nombre de passes, section des tubes.
- écart de température maximale entre la température de condensation et la température d'entrée de l'air de refroidissement.

•Examen et mesures

Condenseur à eau

- contrôler superficiellement l'encrassage et la corrosion.
- mesurer la température de condensation.
- mesurer le sous-refroidissement.
- mesurer les températures d'entrée et de sortie de l'eau de refroidissement.
- vérifier l'existence de filtre sur le circuit d'eau de refroidissement.
- contrôler l'étanchéité du condenseur et des pompes d'eau de refroidissement.

Condenseur à air

- contrôler superficiellement l'encrassage et la corrosion.
- mesurer la température de condensation.
- mesurer le sous-refroidissement.
- contrôler la propreté des ailettes.
- mesurer les température d'entrée et de sortie de l'air de refroidissement.
- contrôler l'étanchéité du condenseur.

III.2.3-Evaporateur refroidisseur d'air

•Description

On indiquera les éléments suivants:

- type d'appareils et nombre d'éléments constitutifs.
- la puissance frigorifique
- nombre, dimensions et écartements des ailettes.
- nombre de nappes; nombre, section et dispositions des tubes.
- la section frontale.
- le mode de dégivrage
- ventilateurs: indiquer nombre, type débit et puissance absorbée en fonctionnement nominal.

•Examen et mesures

- contrôle superficiel de l'évaporateur.
- relever la température ou la pression d'évaporation.
- mesurer la surchauffe.
- relever la disposition du bulbe du détendeur thermostatique
- relever le type de distributeur de liquide et sa disposition.
- noter la disposition du ou des évaporateurs dans la chambre froide.

III.3.2.4-Appareils annexes du circuit

•Séparateur d'huile

Indiquer les éléments suivants:

- type et/ou modèle.
- mode de séparation de l'huile.
- le système de refroidissement d'huile.

Mesurer :

- température de la tuyauterie de retour d'huile.
- température de la partie inférieure de la tuyauterie du carter du compresseur.

•Filtre-désydrateur

- Indiquer le type et le modèle de filtre
- mesurer les températures à l'amont et à l'aval immédiat du filtre.

•Voyant liquide

- indiquer le type et le modèle.
- noter la disposition du filtre sur le circuit frigorifique.
- relever la teinte de l'indicateur d'humidité.
- vérifier la présence de bulle de vapeur.

•Echangeur de chaleur

- mesurer les températures des fluides chaud et froid à l'entrée et à la sortie de l'échangeur de chaleur.

-relever la disposition de l'échangeur (horizontale/verticale).et le sens de circulation des fluides (co-courant/contre-courant).

•**Détendeurs thermostatiques**

-indiquer le type détendeurs et sa capacité.

-mesurer les température amont et aval du détendeur.

-décrire la disposition du bulbe du détendeur sur la tuyauterie d'aspiration.

•**Appareils de sécurité et de régulation**

-relever les plages de régulation et les grandeurs de consigne.

III.3.3-Installations électriques

•**Eclairage**

-relever les différents types d'équipements lumineux. On indiquera leurs dispositions et leurs puissances.

-noter les durées moyennes de l'éclairage.

-mesurer les niveaux d'éclairement.

•**Moteurs électriques**

-Indiquer les types de moteurs et leurs caractéristiques en fonctionnement nominal (puissance $\cos\phi$, intensité, tension, rendement).

-mesurer l'intensité et la tension en fonctionnement réel (si possible sous différents régimes de fonctionnement).

-relever les conditions de fonctionnement des moteurs (température, humidité relative..) et leurs niveaux de protection contre les intempéries.

•**Sécurité**

-Noter les dispositions des locaux et des portes d'accès aux chambres froides.

-relever toutes les mesures de sécurité prises dans l'entrepôt frigorifique afin d'assurer la sécurité des personnes et des denrées entreposées.

III.4-Exploitation et traitement des données

La description des installations, les mesures et relevés effectués et les anomalies observées sur le site sont autant d'éléments permettant à l'auditeur d'établir son diagnostic. Ce diagnostic consistera à une analyse critique comparative de la situation existante avec les normes et usages en vigueur dans l'entreposage frigorifique. Le principe de la méthode est basé sur l'étude des points suivants:

-l'isolation

-les conditions d'entreposage

-les installations frigorifiques

-les installations électriques

-la sécurité

III.4.1-Etude de l'isolation

•Généralités

L'isolation d'un entrepôt frigorifique est très importante. Elle peut représenter jusqu'à 30% du coût total des installations frigorifiques. Sa conception et sa mise en oeuvre doivent être menées avec soin afin qu'elle puisse jouer pleinement le rôle qui lui est dévolu.

Les principales caractéristiques d'un isolant sont ci-dessous énumérées:

- conductibilité thermique faible
- insensibilité à l'absorption d'eau et de vapeur d'eau
- résistance à la compression
- stabilité dimensionnelle, absence d'odeur, résistance au feu
- insensibilité aux différents agents chimiques
- facilité de mise en oeuvre
- prix de l'isolant posé bon marché

Les matériaux utilisés en isolation frigorifique sont nombreux et variés. Il serait fastidieux de les citer tous. On pourra cependant se reporter au tableau 9 de l'annexe 1 qui présente les principaux isolants et leurs caractéristiques.

Les méthodes d'isolation peuvent être regroupées en deux sous-ensembles:

-l'isolation des chambres froides traditionnelles dont les parois sont construites en maçonnerie. L'isolation n'est alors qu'un doublage destiné à réduire fortement le coefficient de transmission thermique.

-l'isolation des chambres froides préfabriquées (démontables ou non démontables) qui est effectuée à l'aide de panneaux préfabriqués en usines (isolant+écran pare-vapeur).

III.4.1.1-Etude de l'isolation des parois

L'étude de l'isolation des parois comporte deux aspects. Il s'agit tout d'abord, en fonction des renseignements collectés dans la phase "recueil de données", de procéder à une étude des aspects qualitatifs de l'isolation. Cette étude devra examiner notamment les caractéristiques des matériaux de l'isolation, les procédés d'isolation utilisés et leurs modes de mise en oeuvre. Ces éléments seront examinés à la lumière des prescriptions du document technique sur l'isolation des chambres froides (édité par l'Association Française du Froid) [15].

Le second aspect de cette étude consistera à calculer les flux thermiques au niveau de chaque paroi. Les valeurs obtenues seront comparées à celles imposées par le Syndicat National de l'Isolation de France [15].

•Etude qualitative

Lors de la phase d'audit préliminaire l'auditeur a recueilli les données caractéristiques de l'isolation, notamment les matériaux utilisés, leurs agencements et leurs épaisseurs. Il aura pour tâche d'examiner les points suivants:

-la qualité des isolants et des matériaux pare-vapeur en fonction des conditions des conditions d'exploitation de la chambre froide.

-le mode de mise en oeuvre des isolants.

Nous exposons en annexe les caractéristiques des principaux isolants et matériaux pare-vapeur sur lesquelles l'auditeur pourra se référer pour établir son diagnostic de l'isolation.

•Etude quantitative

Connaissant les caractéristiques des matériaux composant une paroi de chambre froide, il est aisé de déterminer le flux thermique à travers celle-ci. Ainsi pour une paroi composée de plusieurs matériaux d'épaisseur respectives $e_1, e_2, e_3...$ et de conductivité thermique $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$ le flux thermique est égale:

$$\varphi = \frac{T_{\text{ex}} - T_i}{\frac{1}{h_i} + \frac{e_1}{\lambda_1} + \frac{e_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{e_n}{\lambda_n} + \frac{1}{h_e}}$$

Les coefficients de convection interne h_i et h_e externe sont déterminés à partir de la relation suivante: $h=8+4,5.V$ avec h en w/m^2K et V vitesse moyenne de l'air en m/s .

En comparant le flux thermique ainsi calculé aux valeurs économiques imposées par le Syndicat National de l'isolation de France ($\varphi=6w/m^2$ en congélation, $8w/m^2$ en réfrigération) on est en mesure de se prononcer sur les performances thermiques de la paroi considérée.

Détermination des températures extérieures

-Parois verticales

Deux cas peuvent se présenter. Le côté chaud de la paroi est en contact avec l'air extérieur. La température extérieure à considérer est la température maximale relevée sur une période donnée. Cette température peut être recueillie au niveau de la station météorologique la plus proche. Si par contre la paroi est contigue à un local, la température à considérer est la température de ce local.

-Sols

Pour une chambre à température positive placée directement sur le sol, on *supposera* à défaut d'une valeur précise, la température constante à une certaine profondeur soit $20^\circ C$. On prendra une température extérieure égale à $0^\circ C$ pour les sols de chambres à température négative non munis de système de réchauffage. Le réchauffage est fait généralement par une résistance électrique ou par un vide réalisé sous la dalle. Dans le premier cas la température est maintenue au dessus de $0^\circ C$, généralement entre 6 et $8^\circ C$. Dans le second cas, la température à considérer est la température de l'air à l'entrée du vide de la période la plus chaude.

-Plafond

Si la chambre froide est sous un autre local, la température à considérer est la température de ce local. Si l'isolation est placée en "faux-plafond" on prendra comme température dans le calcul du flux thermique traversant le plafond, la température de l'air entrant dans le comble. Si l'isolation est placée directement sur la toiture, la température à considérer est la même que pour les parois verticales.

III.4.1.2-Etude de l'isolation des tuyauteries

L'isolation des circuits frigorifiques joue un rôle important. Elle peut constituer entre 5 et 10% du coût de l'entrepôt frigorifique selon qu'il s'agisse d'un circuit de réfrigération ou de congélation. Elle a pour rôle de limiter les déperditions et d'éviter le givrage et la condensation des tuyauteries. Il est donc essentiel de contrôler la qualité des matériaux utilisés, leurs épaisseurs, et leur mise en oeuvre. Rappelons que les matériaux utilisés pour l'isolation des circuits frigorifiques sont les mêmes que ceux utilisés pour l'isolation des parois. Pour la vérification des épaisseurs mises en oeuvre, dans le cas de l'emploi de mousse de polyuréthane, on pourra utiliser le tableau 21 bis de l'annexe 1 qui indique les épaisseurs minimales de polyuréthane pour éviter les condensations à la surface des tuyauteries pour des humidités relatives variant de 80 à 90%.

III.4.1.3-Les portes isolantes

Les portes isolantes ont un rôle essentiel dans un entrepôt frigorifique. Leur conception doit répondre aux exigences qui commandent leur bon fonctionnement. Une porte isolante bien conçue doit faciliter la circulation des engins, tout en évitant au maximum les entrées d'air extérieur.

Pour faire ressortir les qualités ou défauts d'une porte isolante on pourra se limiter à examiner les éléments suivants:

- l'isolation proprement dit
- l'étanchéité à la vapeur d'eau et à l'air extérieur
- la facilité de manoeuvre
- les dimensions

Les dimensions de la porte sont fonction de son utilisation. Nous indiquons ci-dessous quelques cas de dimensionnement de portes isolantes. L'auditeur pourra donc s'y référer en cas de besoin:

-Pour les portes prévus pour les manutentions manuelles et pour le passage du personnel (cas de petites chambres froides), les dimensions sont en général 1,8 x 0,80

-Si des engins de manutention à main sont utilisés pour le gerbage, les dimensions des portes dépendent de l'encombrement de ces engins et de leurs chargements.

-Pour le passage de chariots auto-gerbeur une dimension de 3 m sur 2 peut être considérée comme satisfaisante.

Notons qu'en plus des portes isolantes il n'est pas rare rencontrer des dispositions spéciales telles que les contre-portes, les sas, les rideaux d'air destinés à limiter l'entrée d'air chaud dans la chambre froide.

III.4.2-Etude de l'entreposage

L'entreposage influe non seulement sur la qualité des produits entreposés, mais aussi sur les conditions de manutention. Une bonne disposition des produits favorise une circulation fluide et rapide des engins de manutention réduisant ainsi les apports de chaleur par renouvellement d'air et par conséquent la consommation énergétique de la chambre froide. Une mauvaise utilisation de l'espace réfrigéré amène à des gaspillage d'énergie.

Nous allons examiner tour à tour les différentes conditions d'un bon entreposage sur lesquelles il conviendra de se baser pour établir le diagnostic des conditions d'entreposage.

a-Durée d'entreposage

La durée de l'entreposage d'un produit dépend de sa nature et des qualités de l'air telles que la température, l'humidité relative et la vitesse. Il existe des recommandations à ce sujet que l'on peut consulter dans le "*Guide de l'entreposage frigorifique*" édité par l'Institut International du Froid. Cependant l'auditeur trouvera sur le tableau 6 de l'annexe 1 les conditions d'entreposage de quelques produits.

b-Température

Elle dépend généralement de la durée de stockage prévue. Pour les fruits et légumes elle est choisie en fonction de la sensibilité de l'espèce et est comprise entre -1 et 15°C. Pour la viande saignante la conservation se fait un peu en dessous de 0°C et peut aller jusqu'à 4°C au maximum. A toutes fins utiles, le tableau 6 de l'annexe 1 indique les températures de conservation recommandées pour quelques denrées.

c-Humidité

L'humidité relative des denrées entreposées doit être vérifiée. Elle est principe déterminée par la conception des installations, en particulier par la surface de l'évaporateur et le bilan thermique à évacuer. Une humidité trop basse peut entraîner la dessiccation et la perte de masse des produits et une humidité trop élevée nécessite une bonne isolation et une barrière anti-vapeur convenable.

d-Brassage et renouvellement d'air

Un brassage suffisant de l'air est indispensable pour homogénéiser au mieux la température d'entreposage. S'il y a ventilation forcée, il y a lieu de vérifier que n'est pas trop intense pour éviter une dessiccation exagérée des produits stockés. Il est souvent recommandé une circulation d'air modérée. Pour les fruits et légumes, par exemple, le taux de brassage est entre 20 et 25 volumes. Pour la viande stockée en chambre de conservation le coefficient de brassage est de l'ordre de 10 à 15 et supérieur à 50 pour les chambres de congélation.

Le renouvellement de l'air permet le remplacement du CO₂ et des substances volatiles dégagées par les denrées, par de l'air frais. Il est généralement assuré par l'ouverture des portes. Dans la pratique, on cherche à le réduire au minimum sans nuire à la qualité des denrées entreposées. Cependant pour les fruits comme les agrumes très sensible à l'action du CO₂, il y a lieu d'adopter un taux de renouvellement d'air adéquat. Ces valeurs peuvent être consultées au niveau du " *Guide de l'entreposage frigorifique*" édité par l'Institut International du Froid.

e-Mode de gerbage

Le mode de gerbage est étroitement lié au système de manutention adopté. Il existe plusieurs systèmes et matériels de manutention dans un entrepôt frigorifique. Pour la manutention et le stockage des charges unitaires, la palettisation est considérée comme la méthode la plus économique. Deux tailles de palettes normalisées sont utilisées: 0,80 x 1,20 et 1,00 x 1,20. Elles peuvent être chargées sur une hauteur de 1,25 à 2,00 m. On utilise des chariots de type varié pour la manutention des marchandises dans les entrepôts frigorifiques. Il serait fastidieux de les citer tous. Dans tous les cas, on retiendra qu'un bon mode de gerbage doit favoriser la circulation du personnel et des engins et réduire leurs temps de séjour au minimum afin d'éviter les déperditions de froid. D'une manière générale, pour assurer une bonne circulation de l'air, les dispositions suivantes sont recommandées: la distance entre les marchandises et les parois et entre les marchandises et le plafond doivent être respectivement 10 à 12 cm et 25 cm minimum. Il y a également lieu de vérifier, dans le cas des entrepôts polyvalents, la compatibilité des différents produits entreposés.

f-Densité d'entreposage

En raison du prix de revient élevé du m³ de chambre froide, l'obtention d'une bonne densité d'entreposage a une importance capitale. L'entreposage des produits ne doit pas entraver la circulation de l'air ni empêcher le contrôle des marchandises. Le tableau 8 de l'annexe 1 indique les densités d'entreposage usuelles pour différentes catégories de marchandises. D'une manière générale la densité d'entreposage adoptée dans les chambres froides est de l'ordre de 160 Kg/m³.

g-Emballage

L'emballage des produits entreposés dans les entrepôts frigorifiques est souvent nécessaire. En plus des facilités dans la manutention, celle-ci doit protéger le produit contre les souillures d'où qu'elles viennent. Elle donc spécifique à chaque produit (cf. tableau 8 annexe 1).

III.4.3-Etude des installations frigorifiques

III.4.3.1-Dimensionnement des installations frigorifiques

Cette étude consiste à recalculer les grandeurs caractéristiques (théoriques) des installations frigorifiques afin de les comparer avec les caractéristiques en fonctionnement réel et les caractéristiques du constructeur relevées sur les site.

•Déterminations des caractéristiques théoriques

Il s'agit de déterminer:

-la production frigorifique ϕ_0 par reconstitution du bilan thermique des chambres froides. Nous indiquons en annexe les différents éléments qui peuvent servir à l'établissement de ce bilan.

-les températures de condensation et d'évaporation

-les grandeurs thermophysiques du circuit frigorifique (enthalpie h, pression P, température T, volume massique v,...)

-les puissance théoriques du condenseur et du compresseurs.

-les coefficients de performance

•Détermination des caractéristiques réelles

Pour établir le cycle de fonctionnement réel les mesures suivantes sont nécessaires (cf. recueil de données):

-température d'évaporation

-température de condensation

-température des gaz à l'aspiration

-température de refoulement

-température entrée et sortie d'air du condenseur

-température à l'entrée du détendeur

Par ailleurs la production frigorifique est déterminée à partir de l'enthalpie de l'air brassé par les ventilateurs de l'évaporateur selon la formule suivante:

$$\phi_0 = m_a \times \Delta h$$

m_a : débit massique de l'air brassé par le ventilateur

Δh : différence d'enthalpie entre l'air entrant et sortant de l'évaporateur

Une fois la production frigorifique et les grandeurs thermophysiques du circuit connues, l'auditeur devra déterminer les puissances en fonctionnement réel du condenseurs et du compresseur.

III.4.3.2-Etude de l'installation existante

a-Etude du compresseur

•Vérification du choix du compresseur

Le choix du compresseur dépend d'un certain nombre de paramètres tels que: la vitesse de rotation, les pressions d'évaporation et de condensation, la température de la chambre froide, le type de fluide frigorigène. L'auditeur pourra apprécier le choix d'un compresseur donné à partir des tableaux 18,19,20 de l'annexe 1 qui indiquent respectivement les caractéristiques des compresseurs pour installations frigorifiques, les domaines d'emploi des différents types de compresseurs et de fluides frigorigènes.

•Contrôle superficiel

Le contrôle superficiel du compresseur permet de déceler d'éventuels encrassements, corrosion ou avaries. C'est déjà un indice qui permet de situer le niveau d'entretien des installations frigorifiques.

•Vibration

Les vibrations produisent généralement des fuites de fluide frigorigène qui ont principalement pour conséquence une perte de charge de l'installation d'où une baisse de la production frigorifique. Cela se traduit également par un allongement du temps de marche du compresseur et par une consommation d'énergie accrue. L'auditeur devra porter son attention sur ce phénomène.

•Variation des pressions d'aspiration et de refoulement

La figure 1, en annexe, permet de diagnostiquer les différentes anomalies ou pannes pouvant entraîner la variation de ces deux paramètres.

•Température de fin de compression

Si cette température est anormalement élevée, le système de refroidissement de la culasse du compresseur est certainement défectueux. Ce phénomène peut conduire facilement à une baisse de rendement du compresseur et à la décomposition des huiles de lubrification avec comme conséquences possibles, une augmentation de la consommation d'énergie et l'obturation des tuyauteries par les produits de décomposition de l'huile

•Pression d'huile

Dans un compresseur frigorifique, l'huile a pour mission d'assurer la lubrification des éléments constitutifs du compresseur et d'évacuer les particules solides diverses. Si la pression d'huile est inférieure à la limite fixée par le fabricant, celle-ci ne peut plus assurer pleinement la lubrification des divers organes.

•Dispositif d'entraînement du compresseur

Un dispositif d'entraînement défectueux, courroie de transmission lâche par exemple, entraîne une réduction de la vitesse de rotation du compresseur d'où une baisse de la production frigorifique.

•Courant absorbé par le compresseur

Un courant absorbé anormalement élevé indique certainement un défaut de fonctionnement du compresseur dû à une surcharge ou une variation des pressions d'aspiration et de refoulement hors des limites admises.

b-Etude de l'évaporateur

•Dimensions des chambres froides, puissance et disposition des évaporateurs

Pour assurer une bonne circulation de l'air dans la chambre froide, les évaporateurs doivent être bien disposés conformément aux indications du constructeur. De même, l'auditeur devra étudier la distance de projection d'air des évaporateurs en rapport avec les dimensions de la chambre.

•Système de dégivrage

L'humidité de l'air de renouvellement et celle dégagée par les denrées entreposées contribuent à la formation de givre sur l'évaporateur. La couche de givre ainsi formée provoque par son effet d'isolant un abaissement de la température d'évaporation et par conséquent une diminution de la production frigorifique. Le temps de marche du compresseur est allongé augmentant ainsi la consommation d'énergie.

Pour les chambres à température positive, le dégivrage se fait généralement par l'intermédiaire d'un thermostat qui arrête le compresseur dès que la température est en dessous d'un certain seuil pré-défini; les ventilateurs continuent à souffler sur l'évaporateur élevant ainsi la température du fluide frigorigène, ce qui permet la fusion du givre. Pour ce type de dégivrage l'auditeur devra vérifier le réglage du thermostat qui commande la mise en marche du compresseur afin que celle-ci n'intervienne pas avant que l'évaporateur ne soit complètement dégivré. Dans le cas contraire l'eau de dégivrage non encore égouttée se remet à givrer.

Dans les chambres à température négative deux types de dégivrage sont généralement utilisés:

-le dégivrage par chauffage électrique: la séquence de dégivrage est commandée par une horloge programmée et l'arrêt est effectué par un thermostat d'ambiance. Il y a lieu de contrôler le parfait déroulement de la séquence de dégivrage. Par ailleurs les différents appareils (thermostat et horloge) doivent être réglés de sorte que la durée de dégivrage soit aussi courte que possible (économie d'énergie) et que le démarrage du compresseur et des ventilateurs n'intervienne qu'à la fin du dégivrage.

-le dégivrage par gaz chaud qui consiste à refouler les gaz comprimés dans l'évaporateur. C'est par conséquent le système de dégivrage le plus économique.