

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ À

L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIERES

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN ÉLECTRONIQUE INDUSTRIELLE

PAR

GUÉDIRA ANAS

"SYSTEME DE REFROIDISSEMENT HYBRIDE
D'UN CONVERTISSEUR CA/CA DE 2 kW"

Mai 1992

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

RÉSUMÉ

Le contenu de ce mémoire porte sur les méthodes d'évacuation de chaleur en électronique de puissance , et en particulier un convertisseur ca-ca de 2 kW dont la fréquence d'opération est de 16.5 kHz .

On signale que ce convertisseur est actuellement opérationnel dans les usines de pâtes et papiers au Canada , ainsi que pour d'autres applications industrielles .

A cet effet , on présente la description et la conception d'un système hybride de refroidissement , constitué du caloduc et du liquide FC-72 ou l'huile VOLTESSO 35 en vue de refroidir ledit convertisseur .

Pour les mesures des températures au niveau des jonctions des composants électroniques de puissance , on a utilisé des thermocouples et un système d'acquisition de données d'une part , et d'autres part une caméra Infra-rouge pour la visualisation des variations de températures à l'extérieur du système.

Les résultats obtenus sont interprétés suivants différents cas .

Signalons à la fin l'importante chute de température atteinte avec le système hybride de refroidissement .

REMERCIEMENTS

Je tiens à témoigner ma profonde reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à réalisation de ce travail de recherche .

Je suis heureux d'exprimer ma profonde gratitude au Conseil National de recherches et génie du Canada pour le soutien financier qu'il a réservé pour la réalisation de ce travail de recherche .

J'adresse mes remerciements au directeur de recherche , Monsieur **Adam Skorek** , dont l'enthousiasme pour les techniques d'évacuation de chaleur a attiré mon attention et dont l'amitié durable a permis ma collaboration avec sa remarquable équipe du laboratoire D'ELECTROTHERMIE INDUSTRIELLE .

Je tiens à remercier aussi mon codirecteur de recherche Monsieur **Marek Zaremba** , ainsi que les professeurs Yves Dubé et Anatole Sevigny pour les idées et les points de vues échangés dans le but de concrétiser ce projet .

TABLE DES MATIERES

	Page
RÉSUMÉ.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
LISTE DES TABLEAUX.....	VII
LISTE DES FIGURES.....	IX
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS.....	XVI

CHAPITRE I

Introduction

I.1 L'importance des phénomènes thermiques en électronique de puissance.....	1
I.2 Rôle du refroidissement.....	3
I.3 Formulation du problème.....	5
I. 4 Étude bibliographique.....	7

CHAPITRE II

Théorie des phénomènes thermiques

II.1 La conduction.....	13
II.2 La convection.....	15
II.3 Le rayonnement.....	16

CHAPITRE III

Systèmes de refroidissement

III.1 Introduction.....	18
III. 2 Fentes de ventilation.....	18

IV

III. 3 Les ventilateurs.....	20
III. 3.1 Performances des ventilateurs.....	21
III. 4 Les ailettes de refroidissement.....	24
III.4.1 Performances des ailettes de refroidissement.....	25
III.5 Systèmes de refroidissement par ébullition nucléée.....	30
III. 5 .1 Mécanisme de l'ébullition nucléée.....	31
III. 6 Liquide-fluide Fluorinert.....	32
III.6.1 Transfert de chaleur par convection naturelle.....	32
III.6.2 Transfert de chaleur par circulation forcée.....	34
III.6.3 Performances des liquides-fluides Fluorinert.....	34
III.7 Caloduc.....	35
III.7.1 La pression capillaire.....	37
III.7.2 Chute de pression du liquide.....	38
III.7.3 Performances des caloducs.....	39

CHAPITRE IV

Quelques applications dans le domaine de l'électronique

IV.1 Utilisation de la ventilation forcée.....	42
IV.2 Les échangeurs thermiques.....	42
IV.2.1 Principes de base de conception d'un échangeur thermique.....	43
IV. 3 Équipement électronique refroidi par conduction.....	45
IV.4 Autres techniques que la convection forcée.....	46
a/ Chassis refroidi par jets d'air.....	46
b/ Refroidissement par transpiration.....	47
IV.5 Refroidissement des composants de puissance par caloduc.....	48

IV.6 Exemple d'utilisation du liquide fluorinert comme refroidisseur....	51
IV.7 Exemples de divers types de systèmes de refroidissement par ébullition utilisés en électronique.....	53
IV.7.1 Les applications pratiques du refroidissement par ébullition nucléée.....	55
IV.7.1.1 Applications pratiques en électronique de puissance.....	55
IV.7.1.2 Applications en microélectronique.....	56

CHAPITRE V

Conception d'un nouveau système de refroidissement hybride

V.1 Description des éléments du système	57
V.2 Convertisseur de puissance.....	59
V.2.1 Circuit de puissance.....	63
V.2.2 Carte de commande du convertisseur.....	65
V.2.3 Caractéristiques de la charge.....	68
V.2.4 Evaluation des pertes dans les composants de puissance.....	70
V.2.4.1 Calcul des pertes dans un thyristor.....	70
V.2.4.1.1 Pertes en conduction directe.....	70
V.2.4.1.2 Pertes en conduction inverse.....	71
V.2.4.1.3 Pertes au blocage direct.....	72
V.2.4.1.4 Pertes de commutation à l'amorçage d'un thyristor.....	73
V.2.4.2 Calcul des pertes dans la diode.....	75
V.2.4.2.1 Pertes en conduction directe.....	75

V.2.4.2.2 Pertes au blocage quand les thyristors sont saturés.....	76
V.2.4.2.3 Pertes au blocage de tous les semiconducteurs.....	76
V.2.4.2.4 Pertes de commutation à l'extinction.....	77
V.2.4.2.5 Pertes de commutation à l'amorçage.....	78
V.2.4.3 Calcul des pertes dans le " snubber ".....	79
V.2.4.3.1 Pertes à l'extinction de la diode.....	79
V.2.4.3.2 Pertes à l'amorçage des thyristors.....	80
V.3 Caractéristiques chimiques et physiques des liquides Fluorinert.....	81
V.3.1 Caractéristiques chimiques des liquides FLUORINERT.....	81
V.3.2 Caractéristiques physiques des FLUORINERT.....	82
V.4 Caractéristiques du caloduc.....	86
V.4.1 Compatibilité du matériel.....	87
V.4.2 La taille et la forme des caloducs.....	88
V.4.3 La résistance thermique des caloducs.....	88
V.4.4 Caloduc utilisé comme radiateur.....	92
V.5 Caractéristiques de l'huile VOLTESSO 35 utilisée.....	92

CHAPITRE VII

Étude comparative entre caloduc et le système de refroidissement à compression

VI.1 Comparaison entre caloduc et système de réfrigération à compression.....	96
VI.1.1 Caractéristiques du fréon-12 utilisé par caloduc.....	97
VI.2 Principe des systèmes de réfrigération à compression.....	101
VI.2.1 L'évaporateur.....	101

VII

VI.2.2 Le compresseur.....	102
VI.2.3 Le condensateur.....	103
VI.2.4 Le détendeur.....	104

CHAPITRE VII

Résultats de l'étude expérimentale

VII.1 Description du montage expérimental et les équipements utilisés.....	107
VII.2 Mesure des températures avec caméra infra-rouge.....	111
VII.3 Résultats de l'étude expérimentale avec caloduc et sans liquide-fluide Fluorinert.....	114
VII.4 Résultats des mesures avec caloduc et liquide-fluide FC-72.....	124
VII.5 Résultats des mesures avec caloduc et l'huile VOLTESSO 35.....	131
Conclusion	135
Bibliographie.....	136

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau III.1 : Règles des performances d'un ventilateur	21
Tableau IV.2 : Les principaux matériaux utilisés en fonction de la gamme de température	40
Tableau V .1 : Caractéristiques physiques des Fluorinert	83
Tableau V .2 : Caractéristiques physiques des Fluorinert	84
Tableau V .3 : Caractéristiques physiques des Fluorinert	85
Tableau V .4 : Comparaison des valeurs des résistances des caloducs	90
Tableau V .5 : Caratéristiques physiques de l'huile VOLTESSO 35.....	94

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure I.1 : Taux de pannes des composants en fonction de la température.....	2
Figure I.2 : Schéma du refroidisseur où la souche des thyristors et les ailettes sont submergées dans du fréon-113	8
Figure I.3 : Schéma des thyristors refroidis par l'évaporateur.....	9
Figure I.4 : Refroidissement par air	9
Figure I.5 : Refroidissement par liquide	9
Figure I.6 : Modules de cartes électroniques immergés dans du FC-72	10
Figure I.7 : Schéma du circuit électrique d'alimentation du refroidisseur du type thermoélectrique	11
Figure I.8 : Schéma du module des unités de refroidissement thermoélectriques	12
Figure I.9 : Schéma du mode de liaison du module au réfrigérateur	12
Figure II . 1 : Généralisation de la loi de Fourier à une seule dimension à un volume élémentaire	14
Figure III.1 : Châssis électronique refroidi par ventilateur	19

Figure III.2	:	Performances thermique du chassis refroidi par convection forcée	19
Figure III.3	:	Cartes de circuits imprimés refroidis par convection forcée avec les ventilateurs	20
Figure III.4	:	Courbe caractéristique d'un ventilateur	22
Figure III.5	:	Gammes des vitesses spécifiques des principaux types de ventilateurs	23
Figure III.6	:	Ailette de refroidissement	24
Figure III.7	:	Types de radiateurs refroidissant des composants électroniques.....	25
Figure III.8	:	Efficacité d'une ailette de refroidissement	26
Figure III.9	:	Coupe transversale du radiateur	27
Figure III.10	:	Schématisation du transfert de chaleur à travers une ailette	28
Figure III.11	:	Coupe transversale d'un caloduc	35
Figure III.12	:	Divers utilisation du caloduc en électronique de puissance	36
Figure III.13	:	Rayons de courbures des régions de l'évaporateur et du condensateur	38
Figure III.14	:	Structure des mèches	40
Figure IV.1	:	Système à conduits convergents	42
Figure IV.2	:	Utilisation de ventilateur et d'échangeurs thermiques.....	43

Figure IV.3	:	Carte de circuit imprimé refroidi par conduction	46
Figure IV.4	:	Chassis refroidi par jets d'air sur toute sa surface	47
Figure IV.5	:	Refroidissement par " transpiration "	47
Figure IV.6	:	Refroidissement par caloduc d'un transistor de puissance	48
Figure IV.7	:	Refroidissement par caloduc d'une paire de diodes	49
Figure IV.8	:	Cartes de circuits imprimés refroidis par caloducs	49
Figure IV.9	:	Carte de circuit à structure caloduc	50
Figure IV.10	:	Utilisation d'un caloduc à conductance variable dans un équipement électronique spatial	50
Figure IV.11	:	Exemple d'utilisation du liquide fluide Fluorinert comme refroidisseur	51
Figure IV.12	:	Différentes configurations des liquides Fluorinert utilisés comme refroidisseur	52
Figure IV.13	:	Système de refroidissement à échappement libre	54
Figure IV.14	:	Système de refroidissement à échappement limité	54
Figure IV.15	:	Système de refroidissement par ébullition franche	54
Figure IV.16	:	Système de refroidissement par ébullition locale	54
Figure IV.17	:	Système de refroidissement multifluide	54
Figure V.1	:	Schéma synoptique du système proposé	58
Figure V.2	:	Schéma du circuit équivalent quand l'un des interrupteurs est saturé	59

Figure V.3	:	Schéma du circuit équivalent quand tous les interrupteurs sont bloqués	61
Figure V.4	:	Schéma du circuit de puissance du convertisseur	65
Figure V.5	:	Schéma de la carte de commande	65
Figure V.6	:	Schéma du circuit équivalent de la charge.....	69
Figure V.7	:	Ensemble des résistances thermiques d'un caloduc	90
Figure VI.1	:	Diagramme enthalpique du fréon-12	99
Figure VI.2	:	Cycle frigorifique du fréon-12	100
Figure VI.3	:	Diagramme théorique du fréon-12 pendant la phase d'évaporation	102
Figure VI.4	:	Diagramme théorique du fréon-12 pendant la phase de compression	103
Figure VI.5	:	Différence entre le diagramme théorique et réel pendant la phase de condensation	104
Figure VI.6	:	Schéma d'un détendeur	105
Figure VII.1	:	Schéma du système d'acquisition de données utilisé	107
Figure VII.2	:	Schéma de l'application scanner thermocouple et des connexions des thermocouples	108
Figure VII.3	:	Schéma du montage expérimentale raccordé au système d'acquisition de données	109
Figure VII.4	:	Photos prises à l'aide d'une caméra infra-rouge placée en face du montage expérimental.....	112

Figure VII.5	:	Photos prises avec caméra infra-rouge deux plus tard	113
Figure VII.6	:	Figure schématisant les trois cas de mesures	116
Figure VII.7	:	Relevé de la mesure de température du radiateur sur lequel sont fixés la diode de puissance et les deux thyristors	117
Figure VII.8	:	Relevé de la mesure de température de la diode dans l'air ambiant	118
Figure VII.9	:	Relevé de la mesure de température de la diode dans le réservoir fermé	119
Figure VIII.10	:	Relevé de la mesure de température de la diode dans le réservoir fermé et associé au caloduc.....	120
Figure VII.11	:	Relevé de la mesure de température du thyristor dans l'air ambiant	121
Figure VII. 12	:	Relevé de la mesure de température du thyristor dans le réservoir fermé	122
Figure VII.13	:	Relevé de la mesure de température du thyristor dans le réservoir fermé et associé au caloduc	123
Figure VII.14	:	Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor avec le caloduc et le liquide fluide pour une durée d'une heure	126

Figure VII.15	:	Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor avec le caloduc et le liquide fluide pour une durée de deux heures	127
Figure VII.16	:	Relevé des mesures de températures de la diode et thyristor avec caloduc et liquide fluide pour une durée de trois heures	128
Figure VII.17	:	Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor avec le caloduc et le liquide fluide pour une durée de quatre heures	129
Figure VII.18	:	Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor après l'arrêt immédiat du convertisseur et ce pour une durée de quatre heures	130
Figure VII.19	:	Relevé des mesures des températures avec caloduc et l'huile VOLTESSO 35 pour une durée d'une heure et deux heures	132
Figure VII.20	:	Relevé des mesures de températures avec caloduc et l'huile VOLTESSO 35 pour une durée de trois heures et quatre heures.....	133

Figure VII.21 : Relevé des températures avec caloduc et l'huile
VOLTESSO 35 après l'arrêt immédiat du
convertisseur et ce pour une durée de quatre
heures134

LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

A	:	Aire
B	:	Induction magnétique
C_p	:	Chaleur spécifique
C_v	:	Chaleur spécifique du fluide
D	:	Diamètre
∂	:	Dérivée partielle
ΔP_c	:	Différence de pression capillaire
ΔP_v	:	Chute de pression due à la viscosité qui ait lieu dans la phase vapeur
ΔP_L	:	Chute de pression due à la viscosité qui ait lieu dans la phase liquide
E_{lg}	:	Enthalpie de vaporisation
Φ	:	Flux magnétique
h	:	Coefficient de convection
k	:	Conductivité thermique
k_e	:	Conductivité électrique
l	:	Longueur
μ	:	Viscosité
N_s	:	Vitesse spécifique
η	:	Efficacité de l'ailette
ω	:	Tension superficielle entre le liquide et sa vapeur
P_s	:	Pression statique
Q	:	Energie (Flux de chaleur)

R	:	Rayon
r_h	:	Rayon hydraulique
ρ	:	Masse volumique
ρ_v	:	Masse volumique de la vapeur saturante
σ	:	Constante universelle de Stephan-Boltzman
T	:	Temperature
T_c	:	Temperature du convertisseur
T_f	:	Temperature du fluide
T_a	:	Temperature ambiante
T_s	:	Temperature de surface de l'ailette
t	:	Temps
τ_l	:	Stress du cisaillement du au frottement à l'interface du liquide-solide .
U	:	Coefficient d'échange global par convection et rayonnement .
V	:	Vitesse
W	:	Débit volumique
X	:	Facteur total d'émission

CHAPITRE I

INTRODUCTION

I.1 L'importance des phénomènes thermiques en électronique de puissance.

La conception des composants électroniques à nos jours se trouve limitée par des considérations autres qu'électroniques , en particulier par des problèmes de dissipation de chaleur. Tous les composants électroniques sont sensibles à leur température: ils ont des performances médiocres en dehors de certaines limites de température et ils sont détruits si la température dépasse largement ces limites. Certains composants dissipent beaucoup de chaleur et s'échauffent et afin d'être dans les limites de fonctionnement de ces composants , il faut aménager l'écoulement de cette chaleur à l'extérieur.

Concernant la fiabilité des composants électroniques , elle est fortement influencée par leur température de fonctionnement comme l'indique la courbe de la figure I.1 tracée à partir des données fournies par un certain nombre de fabricants de circuits intégrés et qui donne le taux de pannes en fonction de la température [1].

On constate sur cette courbe qu'une élévation de température de 25 °C seulement se traduit par un doublement du taux de pannes.

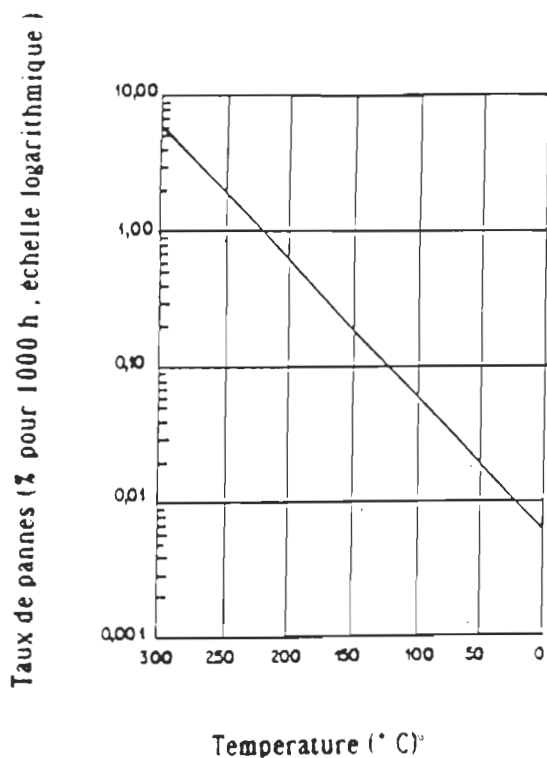


Figure I.1 : Taux de pannes des composants en fonction de la température.

Le maintien des composants des circuits électroniques à une température compatible avec leur bon fonctionnement n'est généralement pas la seule fonction d'un système de refroidissement, souvent il doit également uniformiser la température à l'intérieur de l'équipement pour assurer de bonnes performances aux circuits [1].

Dans la majorité des cas, les éléments électroniques constitutifs d'une carte ou fixés sur un radiateur produisent des écoulements de chaleur compliqués et difficiles à étudier. Les méthodes de calcul analytiques sont impuissantes pour traiter ces cas. On est souvent amené à réaliser, à la fois, des mesures expérimentales et des simulations à l'ordinateur [2].

La chaleur générée dans un semiconducteur doit être dissipée dans un

radiateur ou , pour des périodes courtes , elle peut être stockée en quantités minimales dans la capacité thermique du semiconducteur [2] .

Puisque le matériau , à travers lequel la chaleur se transfère , a une résistance thermique et une capacité , son comportement thermique est analogue à celui d'un circuit électrique R-C électronique [2] .

A l'état de conduction le semiconducteur est polarisé positivement . Quand un courant direct passe à travers une jonction p-n , des électrons et des trous franchissent la tension de barrière puis diffusent loin jusqu'à ce qu'ils se recombinent ou soient collectés en libérant de l'énergie . De plus , de la chaleur , dégagée par effet Joule , est produite dans le semiconducteur et est due à la chute de tension et au passage du courant . Il y a , aussi , une production de la chaleur dans les contacts. Les pertes par commutation tendent à être localisées à cause de la non uniformité de la distribution des porteurs à travers les sections du semiconducteur dans des conditions transitoires [2] .

1.2 Rôle du refroidissement

Afin de résoudre les problèmes thermiques qui peuvent nuire au bon fonctionnement des circuits électroniques , on fait appel au refroidissement efficace. D'une part , le système de refroidissement doit être compatible avec l'environnement dans lequel il doit être utilisé. D'autre part , il faut imposer aux systèmes de refroidissement certaines limitations .

Les premières limitations concernent la thermique et la mécanique . Ces limitations ne sont pas les seules et , en fait , peuvent ne pas être les plus

importantes . En général , il existe cinq critères qui doivent être considérés lors de la conception d'un système de refroidissement [1]:

- sa capacité ,**
- sa fiabilité ,**
- sa commodité d'emploi ,**
- sa compatibilité avec de l'équipement électronique .**
- son prix .**

Les systèmes de refroidissement doivent être capables de remplir leur fonction d'une manière reproductible et prévisible , même confrontés à un environnement extérieur changeant ; leurs performances doivent être soutenues pendant une certaine durée de vie , avec un minimum d'entretien. À la limite , le taux de pannes d'un système de refroidissement doit être inférieur à celui des composants qu'il protège [1] .

La commodité d'emploi du système de refroidissement doit être prise en considération de telle sorte que les composants critiques de l'équipement électronique soient facilement accessibles et déconnectables pour être testés , réparés ou remplacés.

Le système de refroidissement pour l'équipement électronique doit tenir compte des considérations économiques dans l'analyse finale . Le coût du système de refroidissement doit être maintenu dans une proportion raisonnable du coût total de l'équipement électronique.

Lors de la conception du système de refroidissement d'un équipement

électronique toutes ces limitations doivent être prises en considération et comme dans toute conception le système optimum sera le résultat d'une série de mesures [1].

Ces mesures sont basées sur l'évaluation des avantages d'une méthode de refroidissement par rapport à ses limitations et sur la pondération de ses avantages et de ses désavantages par rapport à une classification par ordre d'importance de ses différentes limitations.

Le meilleur système de refroidissement est celui qui satisfait de la façon la plus simple les exigences thermiques d'un équipement électronique [1].

I.3 Formulation du problème

L'échauffement excessif des composants électroniques touche sérieusement les propriétés des jonctions semiconductrices qui les composent et a , par conséquent, un effet nuisible quant à leurs fonctionnements [2]. Dans ce sens, plusieurs travaux de recherche ont été menés en vue de remédier aux problèmes thermiques dans les convertisseurs électroniques. Les travaux préliminaires ont porté spécialement sur le choix des matériaux et de la géométrie ainsi que sur les dimensionnements des radiateurs sur lesquels doivent être fixés les composants électroniques de puissance en fonction de la puissance dissipée dans ces composants et du milieu ambiant. D'autres travaux ont porté sur la détermination des positions optimales, du point de vue thermique [2]. Malgré ces travaux de recherche, le développement continu des applications des composants électroniques de puissance implique la recherche sur les méthodes de refroidissement plus efficaces et mieux adaptées aux

exigences d'environnement électronique [2] . Le projet consiste en une étude approfondie des méthodes nouvelles d'évacuation de chaleur applicables en électronique de puissance. Nous nous intéressons en particulier à un convertisseur ca-ca de 2 kW. L'utilisation de l'air , du **liquide fluide FLUORINERT ou l'huile et du caloduc**, étant les techniques de plus en plus présentes dans les différentes branches d'électronique fera l'objet au cours de notre analyse particulière . L'application d'un système hybride constitué du liquide et du caloduc nous semble être un bon choix du fait du contact direct entre le composant et le liquide fluide d'une part , et d'autre part de la capacité du caloduc d'extraire la chaleur à l'extérieur. Un tel système sera conçu et testé dans le cas d'un convertisseur ac-ac de 2kW.

On justifie le choix du caloduc et du liquide-fluide par les raisons suivantes.

D'après la littérature , les caloducs sont généralement utilisés pour résoudre les problèmes thermiques causés par les composants électroniques . Ils permettent d'évacuer par conduction et convection de grandes quantités de chaleur. Ils permettent également de réduire le gradient thermique résultant de la position dans l'espace d'un véhicule dont une des faces est exposée au rayonnement solaire et la face opposée maintenue dans l'ombre [1] .

Parmi les propriétés du caloduc , deux sont très importantes , à savoir : sa résistance thermique qui est relativement faible , et son temps de réponse thermique qui est très inférieur à celui des conducteurs solides [3] .

Quand au liquide-fluide Fluorinert , il mène un transfert de chaleur selon le mode de convection naturelle ou à convection forcée. Le refroidissement par ébullition est encore plus efficace. Ces phénomènes seront traités en détails ,

lorsque nous aborderons l'étude expérimentale.

Les liquides Fluorinert conservent les composants à des températures basses et de cette façon réduisent le nombre de pannes et augmentent la sûreté. En même temps, les composants peuvent être enfermés en ensemble de paquets en vue de maximiser les densités de puissance et minimiser la taille des équipements.

Avant de procéder aux études expérimentales, on fera une étude par simulation en vue d'analyser le comportement thermique des composants du convertisseur en question.

A la fin on fera des essais avec de **l'huile VOLTESSO 35** utilisée dans le refroidissement des transformateurs. On fera ensuite une comparaison entre ce dernier et le liquide Fluorinert et on interprétera par la suite les résultats qui en découlent.

I. 4 Étude bibliographique

On a procédé au préalable à une étude bibliographique approfondie. Au cours de cette étude, on a passé en revue diverses méthodes utilisées pour le refroidissement des composants. La documentation des liquides fluides FLUORINERT et les différents articles qui traitent de son utilisation dans diverses applications de l'électronique ont permis aussi d'ouvrir un grand champ d'horizon sur le projet. Tout ceci contribue à la conception du système hybride que nous envisageons réaliser. Le refroidissement à **immersion** est appliqué depuis longtemps dans différents équipements industriels. Cependant, les développements assez récents des réfrigérants de refroidissement par changement de phase sont

employés dans les systèmes de contrôle de puissance [8].

En effet, on présente deux refroidisseurs de ce type.

La figure I.2 montre le schéma du refroidisseur où la souche des thyristors et les ailettes sont submergées dans du fréon-113. La structure est relativement simple, la vapeur et le condensat du liquide s'orientent dans deux sens opposés.

Des refroidisseurs similaires à cette construction sont utilisés pour les onduleurs et les redresseurs de différentes capacités [8].

La figure I.3 montre le schéma du système équipé avec le deuxième type de refroidisseur. Dans cet exemple, les thyristors ne sont pas submergés dans le réfrigérant mais refroidis par l'évaporateur [8].

Les considérations de conception des équipements de refroidissement à immersion utilisant le changement de phase sont : la fiabilité, l'ébullition nucléée de haute performance, l'exploitation du gaz noncondensable accumulé dans le condensateur et le contrôle dynamique de la pression du système dans le but d'éviter les fluctuations excessives de la température de saturation [8].

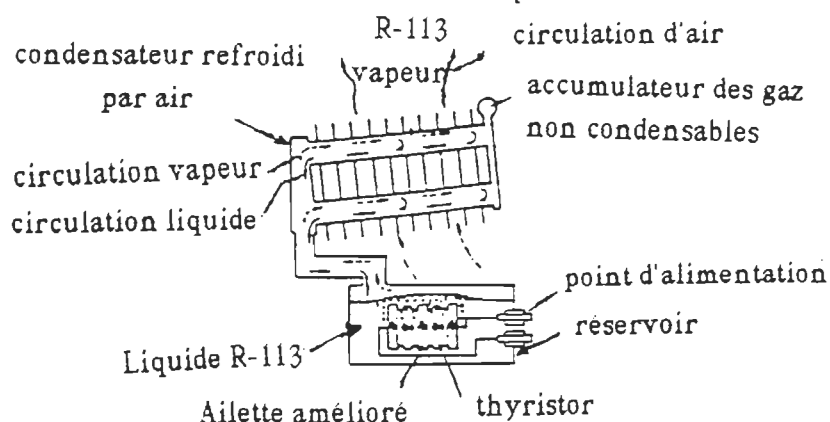


Figure I.2: Schéma du refroidisseur où la souche des thyristors et les ailettes sont submergées dans du fréon-113.

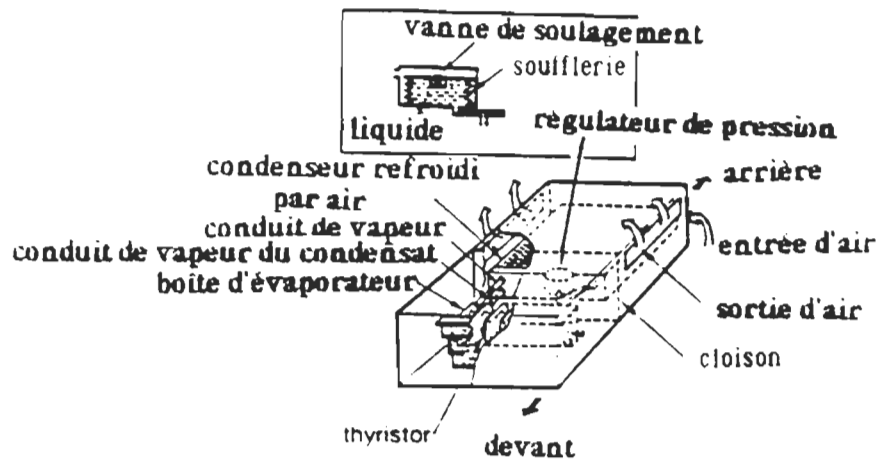
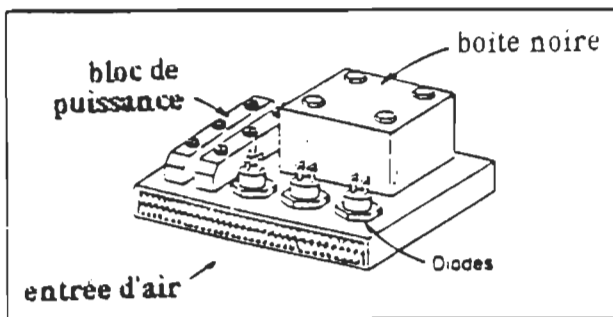


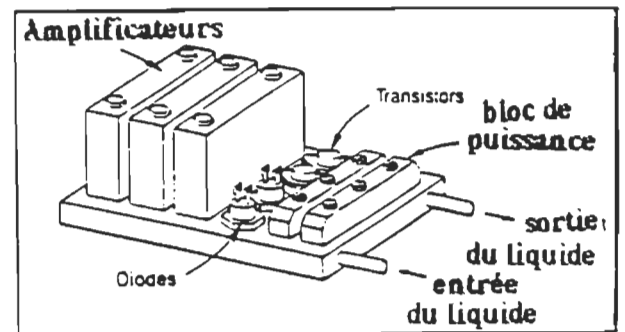
Figure I. 3 : Thyristors refroidis par évaporateur

D'autres techniques utilisent le refroidissement par air ou par liquide comme le montrent respectivement les figures I.4 et I.5 [6].

A partir de ces modèles , les concepteurs-créateurs peuvent envisager le potentiel d'un ensemble de composants très denses et générant de la chaleur .



**Figure I. 4 : Refroidissement
par air**



**Figure I . 5 : Refroidissement
par liquide**

Les liquides fluides Fluorinert fabriqués par la compagnie 3M sont des refroidissants diélectriques . Ils peuvent être mis soit en contact direct avec les composants à refroidir ou dans des sachets de plastique installés sur les

composants en question.

La figure I.6 montre plusieurs modules de cartes électroniques immergés dans du FC-72 de la série des fluorinerts [14].

Le refroidissement de ces modules est basé sur le concept thermosiphon fonctionnant par gravité. C'est un moyen de refroidissement simple . Il ne fait appel ni aux pompes coûteuses ni à un système de tuyauterie complexe [14].

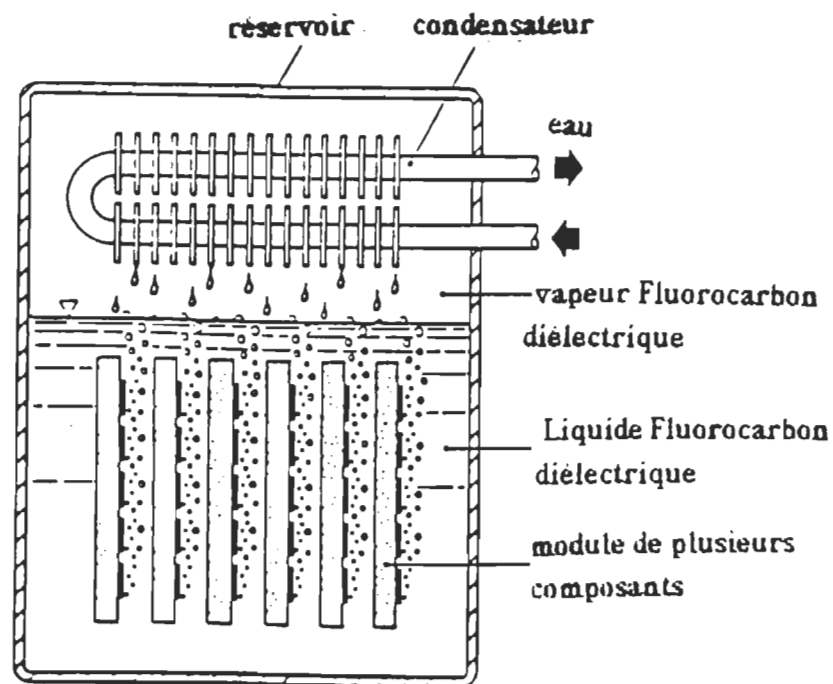


Figure I . 6 : Modules de cartes électroniques immergés dans du FC-72

Le refroidissement du type **thermoélectrique** est basé sur le principe de dégagement de chaleur d'une jonction semiconductrice à une autre . C'est un moyen qui utilise l'énergie électrique plutôt qu'un réfrigérant [7] . Il est principalement utilisé dans le refroidissement d'appareils scientifiques [7].

Une autre application des thermoélectriques est celle du refroidissement des systèmes d'ordinateurs et de composants électroniques [7].

Le refroidissement thermoélectrique n'exige aucun des équipements conventionnels nécessaires dans un système de vapeur . L'unité de réfrigération ne contient pas de compresseur , d'évaporateur , de condensateur ou de réfrigérant . C'est une unité silencieuse [7].

La figure I.7 montre le schéma du circuit électrique d'alimentation du refroidisseur du type thermoélectrique .

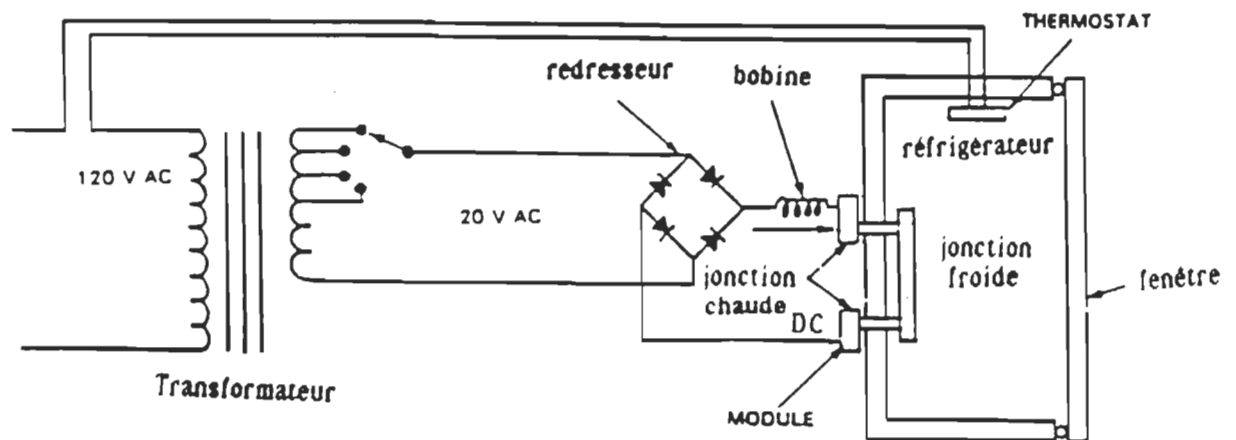
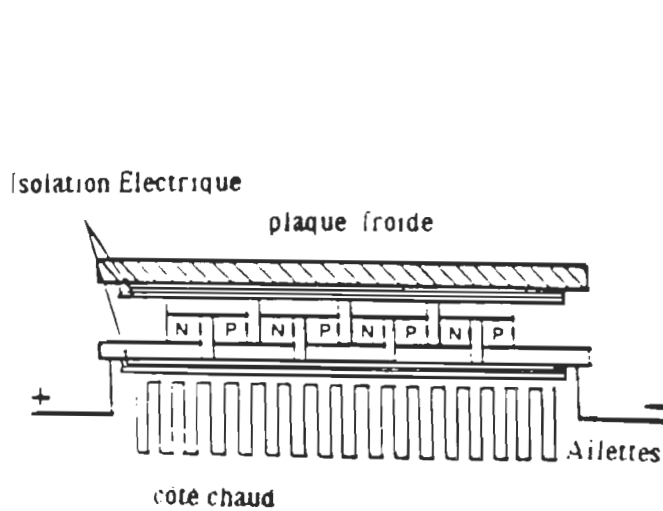


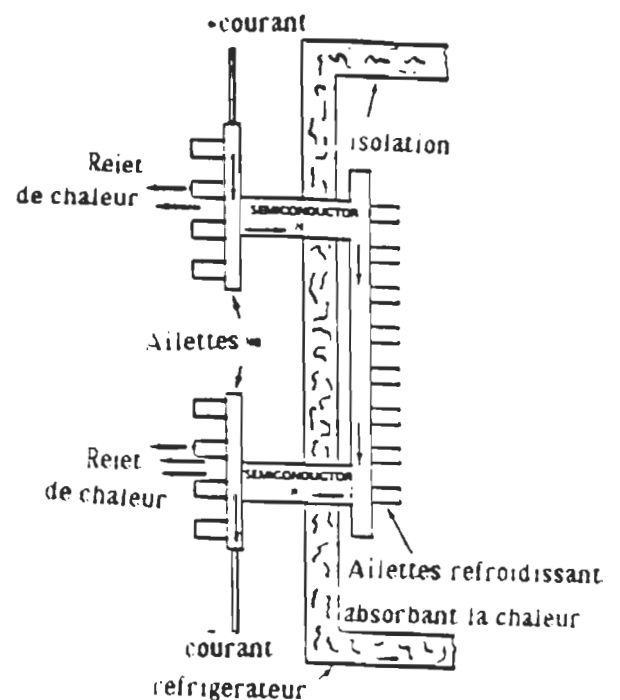
Figure I . 7 : Schéma du circuit électrique d'alimentation du refroidisseur du type thermoélectrique .

Les unités de refroidissement thermoélectriques sont appelés modules . Chaque module est constitué par l'association en série de plusieurs jonctions chaudes et froides . Le schéma d'un tel module est représenté à la figure I. 8 .

P et N sont les jonctions semiconductrices des unités thermoélectriques . La figure I.9 montre le mode de liaison du module au réfrigérateur [7] . Le sens de circulation du courant dans le module déterminé si la jonction est chaude ou froide [7].



**Figure I . 8 : Schéma du module des
unités de refroidissement
thermoélectriques**



**Figure I . 9 : Schéma du mode de
liaison du module
au réfrigérateur**

CHAPITRE II

THÉORIE DES PHÉNOMÈNES THERMIQUES

II.1 La conduction

La conduction est le seul mécanisme intervenant dans le transfert de chaleur dans un solide homogène , opaque et compact [5].

L'aspect de la conduction de chaleur peut être montré dans un élément solide à une seule dimension où la circulation de la chaleur se fait suivant la direction de l'axe de l'élément . Soit Q le flux de chaleur par unité de temps traversant une section d'aire A et d'abscisse x de l'élément .

La relation qui lie Q à la température T en x est donnée par la loi de Fourier :

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad (II . 1)$$

où k : est la conductivité thermique exprimée en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

La généralisation de la loi de Fourier à un milieu à trois dimensions peut être établie en appliquant cette loi à une seule dimension à un volume élémentaire montré à la figure II.1. Cette application conduit à l'équation en coordonnées cartésiennes de la conduction de la chaleur dans les trois dimensions en régime permanent :

$$\frac{\partial(k_x \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(k_y \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(k_z \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} = -Q \quad (II . 2)$$

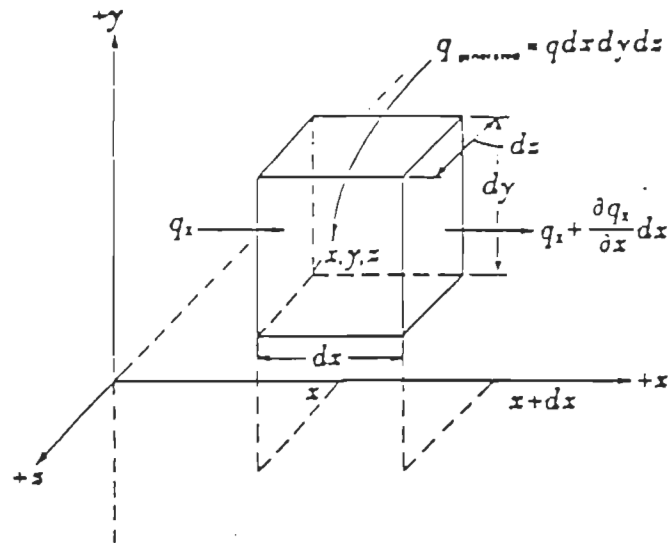


Figure II.1 : Généralisation de la loi de Fourier à une seule dimension à un volume élémentaire .

où Q est la chaleur générée par unité de volume par une source interne.

En régime transitoire , il faut retrancher du flux de chaleur Q transféré à celui stocké dans le volume élémentaire . La chaleur stockée par unité de volume est :

$$\rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II.3)$$

où ρ est la masse volumique et c_p est la chaleur massique à pression constante . Ainsi , l'équation de la conduction de la chaleur en régime transitoire est :

$$\frac{\partial(k_x \frac{\partial T}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(k_y \frac{\partial T}{\partial y})}{\partial y} + \frac{\partial(k_z \frac{\partial T}{\partial z})}{\partial z} = -Q + \rho \cdot c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad (II.4)$$

La résistance thermique , utilisée , découle de l'intégration de la loi de Fourier :

$$dT = -\frac{Q}{k.A} . dx \quad (II.5)$$

$$\int_{T_1}^{T_2} dT = -Q . \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{k.A} \quad (II.6)$$

$$T_2 - T_1 = -Q . R \quad (II.7)$$

Ainsi , la résistance thermique est définie par :

$$R = \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{k.A} \quad (II.8)$$

La résistance thermique s'oppose au passage de la chaleur , elle dépend de la nature chimique du matériau , de la nature de la phase considérée , et de la température .

II.2 La convection:

La convection est le mode de transmission qui implique le déplacement d'un fluide , liquide ou gazeux [5] . On la trouve dans l'échange qui a lieu entre une paroi et un fluide.

La relation de base qui décrit le transfert de chaleur par convection est appelée loi de Newton et s'écrit comme suit:

$$Q = h . A . (T_s - T_\infty) \quad (II.9)$$

où

Q : le flux de chaleur échangée par convection entre l'ambiance et la surface ,

exprimée en Joules ,

h : la conductance spécifique , appelée coefficient de convection , ou coefficient de surface,

A : l'aire perpendiculaire à la direction du flux de chaleur , exprimée en m^2 ,

T_s : la température de la surface considérée ,

T_∞ : la température du fluide " au large " (suffisamment loin de la surface).

Le transfert réel de la chaleur par convection est donnée par :

$$dQ = h \cdot (T_s - T_\infty) \cdot dA \quad (II.10)$$

où h dépend de la forme de la surface , de son orientation et des propriétés du fluide du milieu ambiant , essentiellement de sa vitesse [5] .

II.3 Le rayonnement :

Le rayonnement thermique est le mode de transmission par lequel la chaleur passe d'un corps à haute température à un autre , plus froid ; les deux corps ne se touchent pas , mais ils sont séparés par un milieu transparent tel l'air , ou le vide [5].

La loi de Stephan- Boltzmann constitue la loi fondamentale du rayonnement thermique :

$$Q = \sigma \cdot A \cdot T_1^4 \quad (W) \quad (II.11)$$

Cette relation exprime que le flux d'énergie radiante émis par une surface idéale , appelée "noire " , est proportionnel à l'aire de cette surface et à la quatrième puissance de la température absolue T_1 de la surface.

σ : est une constante universelle , qui vaut :

$$5.66697 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4},$$

$$\text{ou } 0.1714 \cdot 10^{-8} \text{ Btu h}^{-1} \text{ ft}^{-2} \text{ R}^{-4}$$

Pour que le phénomène thermique par rayonnement existe entre deux corps , il faut qu'il y ait une différence de température entre leurs surfaces . L'équation d'échange dans un cas particulier très simple où on a un corps noir d'aire A_1 , de température T_1 et enfermé dans une enceinte portée à une température T_2 et également noire est [5] :

$$Q = \sigma \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II.12})$$

Dans le cas général [2]

$$q = \sigma \cdot F_{1-2} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (\text{II.13})$$

où F_{1-2} est un facteur de forme qui tient compte , à la fois , du fait que les surfaces envisagées ne sont pas noires et de la géométrie du système .

Pour tout corps noir ou non noir , on définit la conductance thermique spécifique par :

$$h_r = \frac{\sigma \cdot F_{1-2} \cdot A_1 \cdot (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad (\text{II.14})$$

où T_1 et T_2 sont exprimées en K .

CHAPITRE III

SYSTEMES DE REFROIDISSEMENT

III.1 Introduction :

Les systèmes de refroidissement peuvent être divisés en deux groupes, à savoir les dispositifs classiques tels que les ventilateurs, les ailettes de refroidissement ou des dispositifs plus spéciaux tels que les caloducs , les liquides fluides de plus en plus utilisés dans les branches de l'électronique , les systèmes à effet Peletier et autres .

III. 2 Fentes de ventilation

Les fentes d'aération sont conçues pour créer un courant d'air par convection naturelle afin d'aérer la partie intérieure de la boîte dégageant le maximum de chaleur. Ces fentes peuvent aussi servir pour la ventilation forcée à l'intérieur d'un équipement électronique. Cette ventilation s'effectue selon le mode d'écoulement du fluide . On distingue deux modes de convection, la convection forcée et la convection libre ou naturelle.

La convection forcée: C' est celle dans laquelle le mouvement du fluide est dû à l'action d'une pompe, d'un ventilateur ou d'une cheminée placée dans le circuit [5]. La figure III.1 montre un châssis électronique refroidi par convection forcée. Les performances thermiques d'un tel dispositif sont données sur la figure III.2 .

La convection naturelle (ou libre): C'est celle dans laquelle le mouvement du fluide est créé par des différences de densité, celles-mêmes dues à des différences de température existant dans le fluide [5].

Le contact d'une surface solide chaude avec un fluide froid immobile , provoque ce type de convection . La différence de température amènera un échange de chaleur entre la surface chaude et le fluide . L'échauffement de ce dernier s'accompagnera d'une diminution de masse volumique et une partie du fluide s'animerà peu à peu d'un mouvement vertical ascendant .

On retrouve dans plusieurs applications industrielles ce mode de transfert de chaleur . Par exemple , dans les échanges de chaleur où deux fluides en mouvement , séparés par une paroi solide s'échange de l'énergie [6] .

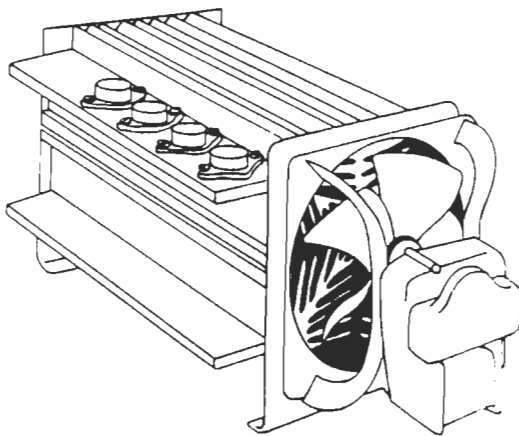


Figure III.1 : Châssis électronique refroidi par ventilateur [1] .

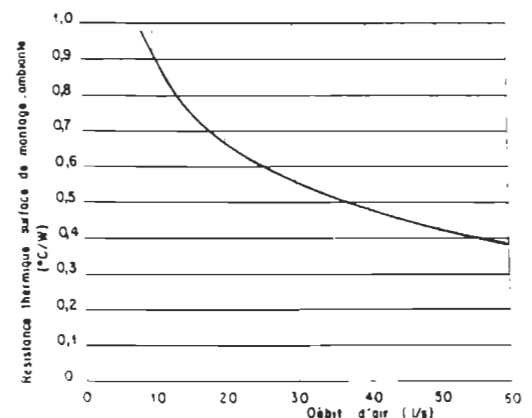


Figure III.2 : Performances thermiques du châssis refroidi par convection forcée [1]

III. 3 Les ventilateurs

L'organe le plus important dans un dispositif de refroidissement par convection forcée est le ventilateur. Les ventilateurs utilisés pour le refroidissement du matériel électronique sont de trois types principaux [1]:

- les ventilateurs centrifuges.
- les ventilateurs à hélice.
- les ventilateurs à débit axial.

La figure III.3 représente l'emploi de deux ventilateurs dans le but d'évacuer la chaleur produite par les composants électroniques fixés dans les cartes de circuits imprimés .

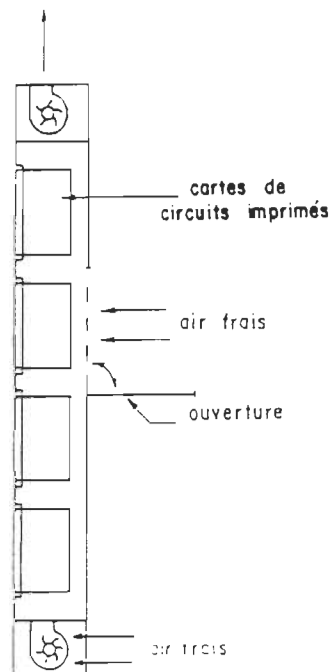


Figure III. 3 : Cartes de circuits imprimés refroidis par convection forcée avec les ventilateurs [1] .

III. 3.1 Performances des ventilateurs

Les performances d'un ventilateur dépendent de trois règles . Ces règles expriment la relation existant entre le débit , la pression statique et la puissance d'une part à la vitesse de rotation de l'axe, la densité du fluide et le diamètre du ventilateur . Ces règles sont données dans le tableau III .1 suivant:

Règle 1	<ul style="list-style-type: none"> - Le débit varie avec la puissance première - La pression statique varie avec le carré - La puissance varie avec le cube 	} de la vitesse de rotation de l'axe
Règle 2	<ul style="list-style-type: none"> - Le débit ne dépend pas - La pression statique varie avec la puissance première - La puissance varie avec la puissance première 	} de la densité du fluide
Règle 3	<ul style="list-style-type: none"> - Le débit varie avec le carré - La pression statique ne dépend pas - La puissance varie avec le carré 	} du diamètre du ventilateur

Tableau III . 1 : Règles des performances d'un ventilateur.

Le ventilateur, pour assurer un certain débit dans un conduit, doit vaincre une perte de pression liée au débit et à la géométrie du conduit, il devra donc imposer une certaine pression statique . Ses performances peuvent être représentées par une courbe donnant le débit volumique gazeux en fonction de la pression statique comme montré à la figure III . 4 .

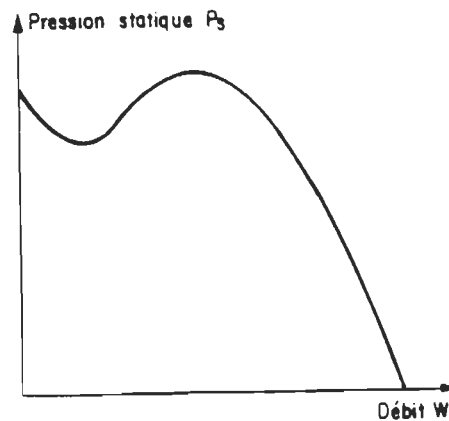


Figure III . 4 : Courbe caractéristique d'un ventilateur [1-p192] .

Quand le conduit est fermé, le débit est nul et la pression statique est maximum, quand il n'y a pas de conduit, la pression statique est nulle. Entre ces deux limites il existe un point de la courbe pour lequel le fonctionnement du ventilateur est optimum, c'est-à-dire pour lequel l'efficacité du ventilateur, représentée par le rapport de la puissance qu'il produit à la puissance qu'il absorbe , est maximum . Ce point se situe, en général, vers le milieu de la courbe . A ce maximum d'efficacité, les performances des différents types de ventilateurs peuvent être comparées à l'aide de leur vitesse spécifique N_s définie par la relation [1-p164]:

$$N_s = N \frac{W^{0.5}}{P_s^{0.75}} \quad (III.1)$$

dans laquelle : N est la vitesse de rotation de l'axe [tr/mn]

W le débit volumique d'air [l/s]

P_s la pression statique [m d'eau].

La vitesse spécifique d'un ventilateur est en général comprise dans une certaine gamme , autrement dit , pour un ventilateur , il existe un nombre limité de combinaisons entre la pression statique et le débit donnant un

maximum d'efficacité . La figure III.5 donne les gammes de vitesses spécifiques des trois principaux types de ventilateurs .

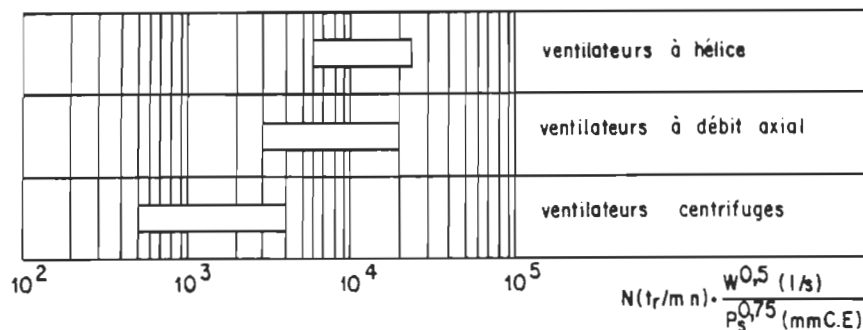


Figure III.5 : Gammes des vitesses spécifiques des principaux types de ventilateurs [1-p192] .

La vitesse spécifique détermine le type de ventilateur le plus efficace pour une application particulière compte-tenu des paramètres concernant le débit d'air , la pression statique et la vitesse de rotation de l'axe . Deuxième facteur auquel il faut tenir compte c'est le débit volumique W nécessaire pour le refroidissement d'un équipement électronique dissipant un flux de chaleur Q . Ce débit peut être calculé à partir de la relation suivante, [1-p165]:

$$\Delta T = \frac{Q}{\rho C_p W} \quad (\text{III. 2})$$

ou ρ : densité de la masse d'air [kg/m³].

C_p : chaleur spécifique à pression constante [J/g °C] .

Cette relation permet de calculer le débit volumique W d'air nécessaire au refroidissement avec une différence de température donnée ; elle s'écrit pour

de l'air à pression atmosphérique, [1-p165]:

$$W\left(\frac{l}{s}\right) = 830 \frac{Q(kW)}{\Delta T(^{\circ}C)} \quad (III.3)$$

Un troisième facteur à prendre en considération dans le choix d'un ventilateur, c'est la vitesse de rotation de l'axe. La vitesse autorisée dépend de l'alimentation électrique disponible, des exigences de durée, des limitations de bruit, du poids et de l'encombrement.

III. 4 Les ailettes de refroidissement

Les ailettes de refroidissement sont utilisées pour augmenter la surface d'échange d'un composant dissipant de la chaleur [1]. Elles peuvent prendre différentes formes: rectangulaires, paraboliques, hyperboliques ou cylindriques. La forme la plus généralement rencontrée est celle à ailettes rectangulaires verticales. Les échanges de chaleur par convection naturelle sont les mieux réalisés à l'aide de plaques verticales hautes mais pour des raisons d'encombrement on préfère généralement utiliser des plaques verticales plus courtes que l'on groupe en rangées parallèles (figure III.6).

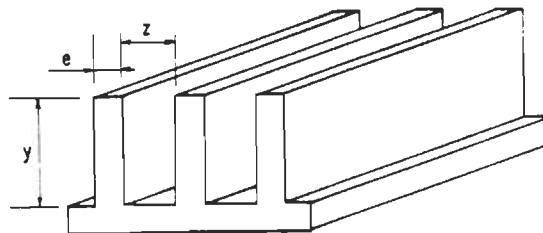


Figure III.6 : Ailette de refroidissement [1].

La figure III.7 montre quelques types de radiateurs sur lesquels sont fixés des composants électroniques de puissance .

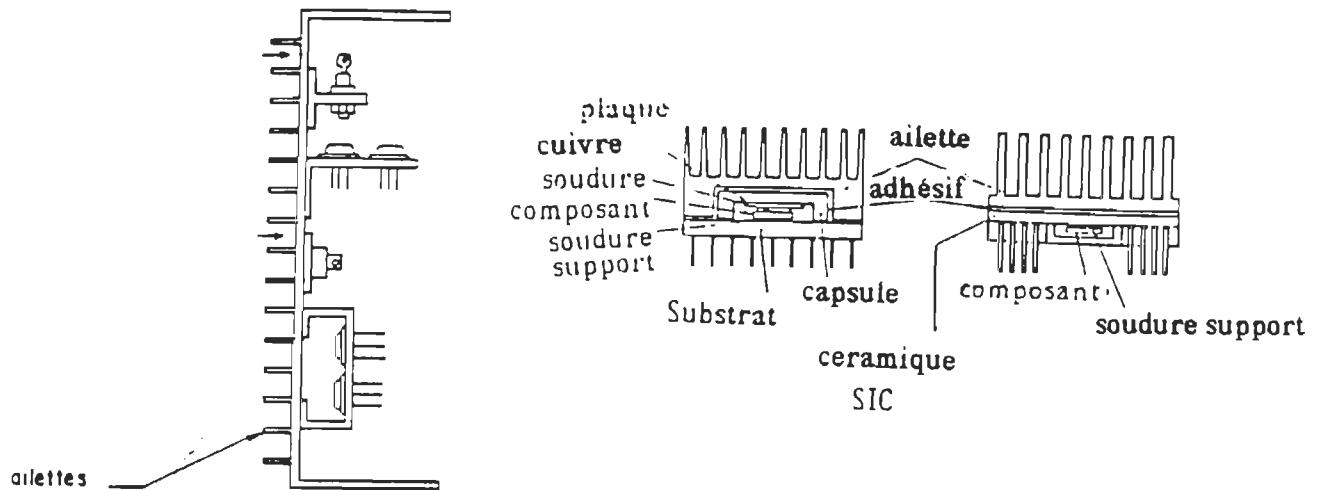


Figure III.7 : Types de radiateurs refroidissant des composants électroniques

III.4.1 Performances des ailettes de refroidissement

Avant de retracer la méthode de calcul de l'efficacité d'une ailette , écrivons la relation suivante, [1-p173]

$$Q = \eta u A (T_s - T_a) \quad (III.4)$$

Cette relation exprime le flux de chaleur transféré à partir de la surface d'une ailette vers l'air ambiant l'entourant et jouant le rôle de puits de chaleur dans laquelle:

T_a : est la température ambiante.

T_s : la température de surface de l'ailette .

A: sa surface .

U: le coefficient d'échange global par convection et rayonnement et η , l'efficacité de l'ailette à maintenir son extrémité à la température T_s de base. Si l'ailette est isotherme , son efficacité est maximale et l'équation de transfert de chaleur se réduit à la forme générale, [1-p173]

$$Q = u A (T_s - T_a) \quad (III. 5)$$

L'efficacité d'une ailette peut être calculée à l'aide de la courbe de la figure III.8 .

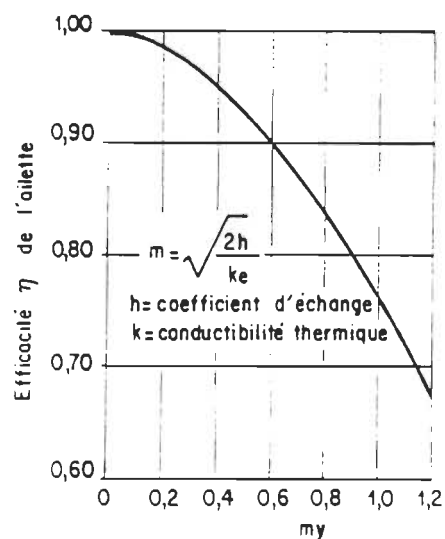


Figure III.8 : Efficacité d'une ailette de refroidissement [1].

par un calcul tenant compte de la conduction de la chaleur dans l'épaisseur de l'ailette[1-p198] . L'utilisation de cette courbe nécessite la connaissance ou l'estimation de la hauteur y et de l'épaisseur e de l'ailette , de la conductivité thermique k du matériau la constituant et des coefficients d'échanges h par convection et rayonnement mis en jeu . Du point de vue des échanges thermiques par rayonnement les ailettes forment une sorte de cavité autour

de la surface sur laquelle elles sont fixées . En négligeant l'épaisseur des ailettes , la surface rayonnante peut alors être considérée comme étant la surface comprise entre deux ailettes , le facteur total d'émission X de cette surface étant augmenté par la présence des ailettes verticales .

Après cette analyse, on exposera une brève théorie du radiateur refroidissant les éléments électroniques de puissance du convertisseur faisant objet de notre étude.

Analyse du radiateur du convertisseur étudié

Le radiateur utilisé dans notre étude expérimentale est celui présenté à la figure III.9 sous forme d'une coupe transversale . Pour faire l'analyse théorique concernant le transfert de chaleur de ce radiateur [2] , on considère une ailette parallélépipède mince et liée à la paroi mère du radiateur comme l'indique la figure III.10 . Soient A l'aire de sa section transversale , p le périmètre de cette section , h le coefficient de convection entre cette ailette et l'air du milieu ambiant et T_0 la température de la paroi mère qui est à la base de l'ailette .

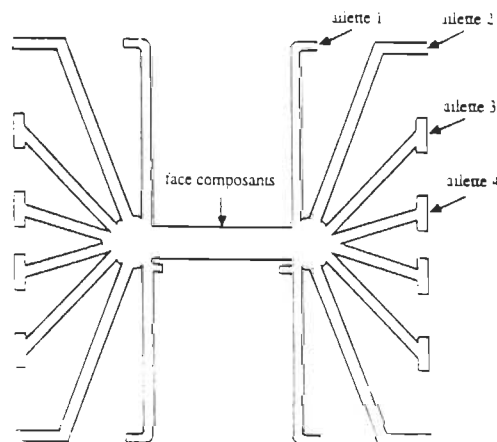


Figure III.9 : Coupe transversale du radiateur [2] .

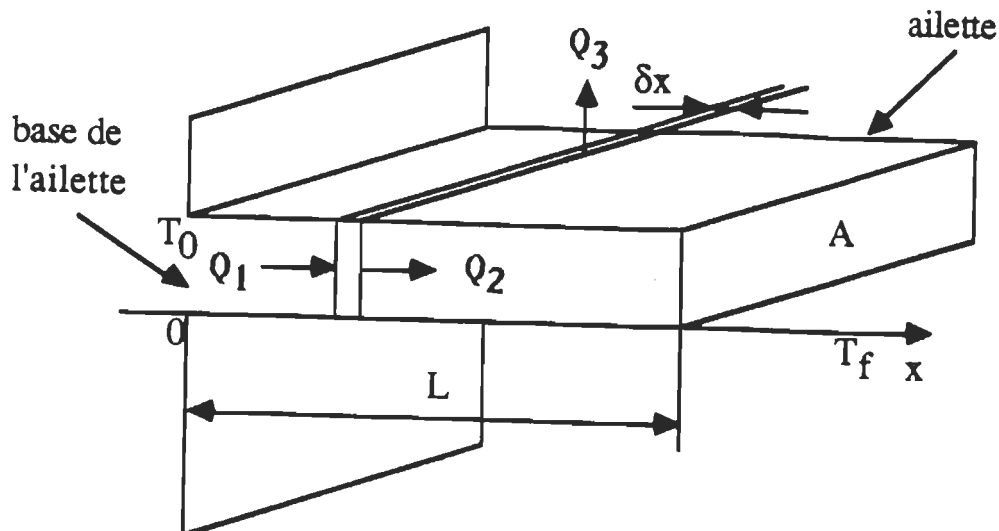


Figure III.10 : Schématisation du transfert de chaleur à travers une ailette [2].

Le bilan énergétique dans une section transversale à l'abscisse x et de largeur δx est :

$$Q_1 - Q_2 + Q_3 \quad (III.6)$$

où Q_1 est la quantité de chaleur entrante et transférée par conduction dans cette section, Q_2 est celle sortante par conduction de cette section, et Q_3 est la quantité de chaleur échangée avec le milieu ambiant. Le bilan (III.6) peut être réécrit sous la forme développée suivante [2] :

$$-k.A\left(\frac{dT}{dx}\right)_x = -k.A\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x+\delta x} + h.p.\delta x(T_m - T_f) \quad (III.7)$$

Où

T_m : est la température moyenne de l'élément considéré et

T_f : est la température ambiante.

La relation (III.7) est équivalente à la suivante :

$$\frac{\left(\frac{dT}{dx}\right)_{x+\delta x} - \left(\frac{dT}{dx}\right)_x}{\delta x} - \frac{h.p}{k.A} (T_m - T_f) = 0 \quad (\text{III.8})$$

En faisant tendre δx vers zéro, on a :

T_m tend vers T et (III.8) devient :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{h.p}{k.A} (T - T_f) = 0 \quad (\text{III.9})$$

On pose : $v = T - T_f$ et $m^2 = h.p / (k.A)$

L'équation (III.9) s'écrit :

$$\frac{d^2 v}{dx^2} - m^2 v = 0 \quad (\text{III.10})$$

La solution de cette équation est :

$$v = C_1 \cdot \exp(m.x) + C_2 \cdot \exp(-m.x) \quad (\text{III.11})$$

En tenant compte des conditions aux limites : $v = v_0 = T_0 - T_f$, pour $x=0$ et

$dv/dx = -h.A.v/k$, pour $x=L$, et en posant : $H = h.A / (k.m)$

La solution de l'équation (III.10):

$$v = v_0 \cdot \frac{\text{ch}(m.(L-x)) + H.\text{sh}(m.(L-x))}{\text{ch}(m.L) + H.\text{sh}(m.L)} \quad (\text{III.12})$$

La quantité de chaleur dissipée par l'ailette est :

$$q = \int_0^L h.p.(T - T_f) dx \quad (\text{III.13})$$

Cette quantité de chaleur est aussi celle traversant par conduction la section à l'abscisse $x = 0$, soit :

$$q = -k.A \left. \frac{dT}{dx} \right|_x = 0 \quad (\text{III.14})$$

$$q = k.A.v_0 \frac{m.\text{sh}(m.L) + H.m.\text{ch}(m.L)}{\text{ch}(m.L) + H.\text{sh}(m.L)} \quad (\text{III.15})$$

La paroi mère munie de cette ailette se comporte comme si elle n'avait pas cette ailette et si elle avait un coefficient de convection latérale h_{1i} tel que :

$$q = h_{1i} \dot{A} (T_0 - T_f) \quad (\text{III.16})$$

En tenant compte de l'expression (III.15) , le coefficient de convection équivalent est :

$$h_{1i} = k.m \frac{\dot{A} \text{sh}(m.L) + H.\text{ch}(m.L)}{\dot{A} \text{ch}(m.L) + H.\text{sh}(m.L)} \quad (\text{III.17})$$

Où , \dot{A} est la section de la paroi mère . Si on a n ailettes liées à la même paroi mère , le coefficient de convection équivalent à l'ensemble est :

$$h_1 = \sum_{i=1}^n h_{1i} = \sum_{i=1}^n k.m_i \frac{\dot{A}_i}{\dot{A}} \frac{\text{th}(m_i.L_i) + H_i}{1 + H_i.\text{th}(m_i.L_i)} \quad (\text{III.18})$$

Étant donné que la valeur de H_i est négligeable devant les autres termes , h_1 peut être approximé par :

$$h_1 = \sum_{i=1}^n h_{1i} = \sum_{i=1}^n k.m_i \frac{\dot{A}_i}{\dot{A}} . \text{th}(m_i.L_i) \quad (\text{III.19})$$

III.5 Systèmes de refroidissement par ébullition nucléée

Dans les systèmes de refroidissement du matériel électronique par ébullition nucléée on utilise en général un condensateur et un liquide choisi

pour ses propriétés diélectriques et son point d'ébullition à pression atmosphérique. Le phénomène d'ébullition nucléée d'un liquide au voisinage d'une surface est un moyen de refroidissement exploré à l'heure actuelle pour résoudre les problèmes posés par l'accroissement de la puissance dissipée dans les circuits intégrés et par l'augmentation des densités de puissance mises en jeu dans les équipements à taux d'occupation volumique élevé.

III. 5.1 Mécanisme de l'ébullition nucléée :

La théorie sur le mécanisme de l'ébullition nucléée évoque que le gaz absorbé dans les cavités de la surface chauffée sert de germes aux bulles de vapeur . Pour qu'à partir de ce germe , une bulle de vapeur puisse se développer il faut que sa pression interne P_v soit supérieure à la pression P_l du liquide l'entourant . Dans le cas d'une bulle sphérique , une relation entre ces deux pressions peut être écrite en égalant les forces hydrostatique et superficielle[1]:

$$P_v - P_l = \frac{4\omega}{D} \quad (III.20)$$

ω : étant la tension superficielle entre le liquide et sa vapeur .

D : diamètre de la bulle.

Au voisinage de la température de saturation T_s on peut considérer que les variations de pression avec la température sont données par la relation de Clausius-Clapeyron :

$$\frac{\Delta P}{\Delta T} = \frac{p_v}{T_s} \frac{E_{lg}}{T_s} \quad (III.21)$$

E_{lg} : étant l'enthalpie de vaporisation et ρ_v la masse volumique de la vapeur saturante.

Les équations (III.20) et (III.21) peuvent être combinées pour donner la valeur de la surchauffée ΔT nécessaire à la formation d'une bulle :

$$\Delta T = T - T_s = \frac{4 \omega T_s}{D \rho_v E_{lg}} \quad (\text{III. 22})$$

III. 6 Liquide-fluide Fluorinert

Les liquides électroniques Fluorinert sont des séries de refroidissants diélectriques très efficaces , développés spécialement pour rencontrer les demandes d'effort largement diversifiées dans l'industrie de l'électronique . Les liquides Fluorinert sont clairs , sans odeur , relativement denses et possédant une viscosité basse . La différence majeure entre eux est liée directement à leur point d'ébullition variant de 56° C à 253° C . Dans le chapitre V , on montre quelques exemples d'utilisation de ces refroidissants .

III.6.1 Transfert de chaleur par convection naturelle:

Les coefficients de transfert de chaleur sont généralement évalués empiriquement . Cependant , ils peuvent être calculés par une première approximation par des corrélations généralisées.

Ces corrélations s'écrivent comme suit [10] :

$$\mathbf{X} = \mathbf{a} \mathbf{Y}^{\mathbf{m}} \mathbf{Z}^{\mathbf{n}} \quad (\text{III.23})$$

où X , Y , et Z sont des groupes adimensionnels et a , m , et n sont des constantes qui dépendent de la géométrie des surfaces, l'orientation et le degré de la turbulence des fluides.

En convection naturelle, la densité du fluide change avec la température, et avec les forces verticales résultantes qui causent leur circulation. Les groupes adimensionnels dans l'application des corrélations de transfert de chaleur sont : les nombres de Nusselt, Grashof, et Prandtl [6].

L'équation (III. 23) prend la forme :

$$N_{Nu} = a (N_{Gr})^m (N_{Pr})^n \quad (III.24)$$

ou

$$\frac{hL}{k_f} = a \left(\frac{L^3 \rho_f g \beta \Delta t}{\mu_f^2} \right)^m \left(\frac{c_p \mu_f}{k_f} \right)^n \quad (III.25)$$

Les valeurs des constantes dans les équations (III.24) et (III.25) ont été recommandées par Mc Adams pour différents cas où les liquides Fluorinert sont utilisés.

Les exposants m et n ont les mêmes valeurs pour ces corrélations.

Deux équations décrivent toutes les situations.

Pour un degré bas de turbulence, où $N_{Gr} * N_{Pr}$ varie entre 10^4 et 10^9 , dans ce cas l'équation s'écrit comme suit :

$$N_{Nu} = 0.55 (N_{Gr})^{0.25} (N_{Pr})^{0.25} \quad (III.26)$$

Pour un degré élevé de turbulence où $N_{Gr} * N_{Pr}$ varie entre 10^9 et 10^{12} , l'équation est :

$$N_{Nu} = 0.13 (N_{Gr})^{0.33} (N_{Pr})^{0.33} \quad (III.27)$$

III.6.2 Transfert de chaleur par circulation forcée:

Les corrélations généralisées pour le transfert de chaleur en circulation forcée appliqués aussi pour les liquides Fluorinert s'écrivent :

Pour la circulation turbulente à l'intérieur des tubes on a [10] :

$$\frac{hD}{k_b} = 0.023 \left(\frac{DU_{pb}}{\mu_b} \right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)_b^{0.4} \quad (\text{III.28})$$

Pour la circulation normale des liquides autour des cylindres uniques on a [10] :

$$\left(\frac{hD}{k_f} \right) \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^{-0.3} = 0.35 + 0.56 \left(\frac{DU_{pf}}{\mu_f} \right)^{0.52} \quad (\text{III.29})$$

Pour la circulation autour de sphères uniques.

$$\left(\frac{hD}{k_f} \right) \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)_f^{-0.3} = 0.97 + 0.68 \frac{DU_{pf}^{0.50}}{\mu_f} \quad (\text{III.30})$$

III.6.3 Performances des liquides-fluides Fluorinert

Les liquides Fluorinert mènent un transfert de chaleur efficace avec ou sans convection forcée . A cause de leur capacité d'écarter la chaleur assez rapidement , spécialement à ébullition , les liquides Fluorinert conservent les composants à des températures basses et de cette façon réduisent les vitesses des pannes et augmentent la sureté . En même temps , les composants peuvent être enfermés en un ensemble de paquets en vue de maximiser les densités de puissance et minimiser la taille des équipements .

Ce liquide peut être placé dans des sachets de plastique et mis en contact direct avec l'équipement des circuits électroniques . Cette technique va permettre d'utiliser le liquide comme dissipateur de chaleur . On verra dans le chapitre suivant quelques applications dans le domaine de l'électronique.

III.7 Caloduc

Un caloduc est une enceinte fermée , contenant un liquide volatil , dont les parois intérieures sont tapissées d'un matériau poreux . La figure III.11 est une coupe d'un caloduc tubulaire simple . Pendant son fonctionnement , une des extrémités du tube est chauffée , provoquant l'évaporation du liquide , l'autre extrémité est refroidie , provoquant la condensation de la vapeur . La chaleur est transportée par la vapeur , sous forme de chaleur latente de vaporisation , le liquide est ramené en sens inverse par capillarité dans le matériau poreux [1-p199].

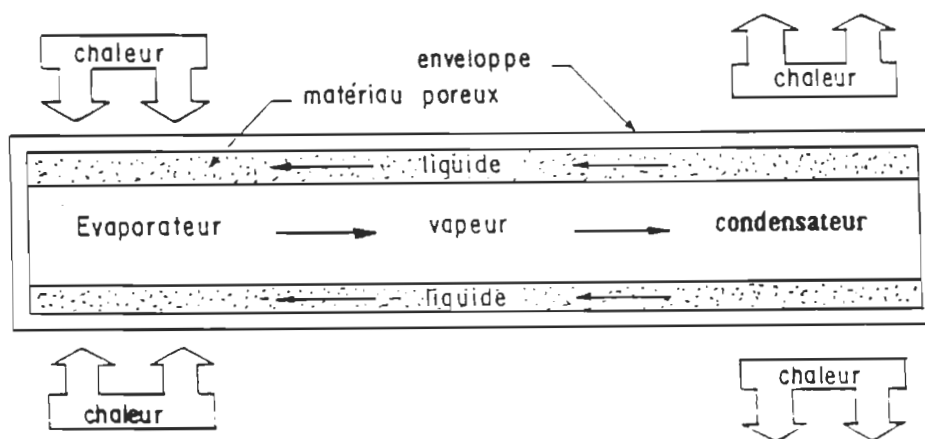


Figure III.11 : Coupe transversale d'un caloduc [1] .

Les caloducs sont de plus en plus utilisés en électronique de puissance, ceci provient du fait que leur résistance thermique est relativement faible ainsi qu'à leur temps de réponse thermique très inférieur à celui des conducteurs solides.

La figure III.12 montre diverses utilisations du caloduc en électronique de puissance.

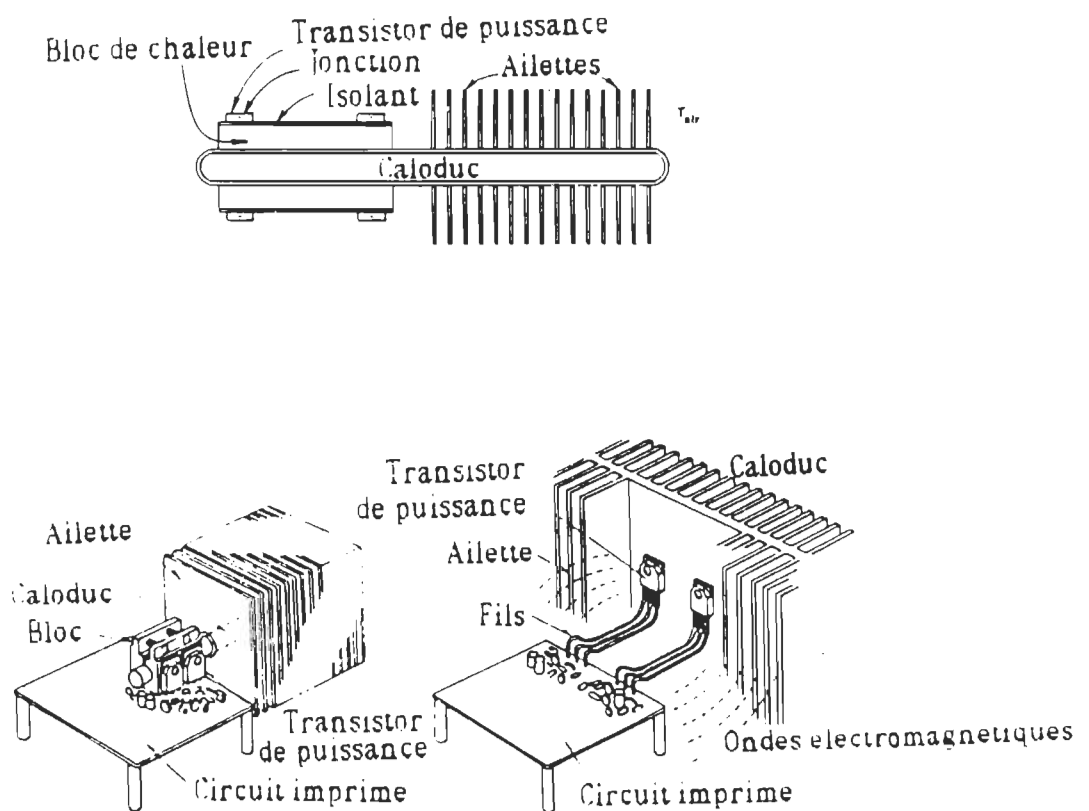


Figure III.12 : Diverses utilisations du caloduc en électronique de puissance.

Au cours du fonctionnement du caloduc , plusieurs mécanismes importants interviennent suivant la valeur maximum de la chaleur à transférer.

On citera ci-dessous les plus importants de ces mécanismes.

III.7.1 La pression capillaire:

La différence de la pression capillaire de l'interface liquide-vapeur , est définie comme suit :

$$\Delta P_c = \Delta P_v - \Delta P_L \quad (\text{III.31})$$

ΔP_c : différence de pression capillaire nette

ΔP_v : chute de pression due à la viscosité qui a lieu dans la phase vapeur.

ΔP_L : chute de pression due à la viscosité qui a lieu dans la phase liquide.

Cette relation est l'équation de LAPLACE-YONG et s'écrit [3]:

$$\Delta P_c = \sigma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{III . 32})$$

où r_1 et r_2 : sont les principaux rayons de courbure et sigma est la tension de surface.

La pression capillaire maximale peut être écrite avec un seul rayon de courbure r_c .

L'expression (III.32) se réduit à :

$$\Delta P_{c,m} = \left(\frac{2\sigma}{r_{ce}} \right) - \left(\frac{2\sigma}{r_{cc}} \right) \quad (\text{III .33})$$

où r_{ce} et r_{cc} représentent les rayons de courbures respectivement dans les régions de l'évaporateur et du condensateur comme montré en figure III.13.

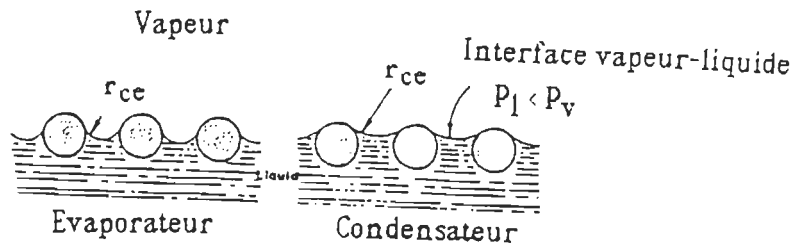


Fig . III.13 : Rayons de courbures des régions de l'évaporateur et du condensateur [3] .

III.7.2 Chute de pression du liquide:

La chute de pression dans un liquide résulte des forces visqueuses qui résistent à la circulation capillaire à travers la mèche [3] .

La chute de pression totale est déterminée par l'équation suivante:

$$\Delta P_l(x) = - \int_0^x \left(\frac{dp_l}{dx} \right) dx \quad (\text{III.34})$$

dp_l/dx : gradient résultant de la pression du liquide à partir du frottement excessif.

Ce frottement excessif , est dû à la contrainte du cisaillement et s'écrit :

$$\frac{dP_l}{dx} = - \frac{2\tau_l}{(r_h, l)} \quad (\text{III.35})$$

où τ_l : est la contrainte du cisaillement causée par le frottement à l'interface du liquide-solide.

et

(r_h, l) : est le rayon hydraulique.

III.7.3 Performances des caloducs

Il faut prendre plusieurs facteurs en considération lors de la conception des caloducs afin d'avoir un bon rendement . En somme , les facteurs comme le poids , la taille , la fiabilité , l'inventaire fluide , doivent tenir compte des trois considérations opérationnelles suivantes lors de la conception des caloducs :

- L'effet de la variation de la température opératoire laquelle est déterminée par le choix du fluide ;
- Le maximum de puissance que le caloduc est capable de transporter , laquelle est déterminée par la capacité de pompage ultime de la structure de la mèche ;
- Le flux de chaleur maximum est déterminé par le point auquel se produit l'ébullition nucléé .

Il est très important de tenir compte aussi de la compatibilité du matériel . Cependant , les réactions chimiques entre le fluide et la paroi ou la structure de la mèche , peuvent être la cause de la formation des gazs noncondensables ou encore des problèmes associés avec la corrosion . A cause de l'effet nuisible du gaz noncondensable dans le fonctionnement du caloduc , on doit être prudent pour le choix du fluide , des mèches et de la paroi en vue d'éviter ces problèmes . A cet effet , les matériaux constituant un caloduc , doivent être compatibles entre eux . Les principaux matériaux utilisés dans leur construction en fonction de la gamme de température d'utilisation sont donnés dans le tableau III.2 suivant :

Domaine de température (°C)	Fluide	Enveloppe
- 200 à - 80	azote liquide	acier inoxydable
- 70 à + 60	amoniac liquide	nickel, aluminium, acier inoxydable
- 45 à + 120	méthanol	cuivre, nickel, acier inoxydable
+ 5 à + 230	eau	cuivre, nickel
+ 190 à + 550	mercure	acier inoxydable
+ 400 à + 800	potassium	nickel, acier inoxydable
+ 500 à + 900	sodium	nickel, acier inoxydable
+ 900 à + 1500	lithium	niobium + 1% zirconium
+ 1500 à + 2000	argent	tantale + 5% tungstène

Tableau III.2 : Les principaux matériaux utilisés en fonction de la gamme de température .

Les matériaux poreux sont de différentes sortes dépendant également du domaine d'utilisation . Les structures des mèches possèdent deux fonctions dans l'opération du caloduc : les deux sont le véhicule et le mécanisme à travers lesquels le fluide est retrouvé à partir du condensateur vers l'évaporateur , et il assure éventuellement que le fluide est distribué sur toute la surface de l'évaporateur . La figure III.14 suivante illustre plusieurs structures des mèches communes actuellement en utilisation .

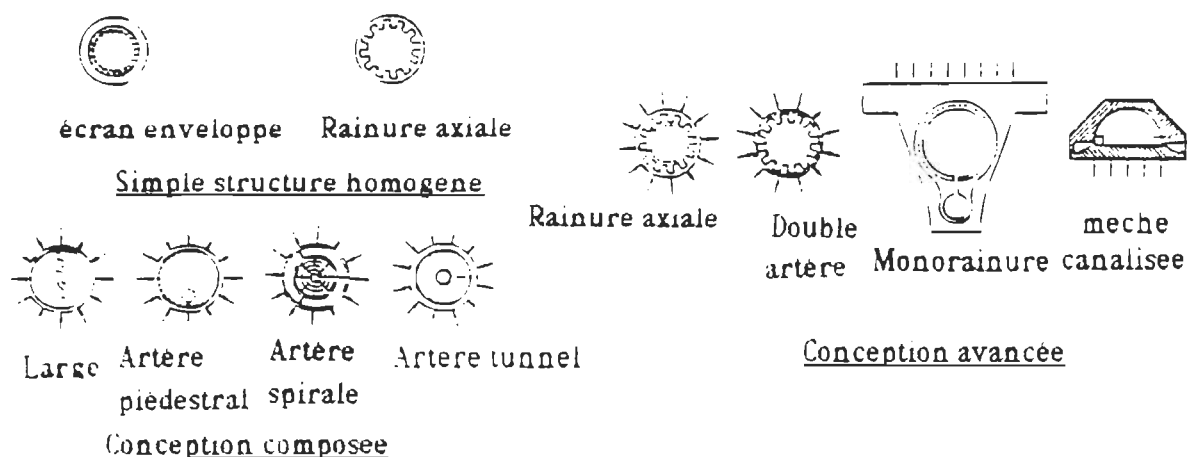


Figure III.14 : Structure des mèches [3-p301] .

Afin de fournir le chemin de circulation avec une résistance de circulation basse à travers lequel le liquide retourne du condensateur à l'évaporateur , une ouverture à structure poreuse avec une perméabilité élevée est désirable .

CHAPITRE IV

QUELQUES APPLICATIONS DANS LE DOMAINE DE L'ÉLECTRONIQUE

IV.1 Utilisation de la ventilation forcée

La ventilation forcée est utilisée pour augmenter le coefficient d'échange . Ce coefficient d'échange peut être augmenté en utilisant , par exemple , un système à air soufflé et aspiré à l'aide de deux ventilateurs , et de conduits convergents comme le montre la figure IV.1 .

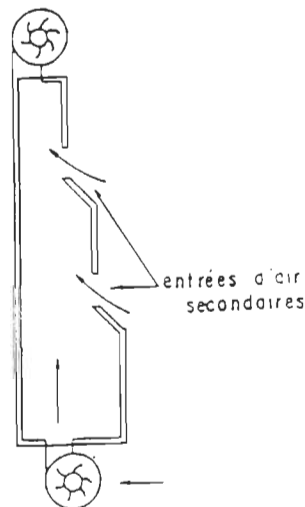


Figure IV.1 : Système à conduits convergents .

IV.2 Les échangeurs thermiques .

Les échangeurs thermiques sont utilisés quand la chaleur produite à l'intérieur d'un équipement électronique ne peut être évacuée par un moyen naturel ou par la mise en mouvement de l'air au contact direct des composants .

Ces appareils refroidissent le courant gazeux le long de son écoulement:

Par exemple des échangeurs thermiques échelonnés le long de l'écoulement permettent d'abaisser le gradient thermique de 40°C à 15°C, figure IV.2.

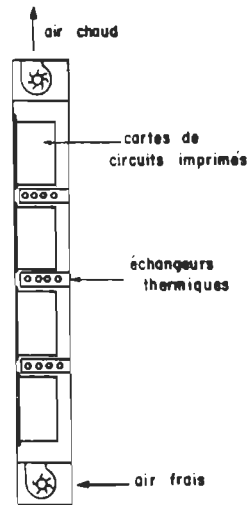


Figure IV.2: Utilisations de ventilateurs et d'échangeurs thermiques.

IV.2.1 Principes de base de conception d'un échangeur thermique

Le calcul d'un échangeur thermique consiste à résoudre par approximations successives un système de trois équations reliant entre-eux les paramètres géométriques et thermiques de l'échangeur .

La première de ces équations , qui tient compte du transfert de chaleur peut s'écrire :

$$Q = U A \Delta T_m \quad (IV.1)$$

avec :

Q : énergie ou flux de chaleur transféré ,

U : coefficient d'échange global ,

A : surface d'échange entre la partie froide et la partie chaude de l'échangeur ,

et ΔT_m : moyenne logarithmique de la différence de température.

Cette moyenne logarithmique de la différence de température est exprimée par la relation :

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\log (\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (\text{IV. 2})$$

dans laquelle ΔT_1 est la différence de température entre les deux fluides à une des extrémités de l'échangeur ,

et ΔT_2 la différence de température à l'autre extrémité de l'échangeur .

Cette grandeur est introduite pour tenir compte du fait que la différence de température entre la partie froide et la partie chaude varie continuellement tout au long de l'échangeur .

L'équation IV.1 donne une indication de la taille de l'échangeur (quantité UA) et de la différence de température nécessaire pour transférer une quantité donnée de chaleur du fluide chaud vers le réfrigérant .

La deuxième équation , qui tient compte de l'absorption de la chaleur par la masse de réfrigérant mise en mouvement , s'écrit :

$$Q = M C_p (T_2 - T_1) \quad (\text{IV. 3})$$

avec

Q : flux de chaleur transféré ,

M : débit massique du réfrigérant ,

C_p : chaleur spécifique à pression constante du réfrigérant ,

T_1 : température du réfrigérant à l'entrée de l'échangeur ,

T_2 : température du réfrigérant à la sortie de l'échangeur .

Le bon fonctionnement de l'échangeur thermique nécessite que les deux équations IV.1 et IV.3 soient simultanément satisfaites .

La troisième équation , qui tient compte de la perte de pression existant dans l'échangeur thermique , sous-entend que la configuration de l'échangeur et le débit de réfrigérant ne peuvent être augmentés indéfiniment afin d'améliorer les performances de l'échangeur thermique [1] .

IV. 3 Équipements électroniques refroidis par conduction

Le refroidissement par conduction est souvent utilisé pour les sous-ensembles électroniques tels que les modules et les cartes de circuits imprimés. Les principaux cas d'équipements électroniques montés directement sur un châssis sont :

- a/ quand il s'agit d'évacuer de fortes densités de flux de chaleur;
- b/ quand le puits de chaleur disponible se présente sous forme d'un courant gazeux ou liquide (aviation et espace);
- c/quand le seul moyen de refroidissement est le rayonnement et la conduction.

Les composants sont alors montés sur le châssis refroidi ou reliés à ce dernier par l'intermédiaire de plaques métalliques. Ainsi, dans le cas de cartes de circuits imprimés comportant un grand nombre de circuits intégrés en boîtiers céramiques , on utilise des bandes métalliques sur lesquelles sont collés les boîtiers, comme le montre la figure IV.3 . Par contre , le refroidissement par

conduction se heurte à des problèmes d'interface. Les cartes de circuits imprimés, les modules et même les composants doivent pouvoir être facilement déconnectés pour être testés, réparés ou même remplacés.

Le refroidissement par conduction prend cependant, à l'heure actuelle, une importance accrue du fait, en particulier, de l'utilisation de plus en plus courante de dispositifs à très faible résistivité thermique [1].

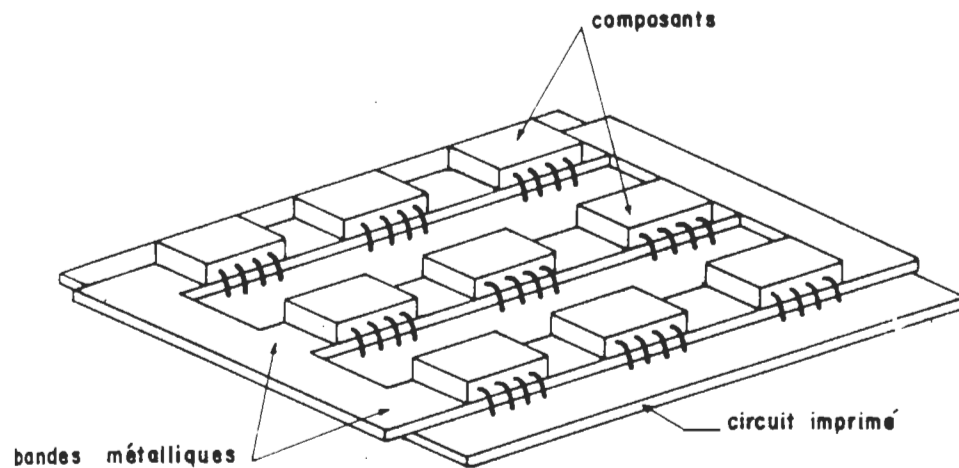


Figure IV.3 : Carte de circuit imprimé refroidi par conduction

IV.4 Autres techniques de convection forcée

a/ Châssis refroidi par jets d'air

La figure IV.4 montre un dispositif qui se compose d'une enceinte dans laquelle de l'air est forcé à l'aide d'un ventilateur monté sur une de ses faces. L'air s'échappe de l'enceinte, sous forme de jets, par une série de trous, pratiqués dans la face opposée, et vient frapper perpendiculairement la surface supportant les composants [1].

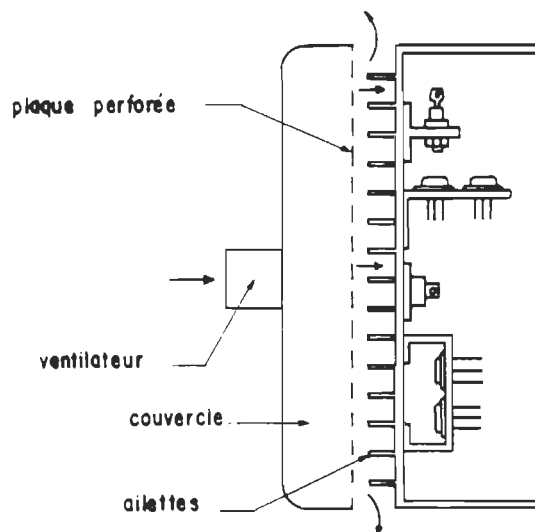


Figure IV.4 : Châssis refroidi par jets d'air sur toute sa surface

b/ Refroidissement par transpiration

Un autre type de dispositif a été mis au point pour améliorer les performances des châssis électroniques en utilisant le refroidissement par transpiration. Ce dispositif est montré en figure IV.5 et se présente sous forme d'une enceinte

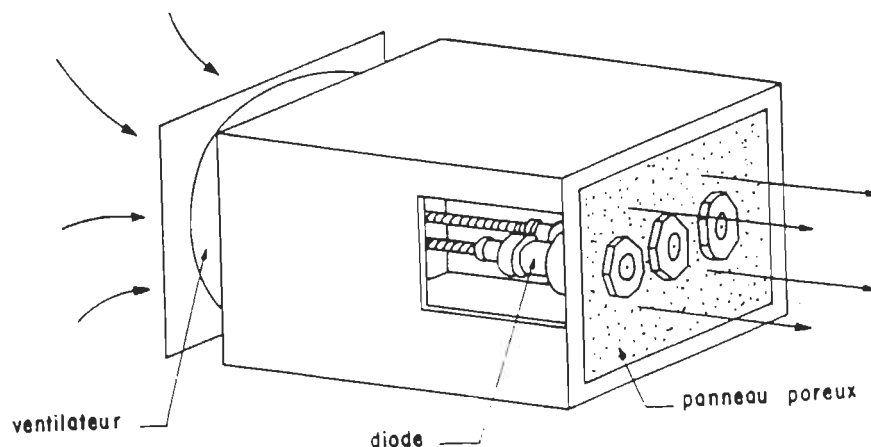


Figure IV.5 : Refroidissement par "transpiration"

dont une ou plusieurs faces sont poreuses et sur lesquelles sont montés les composants. De l'air est forcé dans l'enceinte à l'aide d'un ventilateur et "transpire" vers l'extérieur par les pores. Cette disposition présente les trois avantages suivants:

- une grande surface d'échange entre le metal poreux et l'air,
- la création d'un régime turbulent pour un faible débit total d'air,

-l'isolement thermique de composants voisins.

Ce dispositif présente cependant l'inconvénient d'être facilement colmaté par des poussières et de nécessiter des pressions statiques élevées [1].

IV.5 Refroidissement des composants de puissance par caloduc

Les composants de puissance sont habituellement montés sur des radiateurs augmentant leur surface d'échange par convection avec l'air ambiant. Plus la quantité de chaleur dissipée est importante, plus la surface d'échange doit être grande ce qui, en contre partie, augmente la longueur du chemin de conduction et la valeur de la résistance thermique qui lui est associée. Un caloduc permet d'augmenter la surface d'échange sans apporter de résistance thermique de conduction supplémentaire. Le montage d'un composant de puissance directement sur la surface d'un caloduc n'élimine cependant pas la résistance thermique de contact entre la surface du composant et la surface du caloduc. La figure IV.6 montre un transistor de puissance monté et vissé sur un caloduc plat comportant des plots taraudés [1].

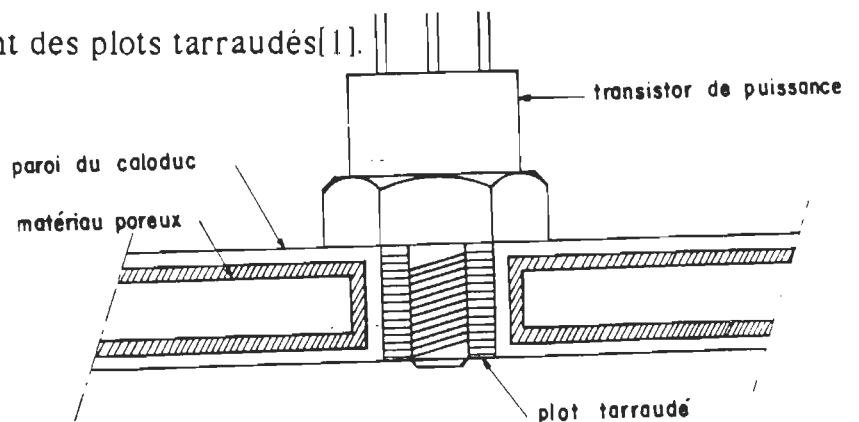


Figure IV.6 : Refroidissement par caloduc d'un transistor de puissance

De même la figure IV.7 représente un dispositif de refroidissement d'une paire de diodes de puissance [1].

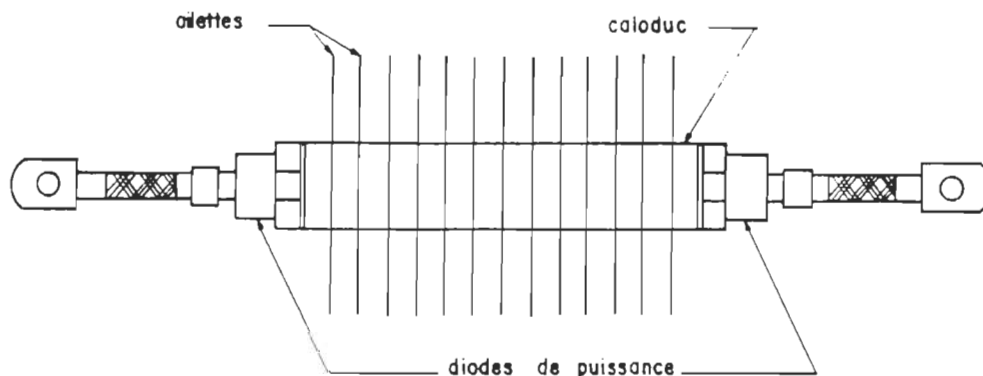


Figure IV.7 : Refroidissement par caloduc d'une paire de diodes

Des caloducs plats peuvent également remplacer les bandes métalliques de conduction disposées sous des rangées de boîtiers céramiques plats. Dans ce genre de montage on peut utiliser des rangées parallèles de caloducs insérés entre deux cartes de circuits imprimés, figure IV.8.

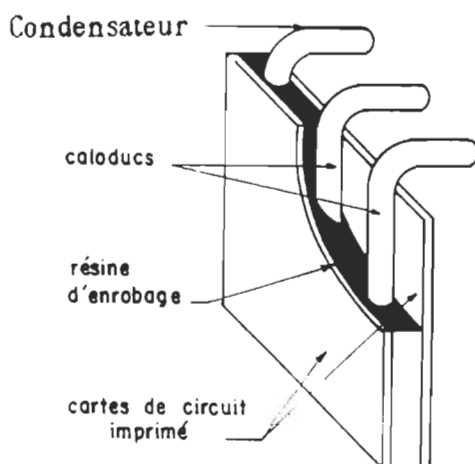


Figure IV.8 : Cartes de circuits imprimés refroidis par caloducs

L'épaisseur même de la carte d'un circuit imprimé peut être conçue comme un

réseau de caloducs figure IV.9.

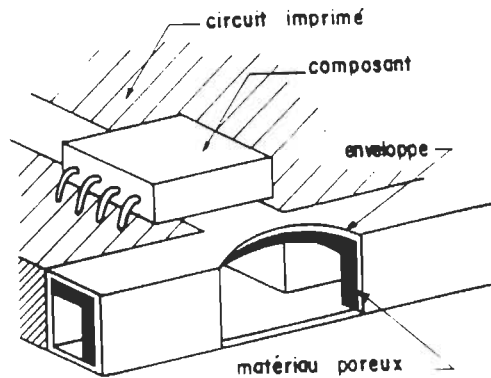


Figure IV.9 : Carte de circuit à structure caloduc

Dans le cas d'un équipement électronique soumis à des variations importantes de température externe, il est intéressant d'utiliser des caloducs à conductivité thermique variable. Cela permet de régler la température d'un équipement électronique monté sur la paroi externe d'un véhicule spatial, figure IV.10.

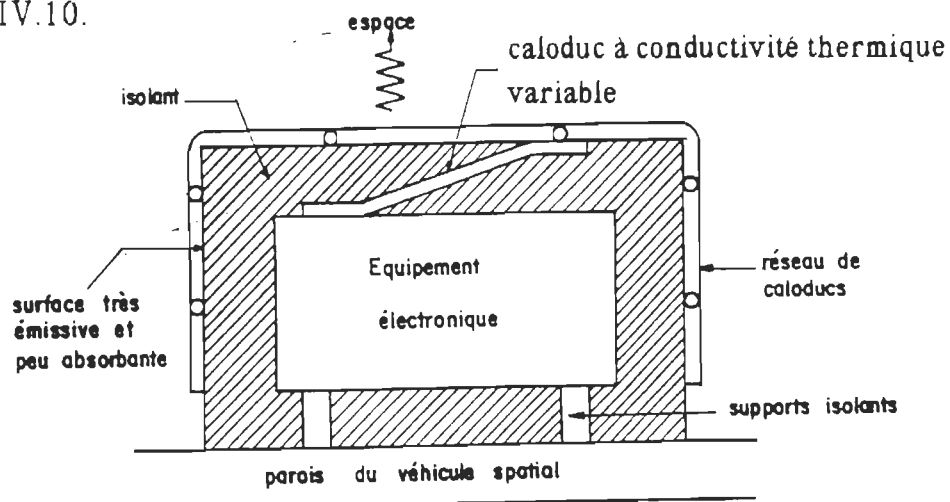


Figure IV.10 : Utilisation d'un caloduc à conductance variable dans un équipement électronique spatial [1] .

Cette disposition permet à la température de l'équipement de rester relativement constante malgré les grandes variations de la température environnante.

IV.6 Exemple d'utilisation du liquide fluorinert comme refroidisseur

La figure IV.11 montre la mise en place d'un sachet de plastique rempli du liquide fluorinert mis en contact direct avec le circuit électronique. La chaleur est conduite par convection naturelle à travers le liquide Fluorinert en direction de la plaque froide dissipatrice de la chaleur afin d'être évacuée. [4].

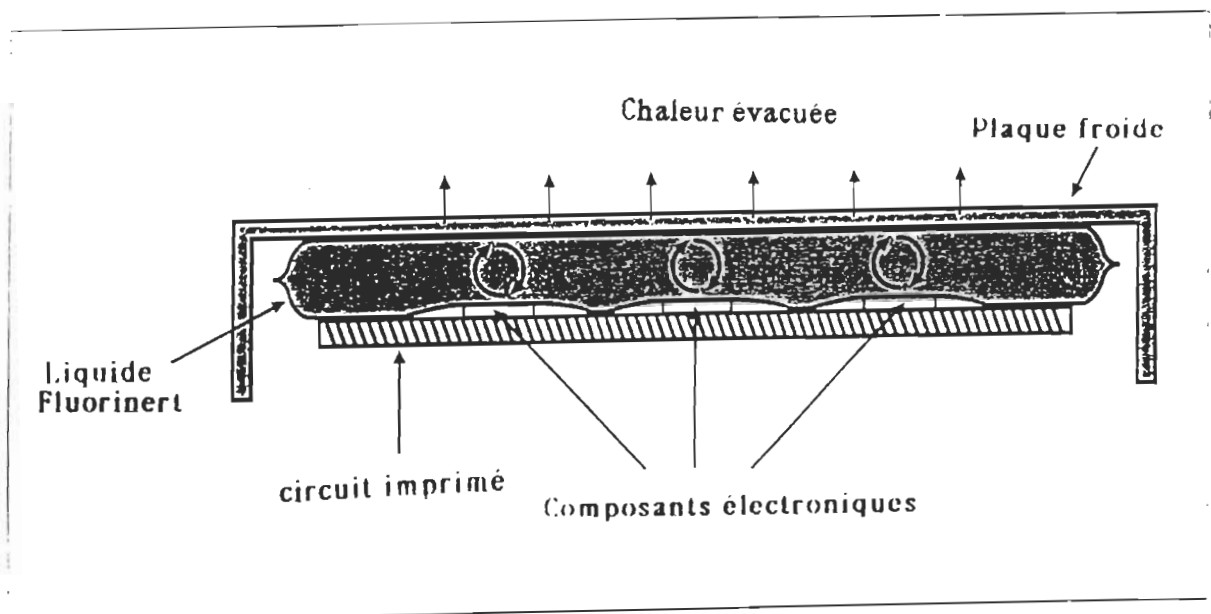


Figure IV.11 : Exemple d'utilisation du liquide fluide Fluorinert comme refroidisseur

La figure IV.12 montre différentes configurations des liquides Fluorinert utilisés comme refroidisseur .

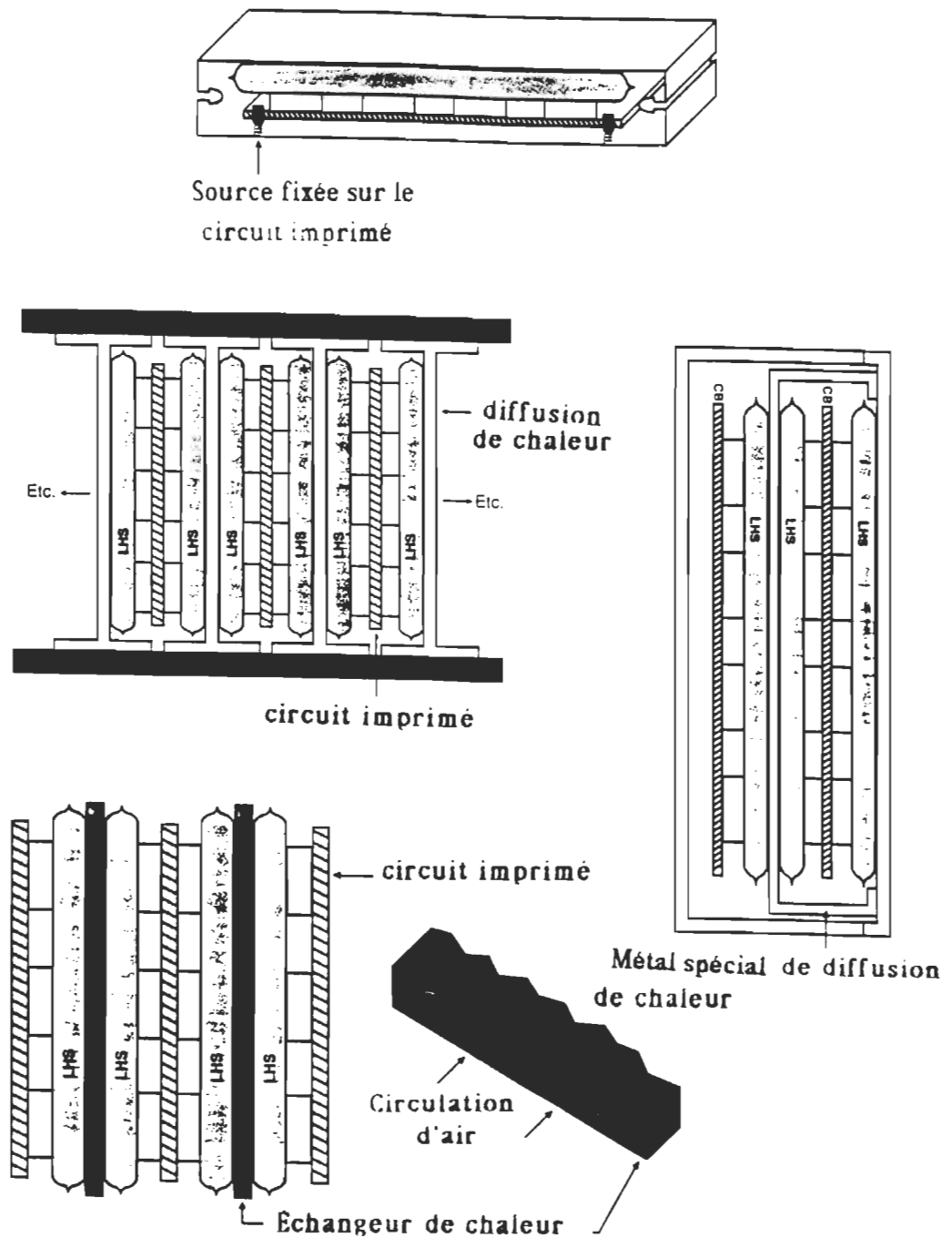


Figure IV.12 : Différentes configurations des liquides Fluorinert utilisés comme refroidisseur .

IV.7 Exemples de divers types de systèmes de refroidissement par ébullition utilisés en électronique

La figure IV.13 représente un système dans lequel la vapeur peut s'échapper à travers une vanne de régulation de pression . Un tel système a un domaine d'utilisation limité car la réserve de réfrigérant est assez rapidement consommée et le niveau du liquide baissant, une partie des composants ne se trouve plus protégée. Les applications pratiques de ce système sont habituellement réservées à certains types d'essais ayant des durées de vie courtes, généralement mesurées en minutes ou en heures.

Une modification de ce système est représenté en figure IV.14.

La plus grande partie de la vapeur est recondensée, une soupape de sécurité permet cependant à une faible quantité de vapeur de s'échapper. L'avantage de ce système réside dans une plus grande autonomie et dans l'utilisation d'un condensateur simple. La majorité des équipements électroniques nécessite un haut niveau de fiabilité et ne peut tolérer un fonctionnement limité dans le temps de son système de refroidissement. Ce dernier doit opérer obligatoirement sans perte de vapeur: les figures IV.15 et IV.16 représentent deux de ces systèmes. Dans le premier, le condensateur est placé au-dessus du liquide, la densité maximale de flux de chaleur qui peut être évacuée est fixée par les caractéristiques du condensateur, la température et la vitesse de son réfrigérant. Dans le second système , le condensateur est immergé dans le liquide , ce système nécessite donc un assez gros volume de liquide. Les réfrigérants diélectriques étant lourds et chers ceci peut présenter des

inconvenients lorsque des considérations de poids et de prix sont mises en jeu. Le système d'ébullition à plusieurs liquides permet de supprimer ces inconvenients. La figure IV.17 représente une densité notablement plus basse et une haute température d'ébullition, [1].

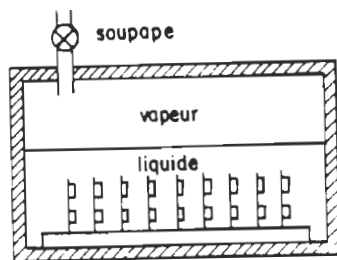


Figure IV.13 Système de refroidissement à échappement libre

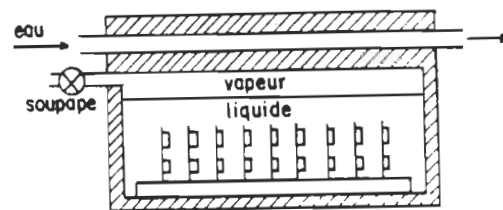


Figure IV.14 Système de refroidissement à échappement limité

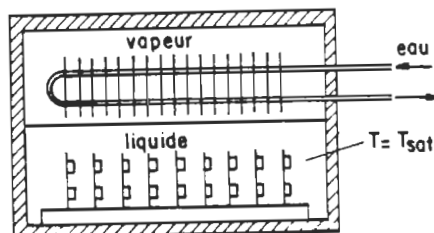


Figure IV.15 Système de refroidissement par ébullition franche

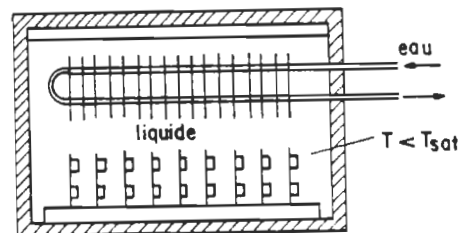


Figure IV.16 Système de refroidissement par ébullition locale

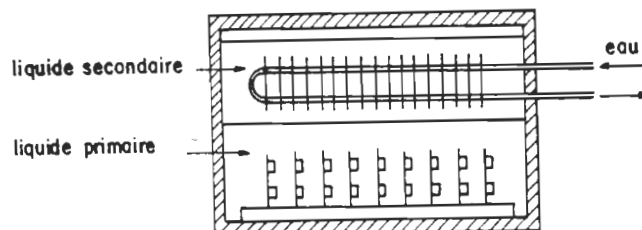


Figure IV.17 Système de refroidissement multifluide

Ces deux liquides immiscibles forment une interface liquide-liquide où une partie des bulles de vapeur se condense ; l'autre partie des bulles se condensant dans le réfrigérant secondaire ou sur l'échangeur immergé . Le phénomène d'ébullition nucléée d'un liquide au voisinage d'une surface est un moyen de refroidissement exploré à l'heure actuelle pour résoudre les problèmes posés par l'accroissement de la puissance dissipée dans les circuits intégrés et par l'augmentation des densités de puissance mises en jeu dans les équipements à taux d'occupation volumique élevé .

IV.7.1 Les applications pratiques du refroidissement par ébullition nucléée

Les applications du refroidissement par ébullition nucléée peuvent être divisées en deux groupes :

1. Les applications en électronique de puissance ,
2. Les applications en microélectronique .

IV.7.1.1 Applications pratiques en électronique de puissance

Les fréons ont un grand rôle à jouer dans les équipements électroniques de puissance de faible taille , de faible poids et de grande fiabilité .

On trouve des exemples d'applications de ce mode de refroidissement dans les

transformateurs haute tension , les alimentations stabilisées , les klystrons qui sont des émetteurs utilisés dans la marine , les lasers et les amplificateurs de puissance .

IV.7.1.2 Applications en microélectronique

Dans des équipements se composant de circuits intégrés , l'accroissement des performances du système de refroidissement par utilisation de l'ébullition nucléée présente au moins trois avantages majeurs :

- une augmentation de la fiabilité par la suppression des points chauds ,
- une réduction de la longueur des interconnexions grâce à un taux d'occupation volumique plus élevé et par là même une diminution du temps de propagation des circuits ,
- une réduction de la taille des équipements .

CHAPITRE V

CONCEPTION D'UN NOUVEAU SYSTEME DE REFROIDISSEMENT HYBRIDE

V.1 Description des éléments du système

Dans ce chapitre , on va analyser la technique de conception du système proposé. Nous aborderons aussi les détails sur les éléments constitutifs de ce dernier à savoir les propriétés physiques des caloducs , liquide-fluide FC-72 et l'huile VOLTESSO 35 .

Le système proposé (fig V.1) sera constitué des éléments suivants:

- réservoir,
- liquide fluide FLUORINERT FC-72, l'air, ou l'huile VOLTESSO 35 ;
- caloduc;

Le convertisseur sera placé à l'intérieur du réservoir qui sera rempli par l'air , le liquide-fluide FC-72 ou l'huile VOLTESSO 35 afin de mener une étude comparative entre eux . Concernant ces fluides , ils seront associés au caloduc par un moyen technique simple . Au cours de l'étude expérimentale , le réservoir sera maintenu fermé , ceci revient au fait que le FC-72 peut s'évaporer une fois qu'il a atteint son point d'ébullition .

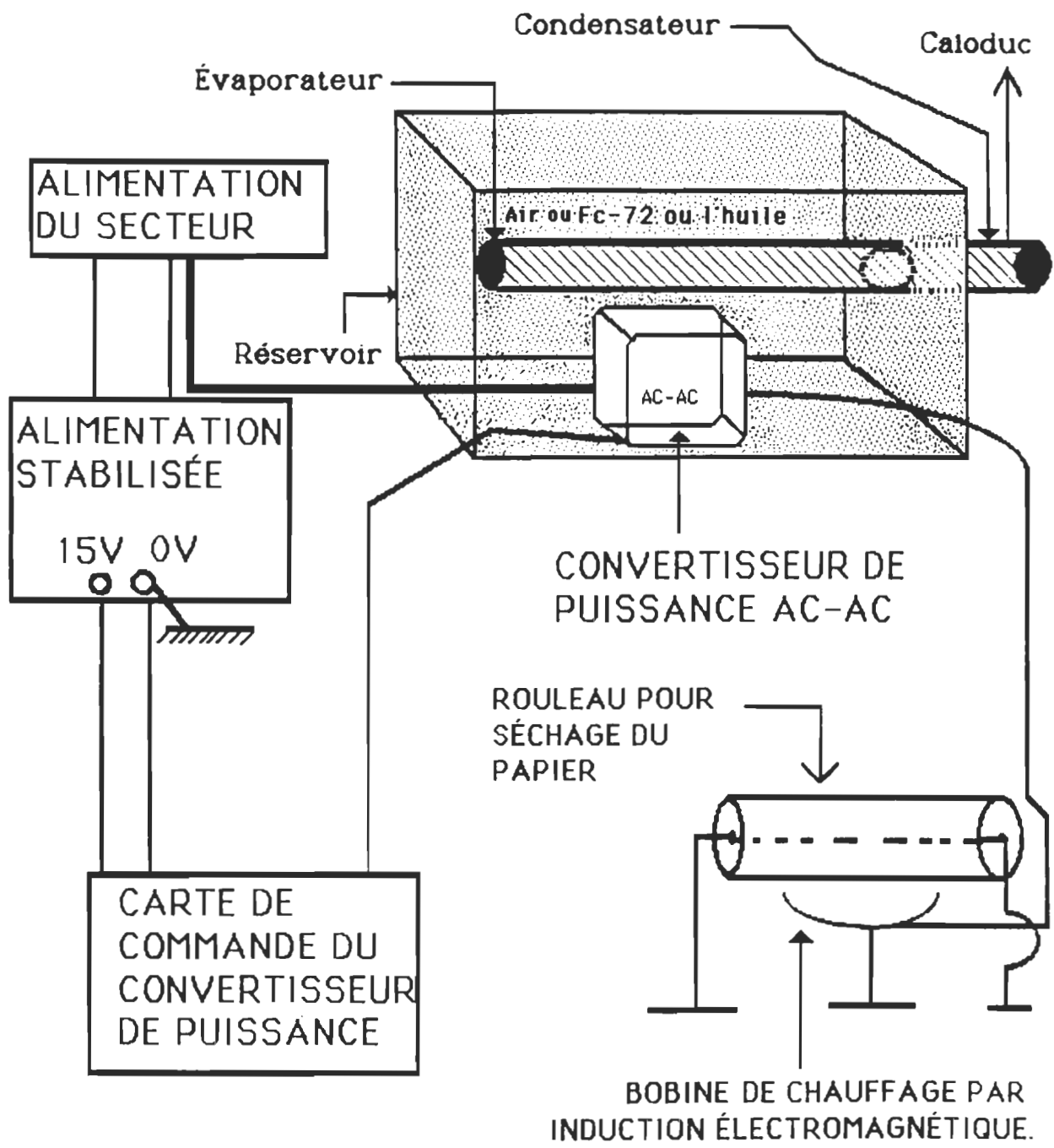


Figure V.1 : Schéma synoptique du système proposé.

V.2 Convertisseur de puissance

Le convertisseur électronique de puissance dont l'étude des phénomènes thermiques fera l'objet de cette étude est un convertisseur courant alternatif-courant alternatif. Sa puissance nominale est de 2kW et sa fréquence d'opération est de 16.6 kHz . Ce convertisseur aura pour tâche d'alimenter une bobine de chauffage par induction électromagnétique. Ce convertisseur est constitué d'un étage redresseur et d'un étage onduleur. La présence d'une inductance de lissage de grande valeur permet au redresseur de fonctionner comme une source de courant continu. Ceci permet pour l'étude du convertisseur de représenter l'étage redresseur par une source de courant débitant un courant d'intensité i_0 . Au début , on peut assimiler les thyristors et la diode à des interrupteurs idéaux afin de déterminer les courants et les tensions nécessaires pour l'évaluation des pertes dans les composants de puissance. On distingue deux modes selon que l'un , au moins , des composants semiconducteurs conduit ou qu'aucun d'eux ne conduit pas. On commence par le mode où l'un , au moins , de ces composants conduit. Le schéma du circuit équivalent représentant cet état est donné à la figure V.2.

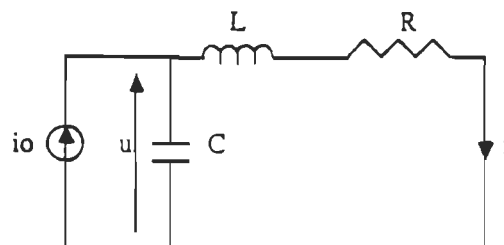


Figure V.2 : Schéma du circuit équivalent quand l'un au moins des interrupteurs conduit .

Les équations d'état électriques régissant ce circuit sont les suivantes:

$$C \cdot \frac{du}{dt} = i_0 - i \quad (V.1)$$

$$u = R \cdot i + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (V.2)$$

On gardera la notation L pour désigner l'inductance équivalente.

La résolution de ce système d'équations se ramène à celle de l'équation suivante :

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \cdot \frac{di}{dt} + \frac{1}{L \cdot C} \cdot i = i_0 \quad (V.3)$$

La solution de cette équation est la suivante :

$$i(t) = I_1 e^{\alpha t} \cdot \sin(\omega t) + I_2 e^{\alpha t} \cdot \cos(\omega t) + i_0 \quad (V.4)$$

$$\text{où : } \alpha = -\frac{R}{2L} \quad (V.5)$$

$$\text{et } \omega = \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\frac{4}{L \cdot C} - \frac{R^2}{L^2}} \quad (V.6)$$

En tenant compte des conditions initiales :

$$i(0) = 0$$

$$u(0) = u_0$$

On déduit les constantes I_1 et I_2

$$I_1 = \frac{\alpha}{\omega} + \frac{u_0}{L \cdot \omega} \quad (V.7)$$

$$I_2 = - i_0 \quad (V.8)$$

Le schéma du circuit équivalent correspondant au mode où tous les composants semiconducteurs sont bloqués est donné à la figure V.3.

Ce mode commence quand la diode cesse de conduire. En désignant par u_4 la tension aux bornes de la capacité C_4 du "snubber", les équations d'état régissant ce circuit sont les suivantes :

$$U = R' \cdot i + L' \frac{di}{dt} + u_4 + R_4 i \quad (V.9)$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{1}{C} \cdot (i_0 - i) \quad (V.10)$$

$$\frac{du_4}{dt} = \frac{i}{C_4} \quad (V.11)$$

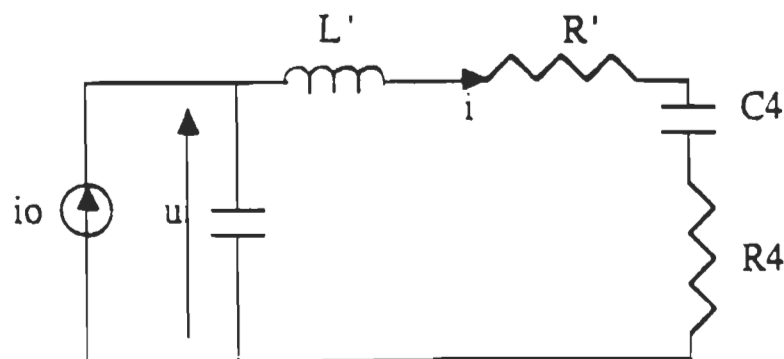


Figure V.3 : Schéma du circuit équivalent quand tous les interrupteurs sont bloqués

On en déduit l'équation différentielle dont la résolution fournit le courant i :

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_4} \right) i = \frac{i_0}{C \cdot L} \quad (V.12)$$

En posant

$$\alpha = \frac{R}{2L} \quad (V.13)$$

$$\omega = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{4}{L} \left(\frac{1}{C} + \frac{1}{C_4} \right) - \frac{R^2}{L^2}} \quad (V.14)$$

La solution de l'équation (VI.12) est :

$$i(t) = i_1 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \sin(\omega \cdot t) + i_2 \cdot e^{-\alpha \cdot t} \cdot \cos(\omega \cdot t) + \frac{C_4}{C + C_4} \cdot i_0 \quad (V.15)$$

Dans cette équation , l'origine des temps est choisie à l'instant où la diode cesse de conduire. Les conditions initiales sont les suivantes : $i(0)=0$,

$$R_4 i(0) + u_4(0) = 0$$

Celles-ci nous permettent de déduire les constantes i_1 et i_2 :

$$i_1 = \frac{u_0}{L \cdot \omega} + \frac{\alpha}{\omega} \cdot \frac{C_4}{C + C_4} \cdot i_0 \quad (V.16)$$

$$i_2 = - \frac{C_4}{C + C_4} \cdot i_0 \quad (V.17)$$

On présentera respectivement le circuit de puissance, la carte de commande et les caractéristiques de la charge du convertisseur en question.

V.2.1 Circuit de puissance

Le circuit de puissance du convertisseur comme montré en figure V.4 est composé d'un pont redresseur à quatre diodes dont la sortie est filtrée par un condensateur branché en parallèle à cette sortie et d'une inductance de lissage L qui joue le rôle d'une source de courant continu . Sur la figure l'étage redresseur apparaît sur le haut de la figure . L' autre partie qui forme l'étage onduleur est constituée d'un condensateur C , de deux thyristors montés en parallèle et servant d'interrupteurs , d'une diode montée en antiparallèle avec les thyristors, de leur circuit d'aide à la commutation, le " snubber " et d'une charge devant être fortement inductive et branchée en série avec les interrupteurs et dont l'ensemble permet de convertir le courant continu se présentant à son entrée en un courant alternatif. Ce convertisseur résulte donc de l'association en série d'un étage redresseur et d'un étage onduleur. Le condensateur C et l'inductance de la charge contribuent à remplir la tâche de l'onduleur. Les deux thyristors, la diode et la résistance du " snubber " , où la génération des pertes de puissance est à l'origine des problèmes thermiques qui nuisent au fonctionnement normal de ce convertisseur , sont fixés sur un même radiateur . La présence de la thermistance sert de protection une fois que la température des thyristors dépasse $75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

V.2.2 Carte de commande du convertisseur

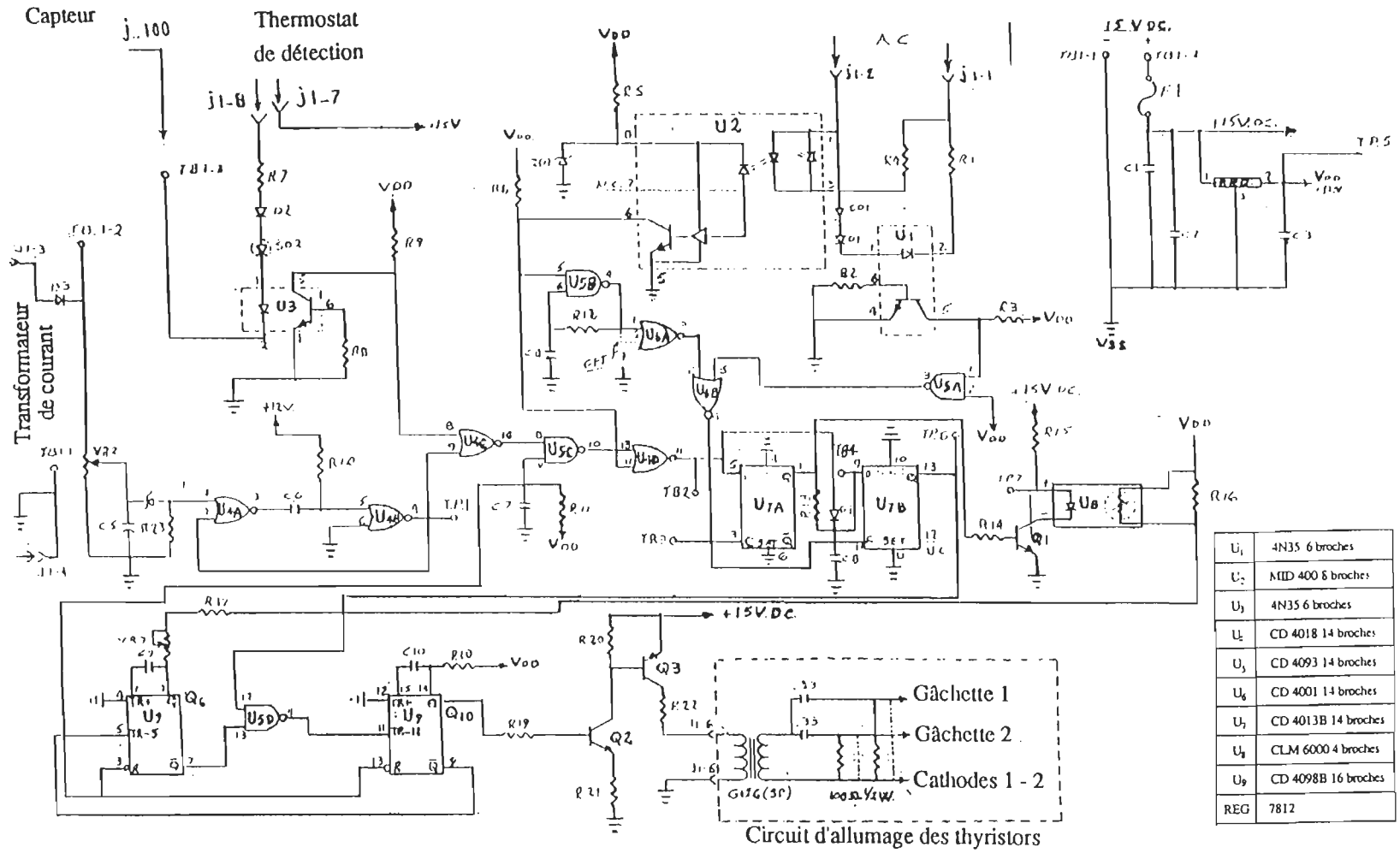
La carte (fig V.5) est composée de sept modules dont l'étage monostable multivibrateur constitue le module pilote du circuit de génération d'impulsions de gâchette. La carte de commande est alimentée par un régulateur de tension continue 0-15V et le circuit de puissance par une source de tension alternative de fréquence 60 Hz . L'horloge synchronisée sur la source et construite autour du composant MID 400 qui est isolée galvaniquement de la source permet de piloter un étage monostable. Le rôle de ce dernier est de retarder la mise en marche du convertisseur d'une durée égale à une alternance de la source , soit 8.3 ms et son arrêt d'une durée égale à 500 ms . Le signal issu de cet étage monostable attaque via l'adaptateur d'impédance CLM 6000 l'étage multivibrateur . La fréquence de fonctionnement du convertisseur est de 16.6 kHz et sa période est , alors , de 60 μ s . Au cours de la période de mise hors circuit du convertisseur , celui-ci opère pendant 500 ms à la fréquence de 4 kHz avant l'arrêt . L'étage détecteur de surchargement a pour rôle d'envoyer un signal au monostable qui , à son tour , transmet un signal déclencheur pour éteindre les thyristors et mettre le convertisseur à l'état d'arrêt. L'étage détecteur de surchargement est composé d'un transformateur de courant dont le noyau est excité par le courant de la charge qui est dans notre cas la bobine servant pour le chauffage , par induction électromagnétique d'un rouleau d'une calandre à papier . Le circuit astable de ce module réagit à l'entrée , qui se trouve , alors , porté à l'état logique 1 , en donnant à la sortie un créneau . Celui-ci attaque un circuit

combinatoire qui délivre à l'entrée de l'étage monostable l'état logique 1 pendant une durée supérieure à celle de l'alternance de la source . Cette durée est ajustée par un choix adéquat de la résistance et de la capacité de l'astable. L'étage multivibrateur est , alors , désactivé après des oscillations à la fréquence de 400 kHz pendant 500 ms . Le convertisseur arrête , alors , de fonctionner . L'étage de protection contre l'échauffement excessif des composants de puissance est réalisé par un thermostat fixé sur le radiateur. Quand la température devient supérieure à une certaine valeur limite, sa résistance devient infiniment grande ce qui fait éteindre l'optocoupleur et l'entrée du circuit combinatoire se trouve portée à l'état logique 1. L'entrée de l'étage monostable est, alors, à l'état logique zéro ce qui engendre l'arrêt du convertisseur 500 ms après la détection du défaut.

L'étage multivibrateur est composé de deux monostables connectés en série via une porte Nand dont une autre entrée est attaquée par le signal issu de l'adaptateur d'impédance .

Les impulsions de gâchette sont générées à partir d'un signal de sortie de la carte de commande en attaquant un étage d'amplification qui fournit des impulsions à travers un transformateur d'impulsions. Les gâchettes sont allumées via des capacités qui se déchargent dans des résistances montées en parallèle entre la cathode et la gâchette. Le rôle de la capacité et de la résistance est de maintenir une tension positive au cours de l'allumage du thyristor et d'avoir brusquement une tension négative sur la gâchette au cours de la conduction de la diode.

Figure V.5 : Schéma de la carte de commande.



U ₁	4N35 6 broches
U ₂	MID 400 8 broches
U ₃	4N35 6 broches
U ₄	CD 4018 14 broches
U ₅	CD 4093 14 broches
U ₆	CD 4001 14 broches
U ₇	CD 4013B 14 broches
U ₈	CLM 6000 4 broches
U ₉	CD 4098B 16 broches
REG	7812

V.2.3 Caractéristiques de la charge

Le convertisseur sera connecté à sa charge qui est une bobine de chauffage par induction électromagnétique. Ce chauffage est réalisé quand la bobine est parcourue par un courant de haute fréquence et quand elle est placée à proximité de la masse conductrice à chauffer . La surface de la masse orientée perpendiculairement à l'axe de la bobine sera le siège de courants de Foucault. D'après la loi de Lenz, la variation du flux magnétique provoque la naissance de courants dans la masse qui ont tendance à s'opposer à cette variation.

Soit ϕ le flux magnétique total créé à travers une section circulaire de rayon r de la masse qui constitue la cible à chauffer. Un champ électrique E est alors créé dans cette cible. D'après la loi de Faraday , le champ E autour du contour fermé constitué par le cercle de rayon r et dont le centre est sur l'axe de la bobine est liée au flux par la relation:

$$\int_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{d\phi}{dt} \quad (V.18)$$

Sur ce contour, le champ E a un module constant , et on a:

$$\int_c \vec{E} \cdot d\vec{l} = 2.\pi .r.E \quad (V.19)$$

$$\text{d'où : } E = \frac{1}{2.\pi .r} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (V.20)$$

D'autre part, on a:

$$\phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{S} \quad (V.21)$$

Où B est l'induction magnétique et A est la surface limitée par le cercle.

Si ρ est la résistivité de la cible, le champ électrique E produit un courant dans la cible de même direction et de même sens que E et ayant une densité:

$$\vec{j} = \frac{\vec{E}}{\rho} \quad (V.22)$$

Les pertes d'énergie par unité de surface dans la cible sont:

$$P = \rho \cdot j^2 \quad (V.23)$$

Ces pertes peuvent être assimilées à la dissipation de l'énergie dans une résistance R_2 . L'effet demagnetisant des courants de Foucault peut être assimilé à celui d'un couplage de la bobine chauffante à une bobine fictive d'inductance propre L_2 et d'inductance mutuelle M . Si R_1 et L_1 sont respectivement la résistance et l'inductance de la bobine et si e_1 est la tension appliquée aux bornes de la bobine, l'ensemble bobine et cible peut être représenté par le circuit équivalent montré sur la fig.V.6.

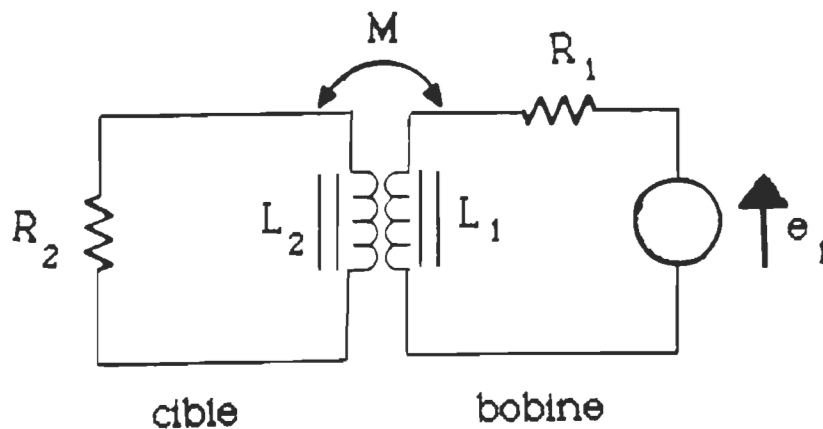


Figure V.6 : Schéma du circuit équivalent de la charge.

V.2.4 Evaluation des pertes dans les composants de puissance

V.2.4.1 Calcul des pertes dans un thyristor :

La quantité de chaleur générée dans un thyristor est due aux causes suivantes :

- la chute de tension directe durant la circulation du courant de charge ,
- le courant de saturation direct au cours du blocage direct ,
- le courant de saturation inverse au cours du blocage inverse ,
- les pertes dans la gâchette ,
- les pertes de commutation en régime transitoire [11]

V.2.4.1.1 Pertes en conduction directe :

Soit t_0 l'instant où les thyristors cessent de conduire au cours d'un cycle. Les pertes d'énergie en conduction directe sont :

$$W_{Fth} = \int_0^{t_0} V_F(t) \cdot \left(\frac{i_F(t)}{2} \right) dt \quad (V.24)$$

En remplaçant $V_F(t)$ et $i_F(t)$ par leurs expressions , on obtient

$$\begin{aligned}
 W_{Fth} = & \int_0^{t_0} \frac{1}{2b_{th}} \cdot ((I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0) \cdot \\
 & \text{Log} \left[\frac{(I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0}{2I_{sth}} \right] \cdot dt \\
 & + \int_0^{t_0} \frac{1}{4} \cdot R_a \cdot ((I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0)^2 \cdot dt
 \end{aligned} \tag{V.25}$$

où , d'après les oscillogrammes , $t_0 = 17.9$ micro-secondes.

L'intégration analytique de cette intégrale étant très difficile , son évaluation, suivant une méthode numérique , donne :

$$\mathbf{W_{Fth} = (4.62E-4 + 1.19E-4) J} \tag{V.26}$$

Cette quantité d'énergie correspond à la puissance :

$$P_{Fth} = W_{Fth} / 60. E-6 \quad P_{Fth} = 9.68W$$

V.2.4.1.2 Pertes en conduction inverse :

Ces pertes dans un thyristor correspondent à la période où la diode est en conduction . La chute de tension sur un thyristor est donnée par :

$$\mathbf{V_{th} = - V_d = -[\text{Log}(-i(t)/I_{sd})] / b_d + R_s \cdot i(t)} \tag{V.27}$$

Le courant dans un thyristor est négatif et est donné par :

$$\mathbf{i_{th} = I_{sth} \cdot (\exp(b_{th} \cdot V_{th}) - 1)} \tag{V.28}$$

Les pertes en conduction inverse sont :

$$W_{thR} = \int_0^{t_1} I_{sth} \cdot (-[\text{Log}(-i(t)/I_{sd})]/b_d + R_s \cdot i(t)) \cdot [\exp(b_{th} \cdot (-[\text{Log}(-i(t)/I_{sd})]b_d + R_s \cdot i(t))) - 1] \cdot dt \quad (V.29)$$

Étant donné que la chute de tension et le courant inverse sont faibles, les pertes W_{thR} donnent : $P_{thR} = W_{thR} / 60.E-6 = 0.0022W$

V.2.4.1.3 Pertes au blocage direct :

Ces pertes correspondent aux conditions où le thyristor est bloqué et la tension appliquée V_{thB} , entre l'anode et la cathode, est positive. Dans ces conditions, la chute de tension sur un thyristor est égale à celle appliquée aux bornes du "snubber". On a donc :

$$V_{thB} = R_4 \cdot i'(t) + u_4(t) \quad (V.30)$$

Le courant i_{thB} circulant dans un thyristor au blocage est relativement faible. Si I_H est le courant de maintien du thyristor et V_{DRM} est sa tension directe répétitive, i_{thB} peut être approximé par la formule suivante :

$$i_{thB}(t) = (I_H / V_{DRM}) \cdot v_{thB}(t) \quad (V.31)$$

Les pertes au blocage direct sont alors :

$$W_{thB} = \int_0^{t_2} \frac{I_H}{V_{DRM}} \cdot V_{thB}^2(t) \quad (V.32)$$

où t_2 est la durée du blocage direct. En remplaçant V_{thB} par son expression, la relation (V.32) devient :

$$\begin{aligned}
W_{thB} = & \int_0^{t_2} \left[(R_4 i_1 + \frac{\alpha \dot{i}_1 + \omega \dot{i}_2}{C_4 (\alpha^2 + \omega^2)} \sin(\omega t) \cdot e^{\alpha t} \right. \\
& + (R_4 i_2 + \frac{\alpha \dot{i}_2 - \omega \dot{i}_1}{C_4 (\alpha^2 + \omega^2)}) \cos(\omega t) \cdot e^{\alpha t} \\
& \left. + \frac{R_4 C_4}{C + C_4} i_0 - \frac{\alpha \dot{i}_2 - \omega \dot{i}_1}{C_4 (\alpha^2 + \omega^2)} + \frac{i_0 t}{C + C_4} \right] \cdot \frac{I_H}{V_{DRM}} dt
\end{aligned}
\tag{V.33}$$

D'après la fiche technique du thyristor , on a :

$$I_H = 45 \text{ mA}$$

$$V_{DRM} = 800 \text{ V}$$

L'intégration numérique donne le résultat suivant : $W_{thB} = 1.83E-4 \text{ J}$ qui correspond à une puissance :

$$P_{thB} = 3.06 \text{ W}$$

V.2.4.1.4 Pertes de commutation à l'amorçage d'un thyristor:

Les oscillogrammes montrent qu'à l'amorçage d'un thyristor la tension appliquée V_{tht} est directe et est de l'ordre $V_0 = 500 \text{ V}$. Cette tension prend un certain temps pour chuter à la valeur correspondant à la saturation. D'après le catalogue , cette chute de tension s'effectue avec une constante de

temps

$\tau = 250$ ns et se superpose à la tension du régime établi. On a donc :

$$V_{tht} = V_0 \cdot e^{-t/\tau} \quad (V.34)$$

Les pertes de commutation à l'amorçage sont donc

$$W_{on} = \int_0^{t_0} V_{tht}(t) \cdot (i_F(t)/2) dt \quad (V.35)$$

$$W_{on} = \int_0^{t_0} \frac{V_0}{2} \cdot \exp(-t/\tau) \cdot ((I_1 \cdot \sin(\omega t) + I_2 \cdot \cos(\omega t)) \cdot \exp(\alpha t) + i_0) dt \quad (V.36)$$

L'intégration numérique de (V. 36) donne : $W_{on} = 2.51E-4$ J qui correspond à une puissance :

$$P_{on} = 4.18 \text{ W}$$

Remarque: Concernant les pertes de gâchette on va se contenter de donner leurs valeurs numériques sans les démontrer en s'inspirant de la référence [2].

Pour le thyristor th_1 , on a : $W_{gF} = 7.06E-6$ J , $W_{gR} = 1.22E-5$ J

Pour le thyristor th_2 , on a : $W_{gF} = 9.73E-6$ J , $W_{gR} = 1.68E-5$ J

avec W_{gF} : pertes de gâchette dans le thyristor à l'état de saturation ,

W_{gR} : pertes de gâchette dans le thyristor à l'état de blocage ,

En prenant la moyenne des pertes de gâchette des deux thyristors , on trouve :

$$P_g = 0.38 \text{ W}$$

d'où la puissance totale dissipée dans un thyristor est : $P_{th} = 17.3 \text{ W}$

V.2.4.2 Calcul des pertes dans la diode :

Les pertes de puissance dans la diode sont :

- les pertes en conduction directe ,
- les pertes au blocage ,
- les pertes de commutation [12].

V.2.4.2.1 Pertes en conduction directe :

Le courant circulant dans la diode est la totalité du courant de charge pendant l'alternance négative . Les pertes de puissance en conduction directe sont alors :

$$W_{FD} = \int_{t_0}^{t_1} V_F(t).i_F(t).dt \quad (V . 37)$$

En remplaçant la chute de tension V_F sur la diode et le courant de charge I_F par leurs expressions , on obtient :

$$\begin{aligned}
 W_{FD} = & \int_{t_0}^{t_1} \frac{-1}{2b_d} \cdot ((I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0) \\
 & * \text{Log} \left[\frac{(I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0}{-2I_{sd}} \right] \cdot dt \\
 & + \int_{t_0}^{t_1} \frac{1}{4} R_s \cdot ((I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0)^2 \cdot dt \quad (V . 38)
 \end{aligned}$$

Le calcul numérique de cette intégrale donne le résultat suivant :

$$W_{Fd} = (3.41E-4 + 3.02E-4) \text{ J}$$

$$P_{Fd} = 10.71 \text{ W}$$

V.2.4.2.2 Pertes au blocage quand les thyristors sont saturés:

Les pertes au blocage de la diode quand les thyristors sont saturés, sont négligeables. Le courant dans la diode est alors :

$$i_d = I_{sd} \cdot (\exp(b_d \cdot v_d) - 1) \quad (\text{V. 39})$$

La tension aux bornes de la diode est :

$$V_d = -V_{th} = -(\text{Log}(i_F / 2I_{sth})) / b_{th} - R_a \cdot i_F / 2 \quad (\text{V. 40})$$

Ces pertes sont les suivantes :

$$W_{dr1} = \int_0^{t_0} I_{sd} \cdot (-[\text{Log}(i(t) / 2I_{sth})] / b_{th} + R_a \cdot i(t) / 2) \cdot [\exp(b_d \cdot (-[\text{Log}(i(t) / 2I_{sd})] / b_{th} + R_a \cdot i(t) / 2)) - 1] \cdot dt \quad (\text{V. 41})$$

On obtient : $W_{dr1} = 0.0038 \text{ W}$

V.2.4.2.3 Pertes au blocage de tous les semiconducteurs :

Les pertes au blocage, de tous les semiconducteurs, dans la diode sont données par la formule :

$$\begin{aligned}
W_{dr2} = & \int_0^{t_2} \left[(R_4 \dot{i}_1 + \frac{\alpha \dot{i}_1 + \omega \dot{i}_2}{C_4(\alpha^2 + \omega^2)}) \sin(\omega t) e^{\alpha t} \right. \\
& + (R_4 \dot{i}_2 + \frac{\alpha \dot{i}_2 - \omega \dot{i}_1}{C_4(\alpha^2 + \omega^2)}) \cos(\omega t) e^{\alpha t} + \frac{R_4 C_4}{C + C_4} i_0 \\
& \left. - \frac{\alpha \dot{i}_2 - \omega \dot{i}_1}{C_4(\alpha^2 + \omega^2)} + \frac{i_0 t}{C + C_4} \right]^2 i_{sd} (1 - \exp(b_d v_d(t))) dt \quad (V.42)
\end{aligned}$$

L'évaluation numérique de cette intégrale donne : $P_{dr2} = 3.09W$.

V.2.4.2.4 Pertes de commutation à l'extinction

Au moment où le courant de charge commence à circuler dans le circuit " snubber ", celui dans la diode atteint sa valeur crête inverse : $(-I_{RM}) = -1.9A$ et la tension inverse appliquée à la diode croît exponentiellement et quasi-instantanément . A partir de cet instant , pris comme origine des temps , le courant inverse se maintient pendant 100 ns à la valeur $(-I_{RM})$ puis grimpe avec une pente $a_1 = 200.E-9 \text{ A.s}^{-1}$ pendant 150 ns jusqu'à la valeur nulle . Le courant dans la diode est alors :

$$\begin{aligned}
i_d(t) &= -I_{RM} && \text{pour: } 0 < t < 100 \text{ ns} \\
i_d(t) &= -I_{RM}(1 - (t - 10^{-7})/a_1) && \text{pour: } 100 < t < 250 \text{ ns} \quad (V.43)
\end{aligned}$$

Les pertes de commutation à l'extinction sont alors :

$$\begin{aligned}
 W_{\text{doff}} = & \int_{10^{-7}}^{1.5 \cdot 10^{-7}} -I_{RM} \left((1 - (t - 10^{-7})/\alpha_1) \cdot (i_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + \right. \\
 & \left. i_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0 \cdot C_4 / (C_4 + C) \right) dt \\
 & + \int_0^{10^{-7}} -I_{RM} \left((i_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + \right. \\
 & \left. i_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0 \cdot C_4 / (C_4 + C) \right) dt \quad (V.44)
 \end{aligned}$$

Finalement , les pertes de commutation à l'extinction de la diode sont :

$$P_{\text{doff}} = 1.39W.$$

V.2.4.2.5 Pertes de commutation à l'amorçage :

A l'instant où la diode entre en conduction , la tension qui lui est appliquée est faible et pratiquement nulle. On assiste donc à une commutation douce . Cependant , à cause de l'absence d'une répartition parfaite du courant de charge dans les thyristors , la diode se met à conduire lorsque l'un des thyristors se bloque tandis que l'autre reste encore saturé. Cette cause est responsable des pertes de commutation à l'amorçage de la diode . D'après les oscillogrammes relevés , le courant dans la diode à son amorçage a pour expression :

$$i_d(t) = a_2 \cdot t \quad (V.45)$$

$$\text{où : } a_2 = 6/4.5E-6 \text{ A.s}^{-1}$$

Les pertes de commutation à l'amorçage de la diode sont , alors :

$$W_{don} = \int_0^{4.5 \cdot 10^{-6}} a_2 \cdot t \cdot \text{Log}(a_2 \cdot t \cdot I_{sd} + 1) / b_d \cdot dt \quad (V. 46)$$

Le calcul numérique de cette intégrale donne : $W_{don} = 1.16E-5J$ qui correspond à la puissance : $P_{don} = 0.19 W$.

La puissance totale dissipée dans la diode est $P_d = 15.4 W$. La densité de puissance dans sa jonction est : $d_d = 3.85W$.

V.2.4.3 Calcul des pertes dans le " snubber " :

Ces pertes se manifestent au moment où les thyristors s'amorcent et au moment où la diode cesse de conduire.

V.2.4.3.1 Pertes à l'extinction de la diode :

Quand la diode cesse de conduire , le courant qui s'établit dans la résistance R_4 du " snubber " est $i'(t)$. Les pertes par effet Joule qui accompagnent le passage de ce courant dans la résistance R_4 sont exprimées par :

$$W_{s1} = \int_0^{27.5E-6} R_4 \left((I_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) + I_2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \exp(\alpha \cdot t) + i_0 \cdot C_4 / (C_4 + C) \right)^2 \cdot dt \quad (V. 47)$$

On obtient : $W_{s1} = 2.5E-4J$ qui correspond à la puissance : $P_{s1} = 4.17W$.

V.2.4.3.2 Pertes à l'amorçage des thyristors :

Au moment de l'amorçage des deux thyristors , la tension aux bornes du circuit " snubber " passe presque instantanément de $u_0 = 500$ V à la valeur nulle . L'équation qui régit le circuit " snubber " est :

$$R_4 \cdot C_4 \cdot \frac{du_4}{dt} + u_4 = u \quad (V . 48)$$

où $u(0) = u_0$ et $u(t) = 0$ pour $0 < t < 32.4E-6$ s

La solution de cette équation est : $u_4(t) = u_0 \cdot \exp(-t/\tau_4)$ (V . 49)

Le courant dans le " snubber " est donné par :

$$i_s = C_4 \frac{du_4}{dt} = - \frac{u_0}{R_4} \exp(-t/\tau_4) \quad (V . 50)$$

Les pertes dans le " snubber " à l'amorçage des deux thyristors sont , alors :

$$W_{s2} = \int_0^{t_1} R_4 \left(- \frac{u_0}{R_4} \exp(-t/\tau_4) \right)^2 dt = \frac{C_4 u_0^2}{2} (1 - \exp(-2t_1/\tau_4)) \quad (V . 51)$$

On obtient : $W_{s2} = 1.25E-3$ J qui correspond à la puissance :

$$P_{s2} = 20.84 \text{ W}$$

d'où la puissance totale dissipée dans le circuit " snubber " est : $P_s = 25.1 \text{ W}$.

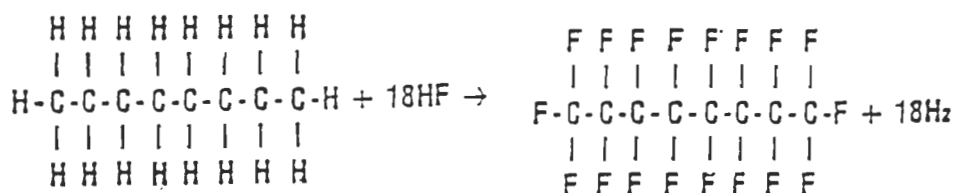
V.3 Caractéristiques chimiques et physiques des liquides

Fluorinert

V.3.1 Caractéristiques chimiques des liquides

FLUORINERT

Les liquides électroniques FLUORINERT sont membres de la famille organique qui possède des propriétés de combinaisons uniques. Ils sont dérivés d'un composant organique commun par la remise en place des atomes d'hydrogène et de carbone avec les atomes de Fluorine. La méthode de fabrication de ces produits est la fluorination électrochimique. Dans ce processus, un composé organique est électrolysé dans un liquide hydrogène Fluorure. **La réaction suivante** , montre **la fluorination électrochimique** : [4].



Une fois la fluorination complétée , le produit ne contient plus d'hydrogène ou du chlore. Ils sont sans couleur, sans odeur, peu toxique , et non inflammable. Ils possèdent aussi une stabilité thermique élevée , une réaction chimique

basse et ne laissent pas de résidu. Leurs caractéristiques non-polaires permettent des propriétés physiques peu communes comme la basse chaleur d'évaporation, la tension de surface basse, et le point d'ébullition bas en relation avec leurs poids moléculaires élevés.

V.3.2 Caractéristiques physiques des FLUORINERT

Les propriétés physiques sont résumées dans les tableaux suivants [4]:

	Unité	FC-70	FC-5312	FC-71
-Point d'ébullition typique	°C	215	215	253
-Densité à 25 °C	kg/m ³	1.94	1.93	1.90
-Densité à -54°C	kg/m ³			
-Pression vapeur à 25°C	bar	<0.1	<0.1	<0.02
-Chaleur spécifique à 25°C	J/g °C	0.25	0.25	0.25
-Chaleur d'évaporation au point d'ébullition	J/g °C	16	16	15
-Conductivité thermique à 25°C	w/(cm ²)*(°C/cm)	0.00070	0.00070	0.00071
-Coefficient d'expansion	cm ³ /(cm ³)(°C)	0.0014	0.0012	0.0012
-Tension de surface à 25°C	dynes /cm	18	18	18
-Indice de réfraction à 25°C		1.303	1.303	1.299
-Puissance diélectrique à 25°C	kV(2.54mmgap)	40	40	42
-Constante diélectrique à 25°C(1KHZ)		1.98	1.98	1.94
-La résistance volumique à 25°C	Ω-cm	2.3*10 ¹⁵	2.3*10 ¹⁵	2.2*10 ¹⁴
-La solubilité à l'eau à 25°C	ppm(wt)	8	8	9
-La solubilité à l'air à 25°C	mlgas/100	22	22	20
-Le poids moléculaire moyen		820	820	970

Tableau V.1 : Caractéristiques physiques des Fluorinert [4].

	Unité	FC-72	FC-84	FC-77	FC-104
-Point d'ébullition typique	°C	56	80	97	101
-Densité à 25 °C	kg/m ³	1.68	1.73	1.78	1.77
-Densité à -54°C	kg/m ³	1.90	1.93	1.97	1.96
-Pression vapeur à 25°C	bar	232	79	42	29
-Chaleur spécifique à 25°C	J/g °C	0.25	0.25	0.25	0.25
-Chaleur d'évaporation au point d'ébullition	J/g °C	21	19	20	22
-Conductivité thermique à 25°C	W/cm ² *(°C/Cm)	0.00057	0.00060	0.00063	0.00063
-Coefficient d'expansion	cm ³ /(cm ³)(°C)	0.0016	0.0015		
-Tension de surface à 25°C	dynes /cm	12	13	15	14
-Indice de réfraction à 25°C		1.251	1.261	1.280	1.271
-Puissance diélectrique à 25°C	kV(2.54mmgap)	38	42	40	41
-Constante diélectrique à 25°C(1KHZ)		1.76	1.81	1.86	1.86
-La résistance volumique à 25°C	Ω-cm	1.08*10 ¹⁵	1*10 ¹⁵	1.9*10 ¹⁵	8.4*10 ¹⁵
-La solubilité à l'eau à 25°C	ppm(wt)	10	11	13	11
-La solubilité à l'air à 25°C	mlgas/100				
-Le poids moléculaire moyen		340	388	415	435

Tableau V.2 : Caractéristiques physiques des Fluorinert [4] .

	Unité	FC-75	FC-40	FC-43	FC-531.1
-Point d'ébullition typique	°C	102	155	174	215
-Densité à 25 °C	kg/m ³	1.77	1.87	1.88	2.03
-Densité à -54°C	kg/m ³	1.96	1.93	1.97	1.96
-Pression vapeur à 25°C	bar	31	3	1.3	<0.002
-Chaleur spécifique à 25°C	J/g °C	0.25	0.25	0.25	0.26
-Chaleur d'évaporation au point d'ébullition	J/g °C	21	17	17	16
-Conductivité thermique à 25°C	W/(cm ²)*(°C/cm)	0.00063	0.00066	0.00066	0.00053
-Coefficient d'expansion	cm ³ /(cm ³)(°C)	0.0014	0.0012	0.0012	0.00075
-Tension de surface à 25°C	dynes /cm	15	16	16	19
-Indice de réfraction à 25°C		1.276	1.290	1.291	1.332
-Puissance diélectrique à 25°C	kV(2.54mmgap)	40	46	42	40
-Constante diélectrique à 25°C(1KHZ)		1.86	1.89	1.90	<2.00
-La résistance volumique à 25°C	Ω-cm	8.0*10 ¹⁵	4.0*10 ¹⁵	3.4*10 ¹⁵	3.4*10 ¹⁵
-La solubilité à l'eau à 25°C	ppm(wt)	11	7	7	13
-La solubilité à l'air à 25°C	ml/gas/100	40	27	26	30
-Le poids moléculaire moyen		420	650	670	624

Tableau V.3 : Caractéristiques physiques des Fluorinert [4].

V.4 Caractéristiques du caloduc

EASTMAN en 1968 a identifié plusieurs caractéristiques du caloduc. Quatre des caractéristiques favorisent particulièrement l'utilisation du caloduc dans la conception des systèmes de contrôle thermique pour les composants et systèmes électroniques . Premièrement , le caloduc opère dans un cycle à deux phases fermé, et la capacité du caloduc est de plusieurs ordres de grandeurs élevés que les meilleurs conducteurs solides. Il en résulte que la résistance thermique est relativement petite et permet la séparation physique de l'évaporateur et du condensateur .

Deuxièmement , l'accroissement du flux de chaleur dans l'évaporateur implique l'accroissement de la vitesse d'évaporation du fluide , sans influencer l'accroissement de la température opératoire. Ainsi le caloduc fonctionne a peu près comme un système isotherme, réglant la vitesse d'évaporation , pendant que la température de la source est maintenue constante.

Troisièmement , les parties évaporateurs et condensateurs du caloduc fonctionnant indépendamment , et ont besoin d'un liquide commun et d'une vapeur. Pour cette raison , la surface par laquelle la chaleur est introduite peut différer dans la taille de la surface par laquelle elle est rejetée , à condition que la vitesse à laquelle le liquide est vaporisé ne dépasse pas celle à laquelle elle peut être condensée. Par conséquent , les flux de chaleur élevés échangés au dessus des petites surfaces peuvent être dissipés au dessus des surfaces larges avec des flux de chaleur réduits. Finalement , avec l'utilisation du cycle à deux phases, le temps de réponse thermique du caloduc est

beaucoup moins élevé que celui associé avec les conducteurs solides . Les caractéristiques de transfert de chaleur élevée , la capacité de maintenir la température d'évaporation constante sous différents niveaux de flux de chaleur , ainsi que la diversité et la variabilité des tailles des évaporateurs et des condensateurs , font du caloduc un moyen efficace pour le contrôle thermique des composants électriques , [3-ch4,p284].

V.4.1 Compatibilité du matériel

Les problèmes qui affectent les caloducs sont en premier lieu dus aux réactions chimiques entre le fluide et la paroi de la mèche , la décomposition du fluide ou la formation des gaz non condensables sont des problèmes qui contribuent à la corrosion du caloduc .

A cet effet , des précautions sont à prendre pour le choix du fluide , la structure des mèches et la paroi du matériel dans le but d'éviter des problèmes à la vie opérationnelle des caloducs .

Les problèmes liés à la corrosion peuvent être en tête de la dégradation physique de la structure de la mèche . Les particules solides sont transportées à la mèche de l'évaporateur réduire éventuellement la perméabilité de la mèche [3].

La génération des gaz non condensables et les problèmes de corrosion sont les deux facteurs à prendre en considération lors de la sélection de la mèche du caloduc et du fluide . D'autres considérations incluent l'humidité , la conductivité et la stabilité thermique [3] .

V.4.2 La taille et la forme des caloducs

Les tailles et les formes des caloducs varient selon diverses applications . La variation des tailles à partir de 15 cm de longueur d'une seule rainure du caloduc a été développée pour le rejet de chaleur des vaisseaux spatiaux pour le contrôle thermique des systèmes semiconducteurs .

Les caloducs peuvent être fixés avec une longueur variable comme ceux développés pour les cas où des mouvements et des vibrations posent des problèmes . Ils sont fabriqués par ITOH RESEARCH et DEVELOPMENT COMPAGNY .

V.4.3 La résistance thermique des caloducs

La chute de température entre l'évaporateur et le condensateur du caloduc est particulièrement intéressante dans la conception des systèmes de contrôle thermique , et recherchée pour l'utilisation des réseaux électrothermiques analogiques .

La figure V.7 illustre un caloduc électrothermique . Comme montré dans cette figure , l'ensemble de la résistance thermique totale comprend neuf résistances disposées dans des combinaisons séries/parallèles . Ces neuf résistances peuvent être résumées comme suit :

R_{pe} : la résistance radiale de la paroi de l'évaporateur du caloduc .

R_{we} : la résistance de l'interface liquide / mèche de l'évaporateur .

R_{ie} : la résistance de l'interface liquide/vapeur de l'évaporateur

- R_{va} : la résistance de la section vapeur .
 R_{pa} : la résistance axiale de la paroi du caloduc .
 R_{wa} : la résistance axiale de la combinaison meche/liquide
 R_{ic} : la résistance de l'interface vapeur/liquide du condensateur
 R_{wc} : la résistance de la combinaison meche/liquide du condensateur
 R_{pc} : la résistance radiale de la paroi du caloduc du condensateur

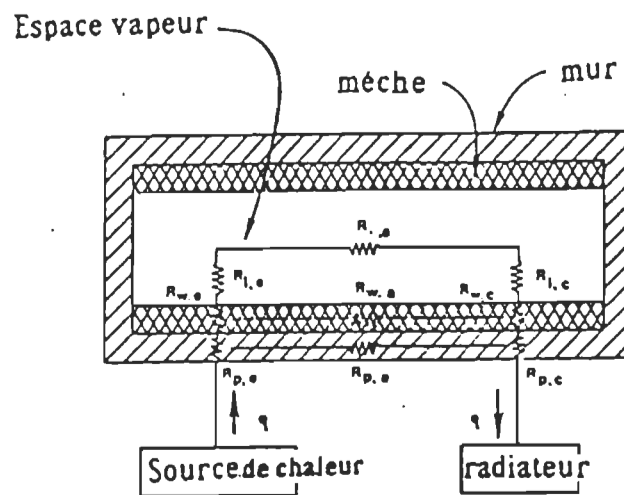


Figure V.7 : Ensemble des résistances thermiques d'un caloduc

Le tableau V.5 donne des estimations de l'ordre de grandeur de chacune de ces résistances . En comparant ces valeurs , il est évident que plusieurs simplifications peuvent être faites .

Résistance	°C / Watt
R_{pe} et R_{pc}	10^{-1}
R_{we} et R_{wc}	10^{+1}
R_{ie} et R_{ic}	10^{-5}
R_{va}	10^{-8}
R_{pa}	10^{+2}
R_{wa}	10^{+4}

Tableau V.4 : Comparaison des valeurs des résistances des caloducs

La résistance axiale de la paroi du caloduc et de la combinaison mèche/liquide pouvait être traitée comme un circuit ouvert et par conséquent pouvait être négligée . Les résistances de l'interface vapeur / liquide et la résistance vapeur axiale peuvent , dans la plupart des situations , être négligeables .

Seules les résistances mèche / liquide de l'évaporateur et du condensateur sont permises . Les résistances radiales de la paroi du caloduc peuvent être calculées à partir de la loi de FOURIER'S comme suit :

$$R_{pe} = \frac{\delta}{K_p A_e} \quad (V . 52)$$

pour des coupes plates où :

δ : est l'épaisseur de la coupe et ,

A_e : l'aire de l'évaporateur ,

d'où :

$$R_{pe} = \frac{\ln \left[\frac{d_o}{d_i} \right]}{2 \pi L_e K_{eff}} \quad (V.53)$$

La résistance de la vapeur , bien qu'elle soit habituellement négligeable , peut être calculée comme suit :

$$R_{va} = T_v (P_{v,e} - P_{v,c}) / \rho_v \lambda_q .$$

où $P_{v,e}$ et $P_{v,c}$ sont les pressions de la vapeur de l'évaporateur et du condensateur .

V.4.4 Caloduc utilisé comme radiateur

Comme la résistance thermique du caloduc est très petite comparée à la conduction dans le métal solide, il n'est pas surprenant de retrouver des caloducs comme radiateurs pour le refroidissement des composants électroniques. Les plus simples sont les caloducs de forme cylindrique et sont disponibles commercialement. Généralement, la source de chaleur (les transistors de puissance, les thyristors, ou les générateurs thermoélectriques) est fixée mécaniquement au caloduc, formant la fin de l'évaporateur. Les ailettes séries sont attachées (soit par soudage au laiton, soit par pression) à la fin du condensateur dans le but de permettre le rejet de chaleur adéquat à l'air ambiant. L'air peut passer autour des ailettes par ventilateur ou par convection naturelle. L'orientation horizontale du caloduc lui permet de transporter plus de chaleur par rapport à sa position inclinée. L'utilisation de multiples caloducs parallèles pour refroidir des thyristors à puissance élevée a été expérimenté par MURSE en 1987 [3].

V.5 Caractéristiques de l'huile VOLTESSO 35 :

D'après la fiche technique des données sur l'huile VOLTESSO 35, on va décrire ses caractéristiques les plus importantes. C'est une huile diélectrique utilisée pour plusieurs types d'équipement électrique y compris les transformateurs, les réacteurs, les interrupteurs et les circuits. Elle est raffinée pour des services de longues durées avec des précautions raisonnables contre la contamination [13].

VOLTESSO 35 est un isolant spécialement fabriqué pour résister à l'oxydation ainsi qu'à l'accumulation des substances. Il possède une basse viscosité qui facilite le refroidissement et la circulation sous des conditions sévères de refroidissement. Concernant sa tendance gazeuse négative, c'est un isolant qui absorbe facilement l'hydrogène lequel est produit par les défauts électriques du transformateur par exemple. La tendance du gaz absorbé peut aider à former une protection essentielle contre les explosions ou le feu résultant de l'accumulation de l'hydrogène [13].

Enfin VOLTESSO 35 est une huile dégagée de tout acide, alcalin et soufre corrosif et n'attaque pas les finitions des vernissages ou l'émail des enroulements des transformateurs ou d'autres matériels solides isolants.

Elle ne contient pas de PCB's (polychlorinated biphenyls) [13].

Le tableau V.4 suivant résume ses propriétés physiques [13].

L'huile VOLTESSO 35	
<u>Propriétés générales</u>	
Couleur , ASTM	1.0
Densité @ 15°C , kg/L	0.8666
Point de congélation , °C	-51
Chaleur spécifique kJ/kg	1.042
Conductivité thermique , W/m.°C	0.1367
Tension interfacial , mN/m	45
Solubilité de l'air , % par volume @ 15.6°C	9.8
<u>Viscosité</u>	
Centistokes @ 100°C	2.9
Centistokes @ -45°C	5200
<u>Propriétés électriques</u>	
Force diélectrique D877KV	35(Min)
Permittivité relative	2.2
Facteur de puissance % @ 100°C , 60Hz	0.50
<u>Niveau de saturation de l'eau</u>	
ppm @ 0°C	16
25°C	56
<u>Tendance gazeuse.</u>	
µl/min . ASTMD 2300 A ou B	négative
<u>Pression vapeur</u>	
40°C - microns	3
100°C - microns	350
150°C - mm	5
200°C - mm	45

Tableau V.5 : Caractéristiques physiques de l'huile VOLTESSO 35

CHAPITRE VI

ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE UN SYSTEME À CALODUC ET UN SYSTEME DE REFROIDISSEMENT À COMPRESSION

Dans notre étude expérimentale , on a fait appel au caloduc dans le but de refroidir les composants électroniques en question . A cet effet , on a jugé très important de différencier le mode de fonctionnement de ce système et celui à compression. Avant d'entamer l'étude comparative , on peut expliquer encore une fois les raisons qui nous ont poussé à faire un tel choix.

Les facteurs comme le prix , la taille , le poids , la résistance thermique très faible et son utilisation ces dernières années dans le domaine de l'électronique nous ont fortement encouragé.

Le système caloduc est utilisé pour évacuer des flux de chaleur de faible puissance . Par contre , le système de refroidissement à compression est utilisé pour évacuer des puissances très élevées.

On rencontre les systèmes à compression dans les stations d'énergie des centres de télécommunications équipés de plusieurs onduleurs et redresseurs . Ils sont utilisés dans divers domaines où la nécessité d'évacuer la chaleur s'avère importante.

VI.1 Comparaison entre le système à caloduc et le système de réfrigération à compression.

A travers cette étude , on rappellera brièvement le fonctionnement du système caloduc qui a été déjà présenté dans un chapitre précédent . On rappellera aussi d'autres considérations importantes.

On sait que le système caloduc opère en deux phases à savoir l'évaporation et la condensation. Ces deux phases existent en même temps à l'intérieur du caloduc . La différence entre le système à caloduc et le système de refroidissement à compression réside dans le fait qu'entre l'évaporation et la condensation il y'a la compression du liquide réfrigérant . Dans l'état inverse, c'est-à-dire de la condensation à l'évaporation il y'a d'abord le phénomène de la détente , ainsi qu'une régulation du liquide réfrigérant nécessaire à l'évaporation de ce dernier en fonction du débit d'air à refroidir. Donc le système à compression possède quatre phases séparées dont chacune est réalisée par un élément spécialisé . Ces quatre phases sont : l'évaporation , la compression , la condensation et la détente.

Donc , on se contente de ce raisonnement afin d'expliquer la différence déjà citée , entre ces deux modes de fonctionnement (caloduc et système de compression). Les étapes de fonctionnement de chaque phase seront abordées dans l'étude consacrée au système à compression. Le choix du liquide réfrigérant pour les deux systèmes dépend des types d'applications. Pour le système à compression les réfrigérants utilisés sont : R-11 , R-12 , R-22 , R-500 , R-502 , R-503 et l'R-717 [7].

Quand au caloduc la sélection du fluide qui convient est un facteur très

important dans sa conception . Ceci est dû au fait que l'opération de base du caloduc est l'évaporation et la condensation du fluide.

La variation de la température opératoire adéquate pour l'application est très importante . La plupart des applications des caloducs dans le contrôle thermique des composants électroniques exige la sélection du fluide avec une température d'ébullition entre 250 et 375 K [3].

On retrouve les fluides comme l'ammoniac , le fréon11 ou 113 , l'acetone , le methanol et l'eau.

Pour limiter la mèche capillaire du caloduc , les caractéristiques d'un bon fluide sont :

- La chaleur latente élevée d'évaporation ,
- Une tension de surface élevée ,
- Une basse viscosité du liquide .

Ce groupement des propriétés peut être utilisé pour évaluer divers fluides à des températures opératoires spécifiques.

Le réfrigérant utilisé par notre système caloduc est le fréon-12 , on donnera ci-dessous ses caractéristiques.

VI.1.1 Caractéristiques du fréon-12 utilisé par le caloduc:

Le fréon-12 est un réfrigérant très populaire . C'est un liquide sans couleur , sans odeur. Sa température d'ébullition à la pression atmosphérique est de -29°C . Il est non toxique , non corrosif , non irritant , non inflammable.

Chimiquement , il est inerte à des températures ordinaires et thermiquement

stable au dessus de 427 °C [7].

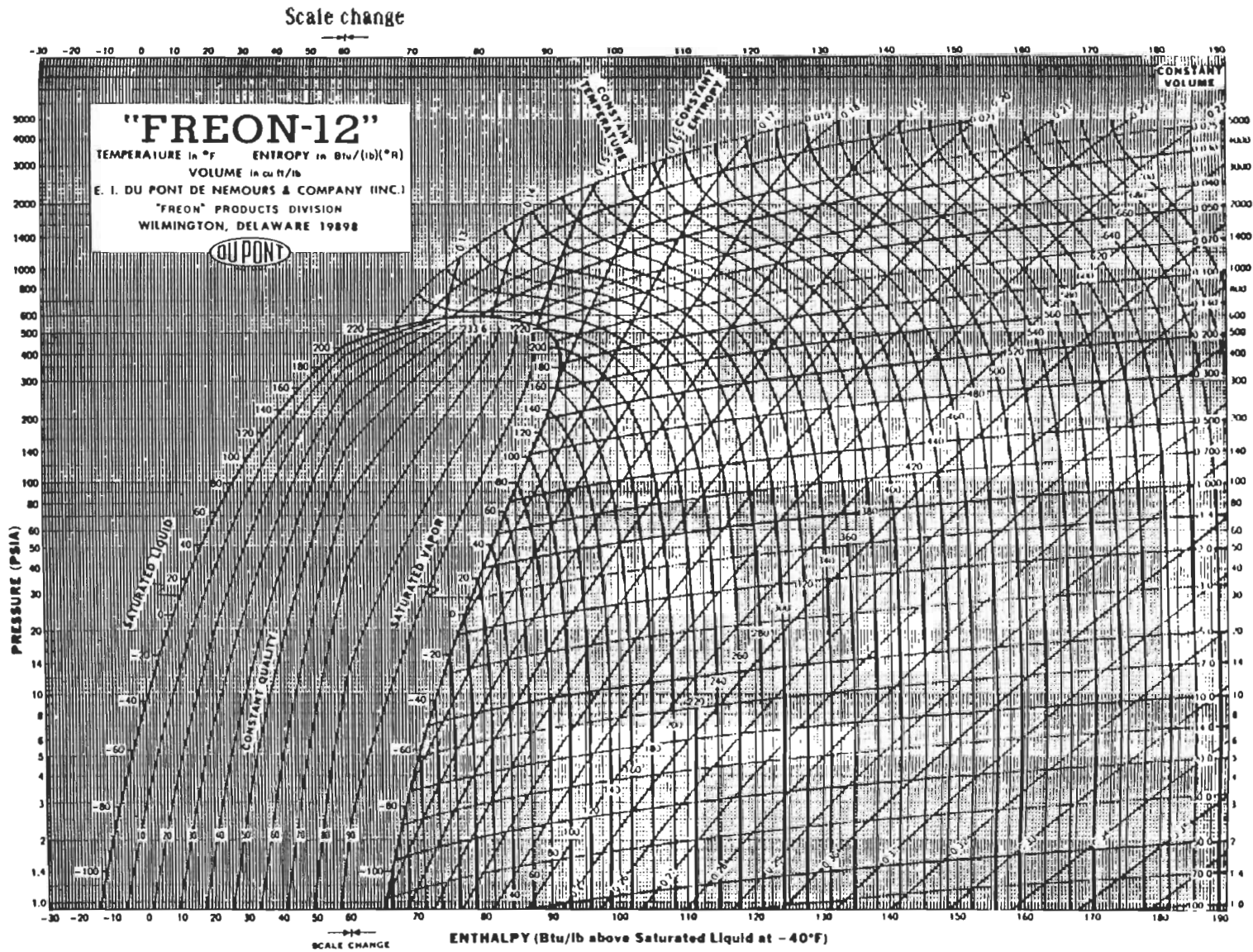
Les fuites de fréon-12 peuvent être détectées de plusieurs façons :

- Solution savonneuse ,
- L'huile colorée additionnée au système ,
- Détecteur de fuite électronique.

Le fréon-12 est plus critique dans sa constitution quand il est comparé au fréon-22 ou au fréon-502. Le fréon-12 est soluble dans l'huile au dessous de -90 °F (-68 °C). Il facilite la circulation de l'huile dans les évaporateurs très froids . A cette température , l'huile commence à se séparer du fait qu'elle est plus légère que le réfrigérant , et s'accumule sur la surface du liquide réfrigérant [7].

Le diagramme enthalpique du fréon-12 est montré en figure VI.1 [7] .

Figure VI.1 : Diagramme enthalpique du fréon -12 .



L'enthalpie est la mesure de la quantité d'énergie de la substance. La valeur enthalpique est déterminée par la température et la pression de la substance.

Le cycle frigorifique du fréon-12 est montré à la figure VI.2.

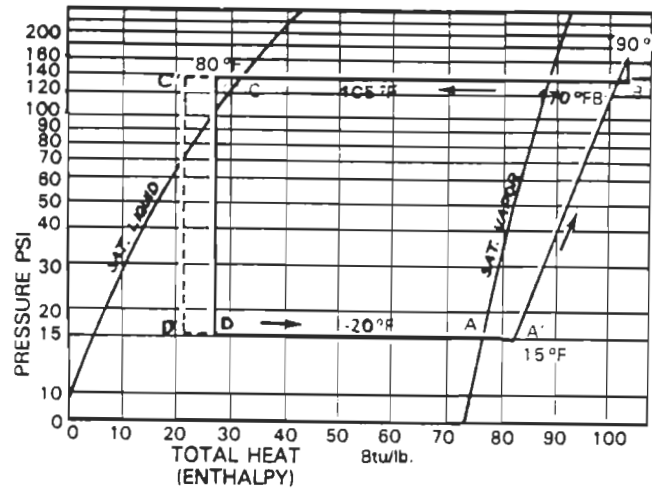


Figure VI.2 : Cycle frigorifique du fréon-12

Le trait en pointillé entre C' et D' montre l'effet de la réfrigération quand le liquide subit un sous-refroidissement dans le condensateur à travers la ligne liquide. Ce sous-refroidissement demande une température ambiante basse ou un échangeur de chaleur.

La chaleur est absorbée dans l'évaporateur de D à A. Les vapeurs sont comprimées par le compresseur de A' à B'. La chaleur est évacuée par le condensateur de B' à C' [7].

La chute de pression est effectuée de C' à D [7].

VI.2 Principe des systèmes de réfrigération à compression

Pour expliquer les étapes d'un cycle du système de réfrigération à compression , on va se baser sur le diagramme de Mollier ou diagramme du cycle frigorifique de la figure VI.2.

Dans ce diagramme , on remarque la présence de quatre étapes à savoir : l'évaporation , la compression , la condensation et la détente.

Les organes effectuant chacune de ces étapes portent le nom respectivement de : évaporateur , compresseur , condensateur et détenteur .

Ces organes groupés ensemble forment un système de réfrigération à compression , dont on exposera le rôle de chacun.

a/ L'évaporateur

C'est le dispositif dans lequel le fréon , mis en contact au travers d'une paroi dite surface d'échange , avec un autre fluide s'évapore.

Le fréon , à l'entrée de l'évaporateur , se trouve dans sa phase de changement d'état , ce qui signifie que le moindre apport calorifique va lui permettre de se vaporiser . Il suffit de placer l'évaporateur au contact d'eau ou d'air pour que le fréon s'évapore en absorbant des calories au détriment du milieu ambiant . Il se produit donc un refroidissement de ce milieu . Le débit du fréon dans l'évaporateur est régulé de façon à obtenir une surchauffe par rapport au diagramme théorique.

Cette surchauffe implique que le fréon est obligatoirement dans la zone vapeur comme montré à la figure VI.3 [15] .

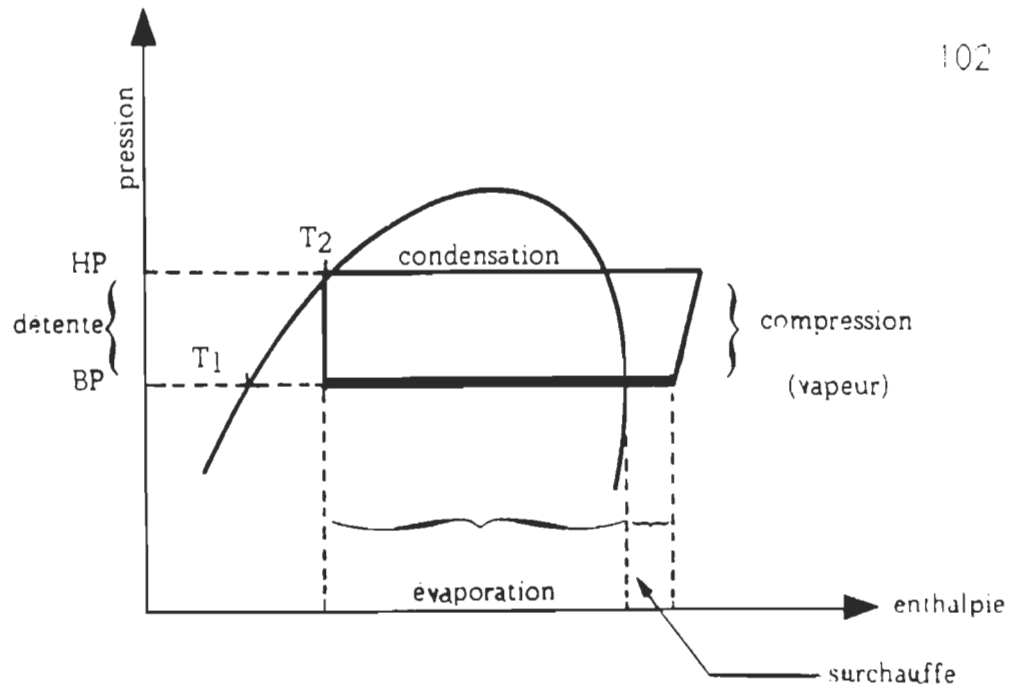


Figure VI.3 : Diagramme théorique du fréon-12 pendant la phase d'évaporation

Le compresseur, situé juste après l'évaporateur, est donc assuré de n'aspirer et comprimer que du gaz [15].

b/Le compresseur :

Pour que le fréon revienne à son état initial (liquide), il faut qu'il se condense en cedant des calories à un agent extérieur plus froid que sa température de condensation.

Afin d'utiliser un moyen simple, c'est-à-dire l'eau ou l'air, il est nécessaire d'élever la température de condensation du fluide frigorigène.

Ceci est réalisé en élevant la pression des vapeurs de fréon au moyen d'un compresseur que l'on montre à la figure VI.4.

Celui-ci a pour deuxième rôle de faire circuler le fréon [15].

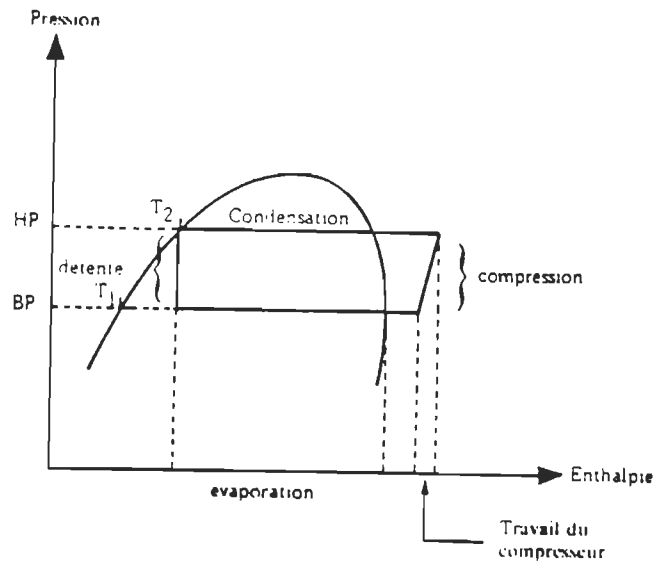


Figure VI.4 : Diagramme théorique du fréon-12 pendant la phase de compression

C/ Le condensateur :

Son rôle est de convertir ce gaz chaud à haute pression , refoulé par le compresseur , en liquide.

Pour assurer cette conversion , il faut extraire des calories (chaleur latente) du gaz donc le refroidir . Deux agents peuvent être utilisés , l'eau ou l'air.

Le condensateur est calculé pour provoquer un sous-refroidissement du liquide de façon à obtenir une plage de changement d'état (évaporation) plus importante . Cette plage détermine la puissance frigorifique.

Ce sous-refroidissement implique que le fréon est obligatoirement dans la zone liquide .

La figure VI.5 montre la différence entre les diagrammes théorique et réel [15].

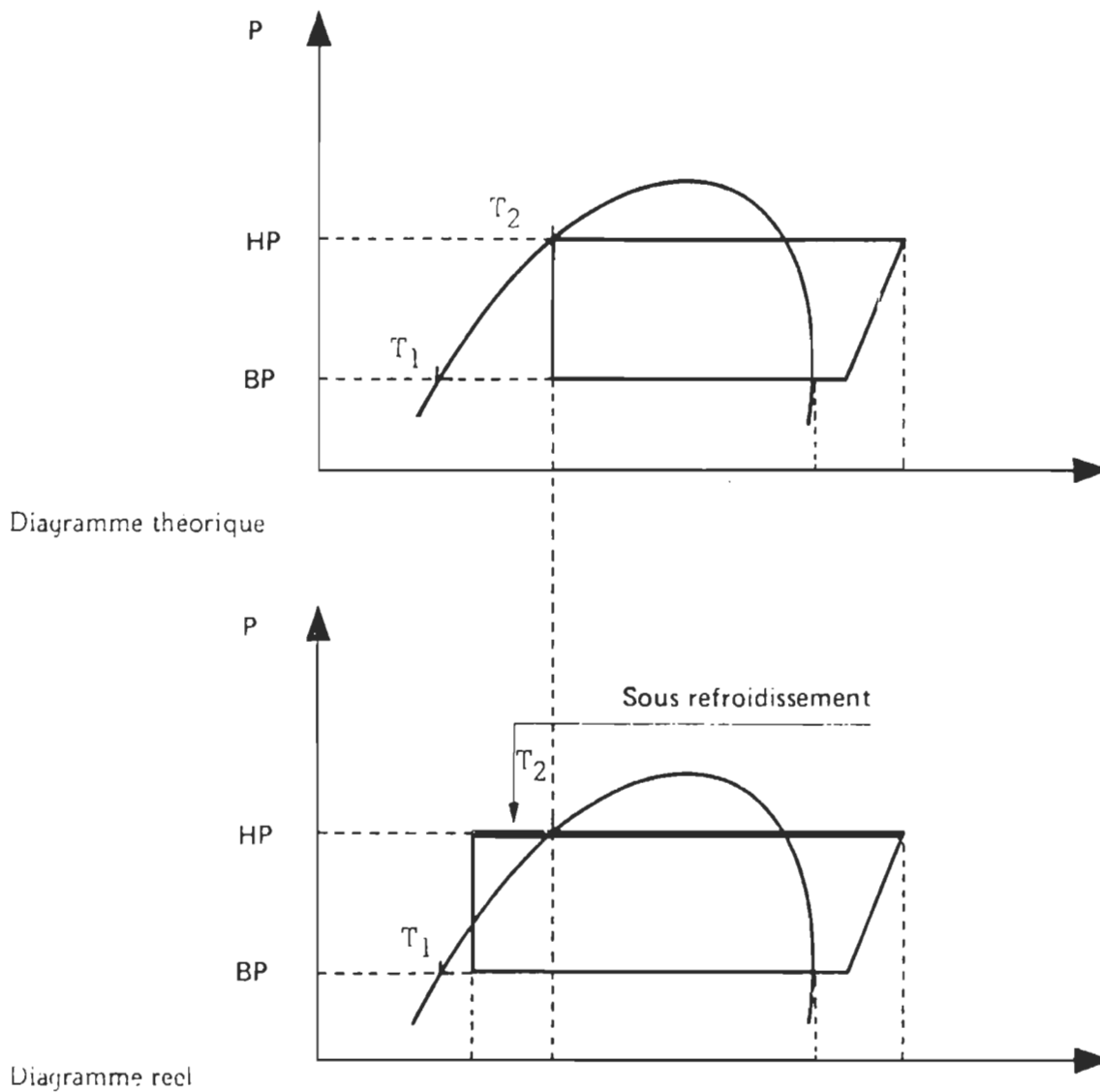


Figure VI.5 : Différence entre les diagrammes théorique et réel pendant la phase de condensation .

d/ Le détendeur:

À la sortie du condensateur , le fréon est à l'état de liquide à haute pression.

Le but du détendeur est de faire retomber la pression de ce fluide à son état initial : liquide basse pression . Ceci est réalisé en contrôlant le débit d'entrée dans l'évaporateur . Le détendeur limite l'arrivée de fluide frigorigène à la seule quantité pouvant être évaporée par l'apport calorifique . (Chaleur latente + surchauffe 5 à 6°) du fluide à réfrigérer.

Dans la phase changement d'état , températures et pressions étant liées , il suffit de contrôler la température de sortie de l'évaporateur pour régler débit et basse pression.

Le détendeur le plus utilisé est le détendeur thermostatique.

La figure VI.6 montre le schéma d'un détendeur.

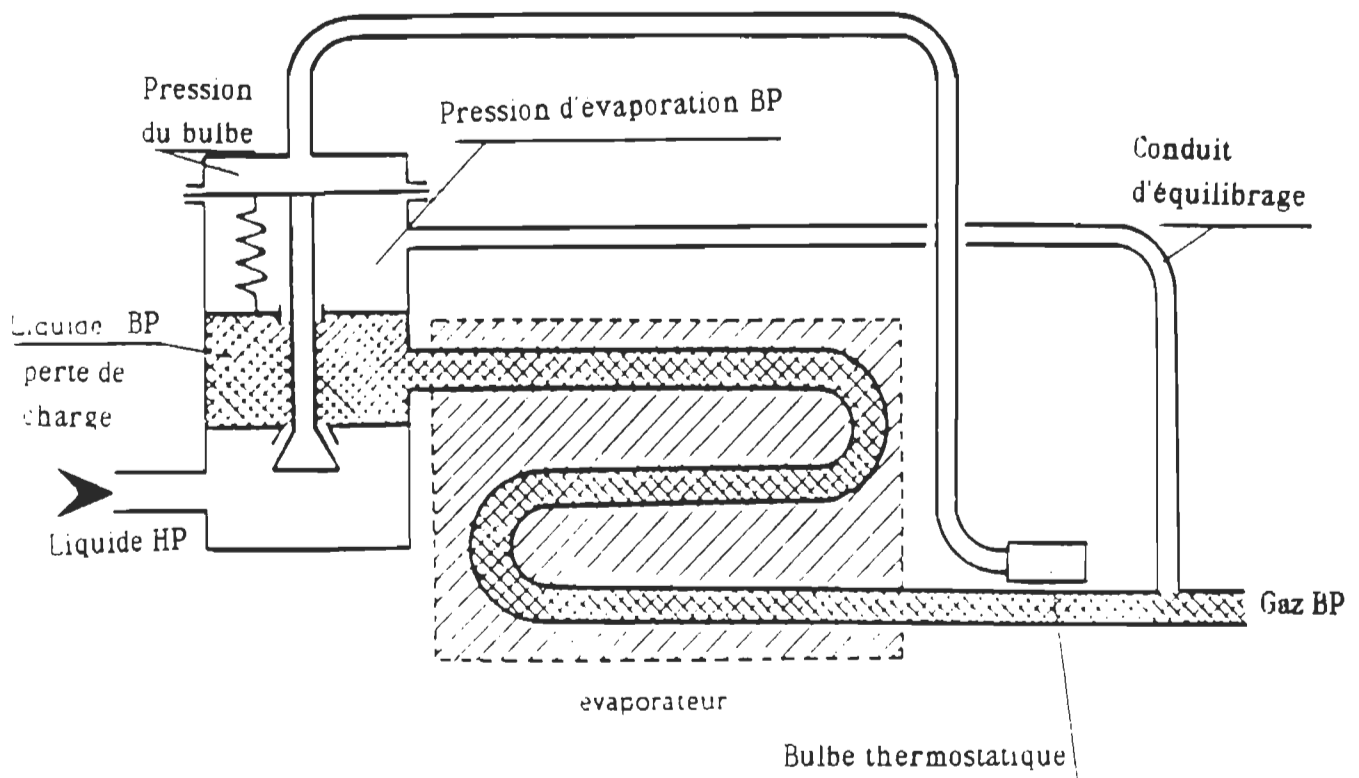


Figure VI.6 : Schéma d'un détendeur.

Donc , d'après cette étude comparative permettant l'analyse du mode de fonctionnement des deux systèmes à savoir : système caloduc et système à compression , on conclut que le dernier à une structure complexe par rapport au premier .

Les critères qui avantagent le système à caloduc par rapport au système à compression sont : son faible poids , sa petite taille , son coût très minime , sa facilité d'intégration avec les équipements électroniques ainsi que sa commodité d'emploi . Du point de vue économique , son utilisation est très encourageante .

CHAPITRE VII

RÉSULTATS DE L'ÉTUDE EXPÉRIMENTALE

VII.1 Description du montage expérimental et les équipements utilisés

Les mesures de température sont prises au moyen de thermocouples et d'un système d'acquisition de données montré à la figure VII.1 [9].

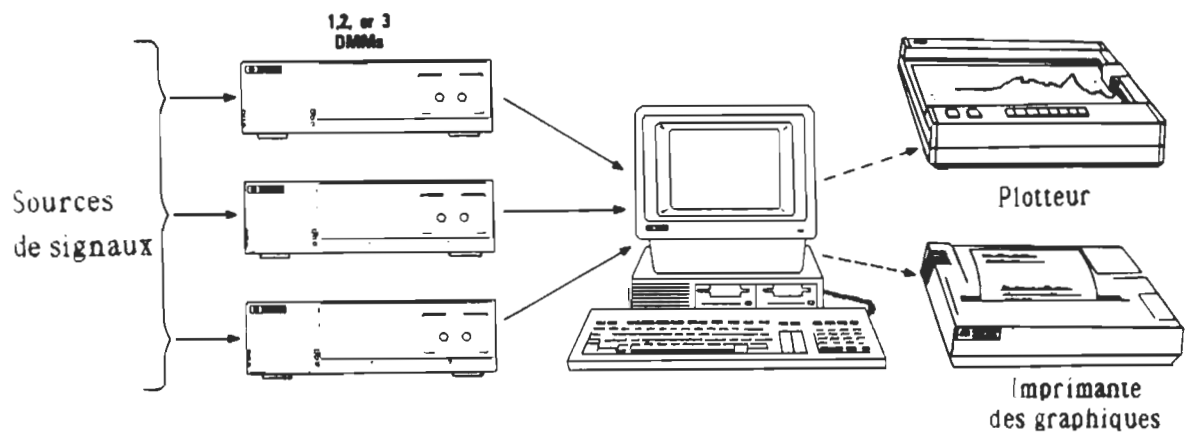


Figure VII.1 : Schéma du système d'acquisition utilisé [9].

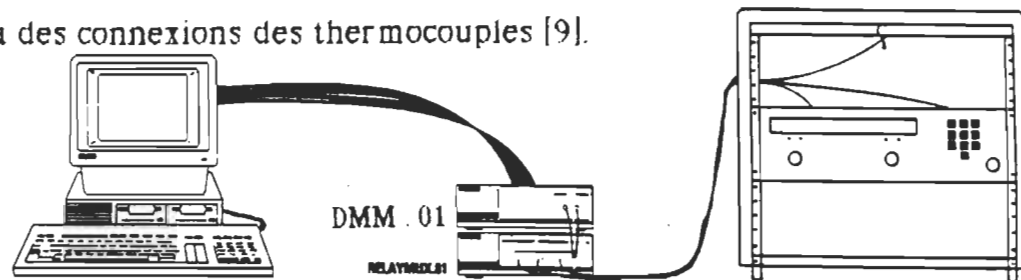
Ce système remplit les quatre fonctions suivantes:

- mesure des tensions,
- **multiplexage des thermocouples.**
- enregistrement analogique.

- modification du programme de visualisation sur l'écran (en Basic)

On utilise le module de programme multiplexeur de thermocouples pour faire l'acquisition des températures en plusieurs instants sur les différents composants du convertisseur [9].

La figure VII.2 montre l'application " scanner " des thermocouples et le schéma des connexions des thermocouples [9].



Applications " scanner " des thermocouples types

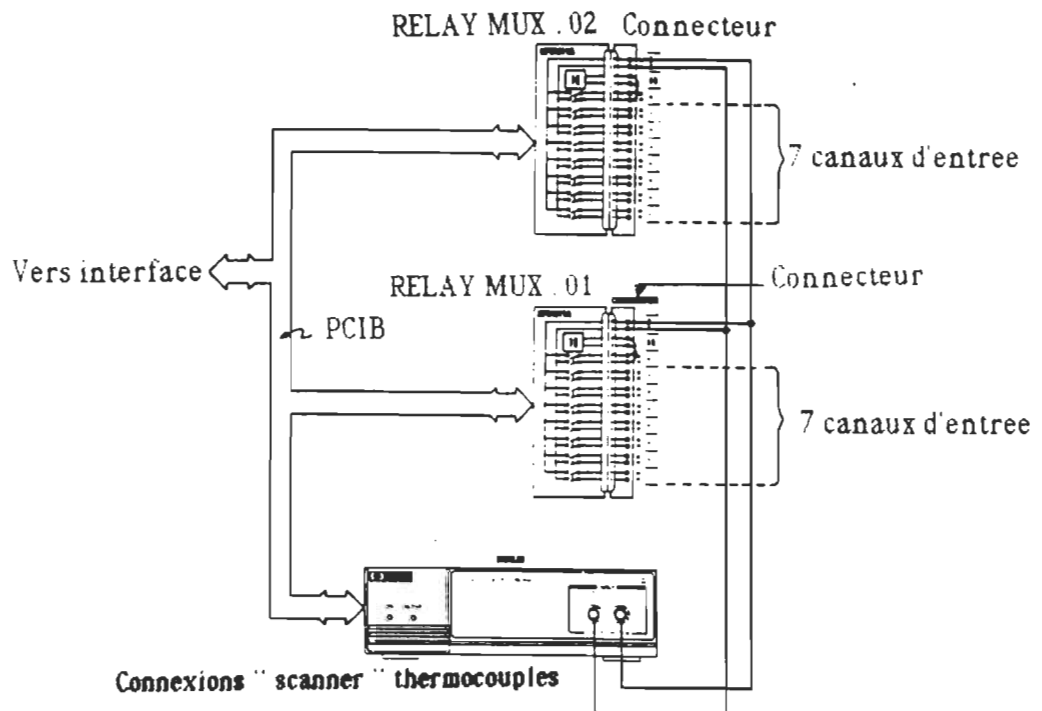


Figure VII.2 : Schéma de l'application "scanner" thermocouple et des connexions des thermocouples .

Du fait que le convertisseur se trouve à environ quatre metres du relais multiplexeur, on a connecté chaque thermocouple a ce module par deux fils

torsadés et entourés, chacun, par un écran mis à la masse. Ceci permet de réduire au maximum l'influence des perturbations.

La figure VII.3 montre le schéma du montage expérimental raccordé au système d'acquisition de données.

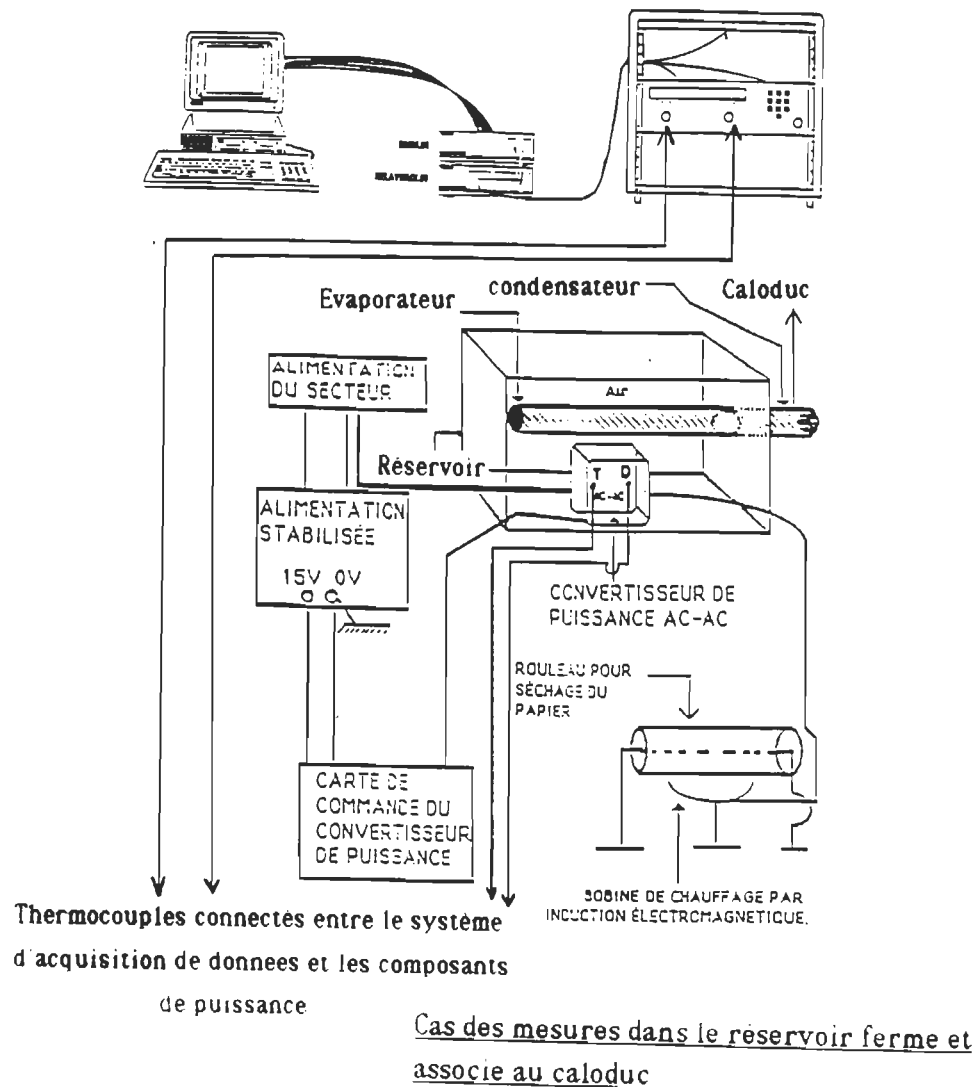


Figure VII.3 : Schéma du montage expérimental raccordé au système d'acquisition de données .

La prise des mesures de la température a été précédée des préparatifs suivants:

- on a connecté la sortie de la température de référence du relais multiplexeur à son canal numéro 8 ;
- on a arrangé la procédure d'acquisition de telle sorte que chaque thermocouple soit consulté chaque minute sur une plage de durée qu'on fixe nous même et ce en remplissant d'une manière appropriée certains fichiers ;
- on a rempli ces fichiers de telle sorte que les données soient visualisées en temps réel;
- on a stocké la configuration d'application dans un fichier "Tempest";
- on a stocké la configuration "Template" dans un fichier qu'on a nommé "Graftemp";
- on a réservé un fichier où devaient être stockées les mesures ;

Afin d'avoir la meilleure précision , on a utilisé le plus petit calibre qui est de 200 mV . Ce choix est fait en remplissant la configuration d'application.

Dans cette configuration , on a également fixé la vitesse de multiplexage , celle du multimètre digital sur la position " lent " pour avoir le maximum de précision. La visualisation de sortie est préréglée en remplissant " Template".

- on a choisi la graduation de l'axe des temps en minutes et celle de l'axe des températures en degré Celsius , le titre et les libellés [9].

Après avoir terminé convenablement la configuration du système d'acquisition de données , on a pesé sur la clé "Start", la scrutation des thermocouples a commencé et les données ont été tracées immédiatement après chaque multiplexage. Une fois l'acquisition de données achevée, on a pu les

sauvegarder dans un fichier de sortie qu'on a préalablement ouvert . On a pu également retracer les courbes de température en fonction du temps en entrant dans la configuration d'application puis en effaçant le contenu de l'espace réservé aux données de sortie correspondantes à ces courbes dans le champ de données d'entrées [9].

VII.2 Mesures des températures avec une caméra infra-rouge

Avant de présenter les résultats des mesures des températures obtenus à partir des thermocouples et du système d'acquisition de données , on aimerait d'abord montrer ceux réalisés à l'aide d'une caméra à infra-rouge . On signale qu'avec cette caméra (infra-rouge) , il n'était possible d'avoir que des mesures de température à la face externe du réservoir et du caloduc , du fait d'un faible facteur d'emissivité du réservoir . Durant les mesures , la caméra a été placée en face du montage expérimental . La figure VII.4 montre des photos prises à l'aide de cette camera . On observe des courbes montrant les valeurs extrêmes (maximum et minimum) des températures ainsi que l'écart entre elles et l'heure de saisie. La figure VII.5 montre des photos prises avec la caméra deux heures plus tard , soulignons que le convertisseur était toujours en état de fonctionnement. D'après les courbes , on remarque une élévation de température . Étant donné qu'avec ce moyen on ne peut pas avoir des mesures de température des composants électroniques au niveau des jonctions , alors on a fait appel aux thermocouples et au système d'acquisition de données dans le but d'obtenir ces mesures.

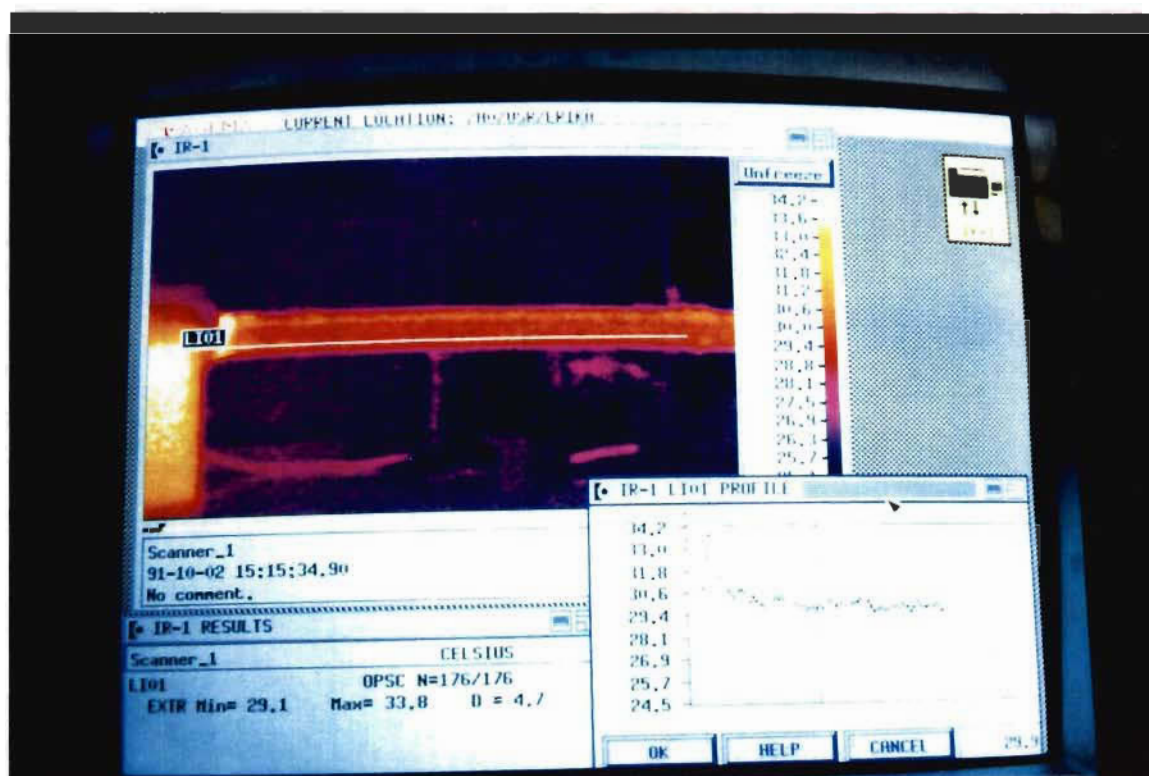
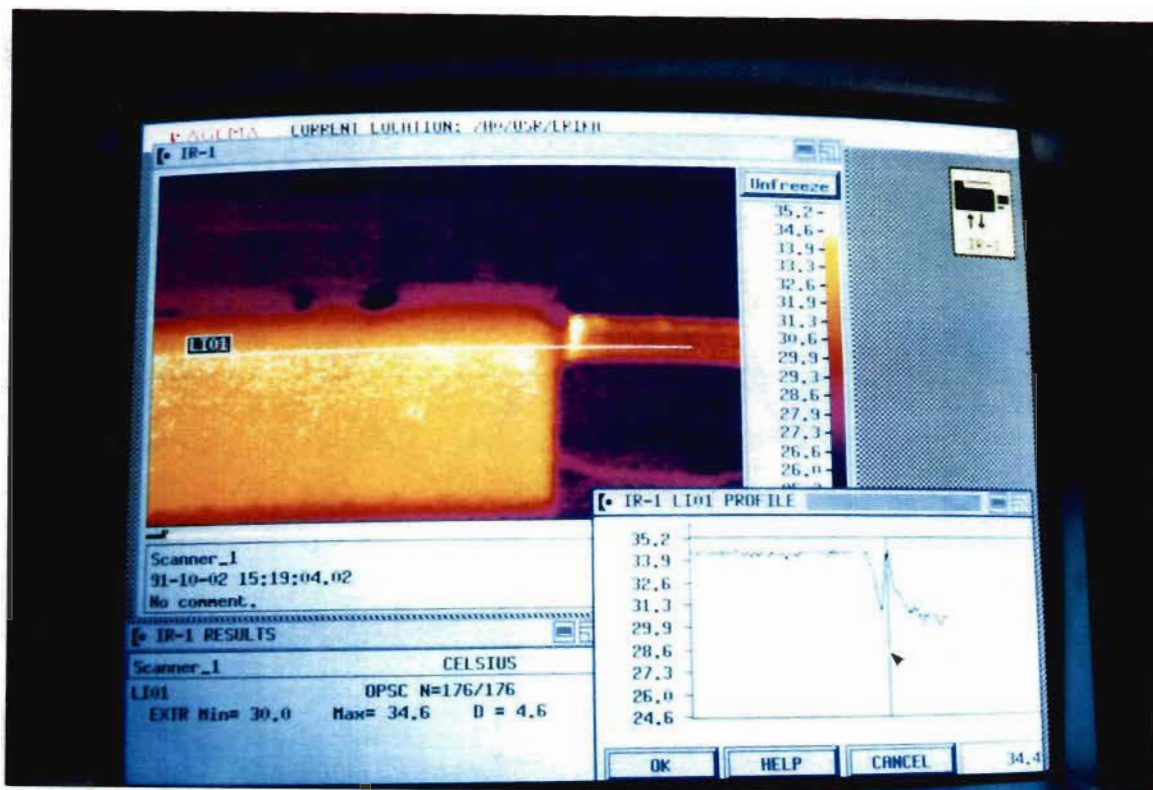


Figure VII.4 : Photos prises à l'aide d'une caméra Infra-rouge placée en face du montage expérimental .

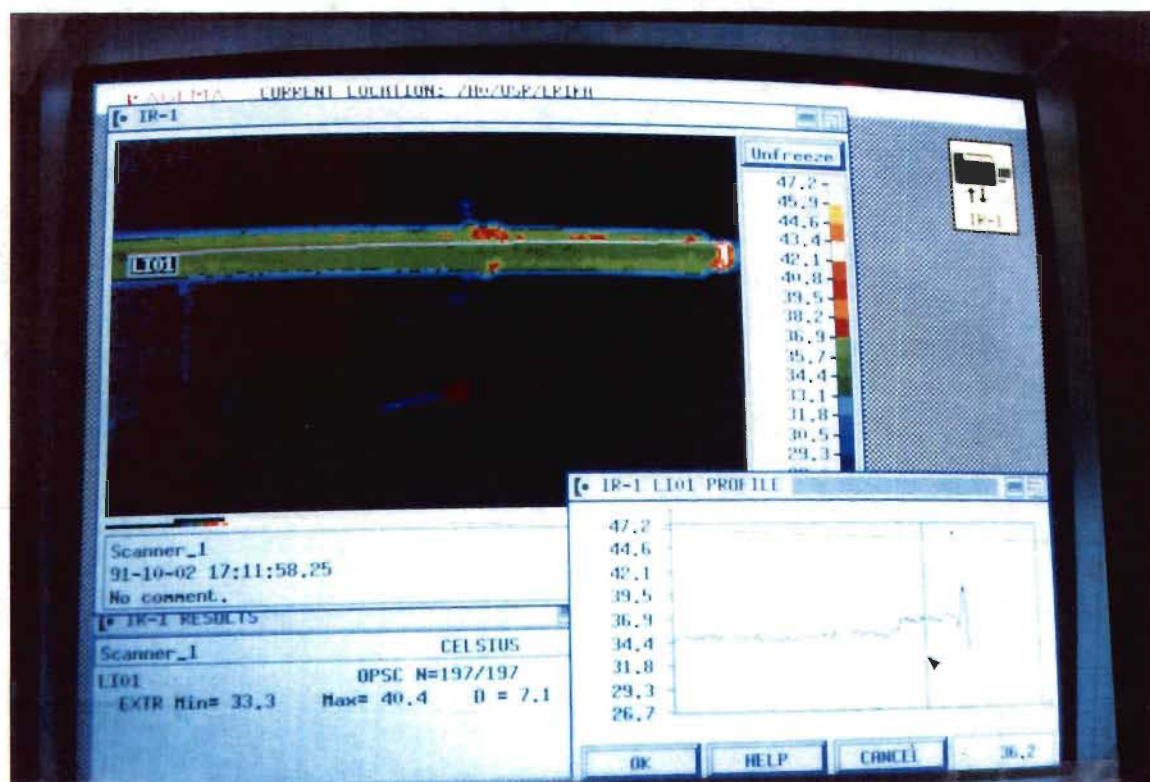
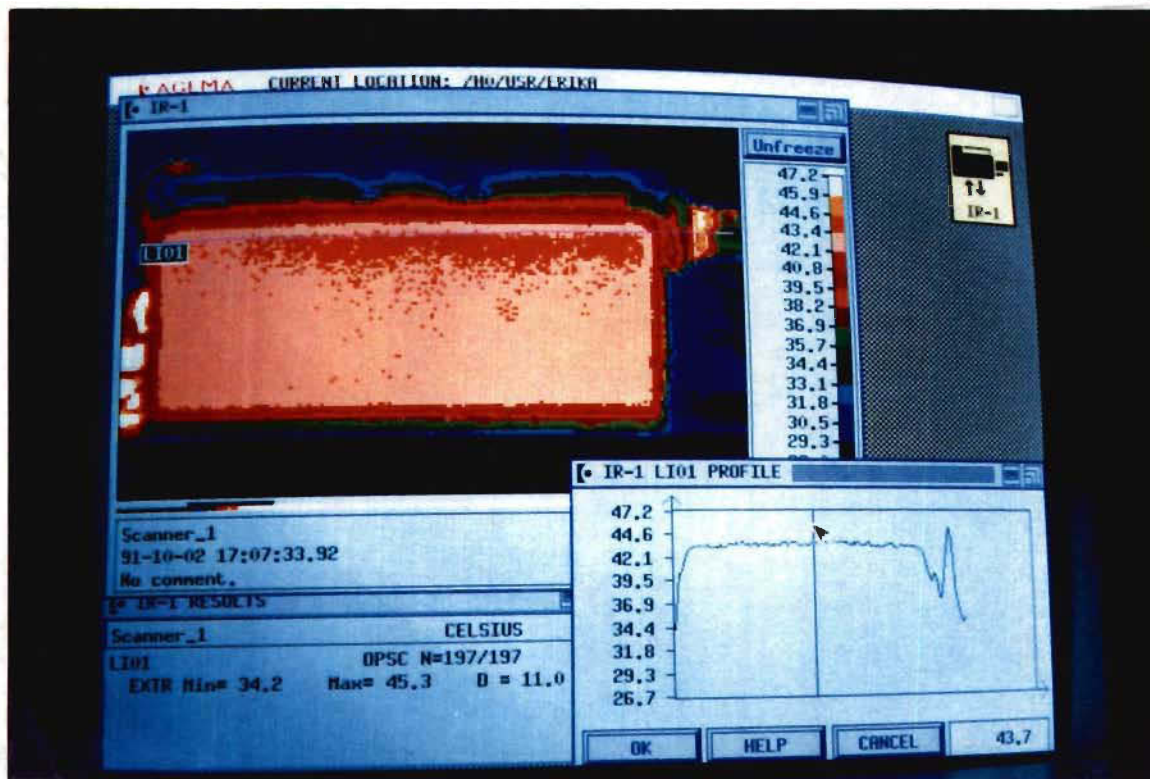


Figure VII.5 : Photos prises avec caméra infra-rouge deux heures plus tard

VII.3 Résultats de l'étude expérimentale avec le caloduc et sans liquide-fluide fluorinert

Au cours de notre étude expérimentale nous avons procédé aux mesures de la température des différents composants du convertisseur à savoir: le thyristor, la diode et le " snubber ", ainsi que celle du radiateur .

Au début , nous avons procédé aux mesures dans l'air ambiant, puis dans le réservoir fermé et finalement dans le réservoir fermé associé au caloduc , afin de les comparer (Voir figure VII.6 qui schématise les 3 cas).

Soulignons que l'expérience faite dans l'air ambiant , permet d'avoir une idée sur la variation de température en l'absence du réservoir.

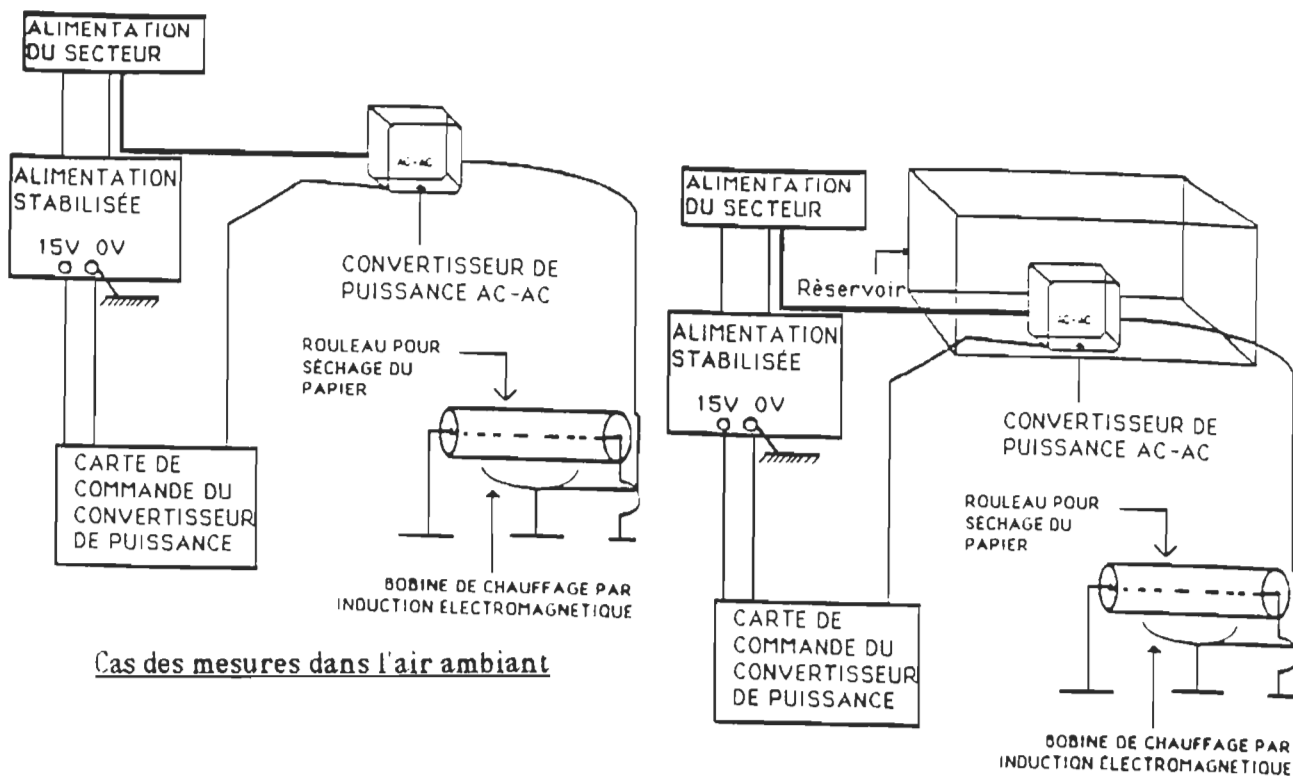
Notons que dans l'usine des pâtes et papiers au Canada , où on utilise ce convertisseur , le réservoir sert à la sécurité du personnel d'une part , et d'autre part il permet la protection contre la poussière , l'humidité et les débris de pâtes et papiers.

Les résultats des mesures sont donnés dans les courbes ci-jointes et relevés à l'aide du système d'acquisition de données .

A partir de mesures répétées , nous avons calculé dans l'air ambiant les températures moyennes des composants qui sont les suivantes :

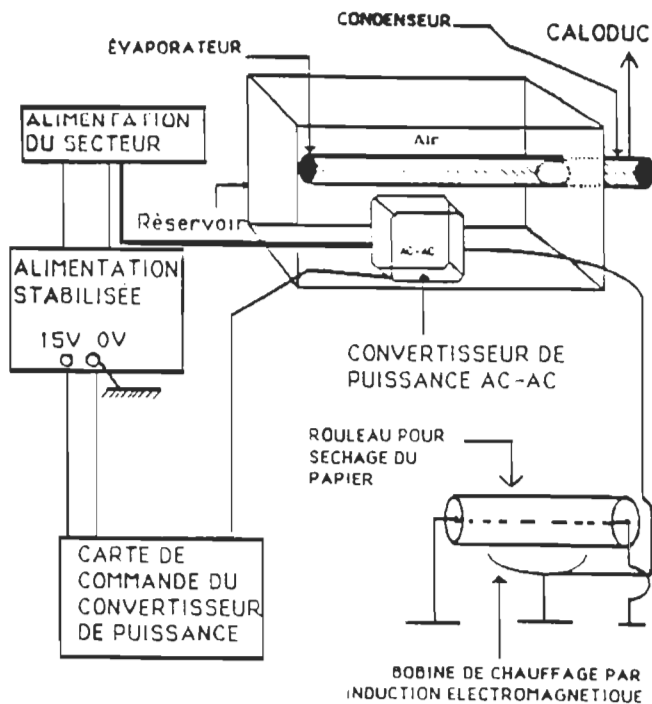
- sur le boîtier du thyristor: 67 °C;
- sur le boîtier de la diode : 70 °C;
- à la base des ailettes : 67 °C;
- au niveau de la partie centrale de la surface extérieure de la résistance :122°C.

La température moyenne du thyristor dans le réservoir fermé est de 74°C. Ce résultat est justifié par le fait que la chaleur s'accumule dans le réservoir. En effet cette dernière qui ne trouve pas d'issue pour être évacuée à l'extérieur, contribue à l'augmentation de la température dans le réservoir. Finalement les résultats avec réservoir fermé et associé au caloduc ont donné une valeur égale à 64°C, c'est un résultat que nous jugeons important, du fait que la température a chuté de 10° C.



Cas des mesures dans l'air ambiant

Cas des mesures dans le reservoir ferme



Cas des mesures dans le réservoir fermé et associé au caloduc

Figure VII.6 : Figure schématisant les trois cas de mesures .

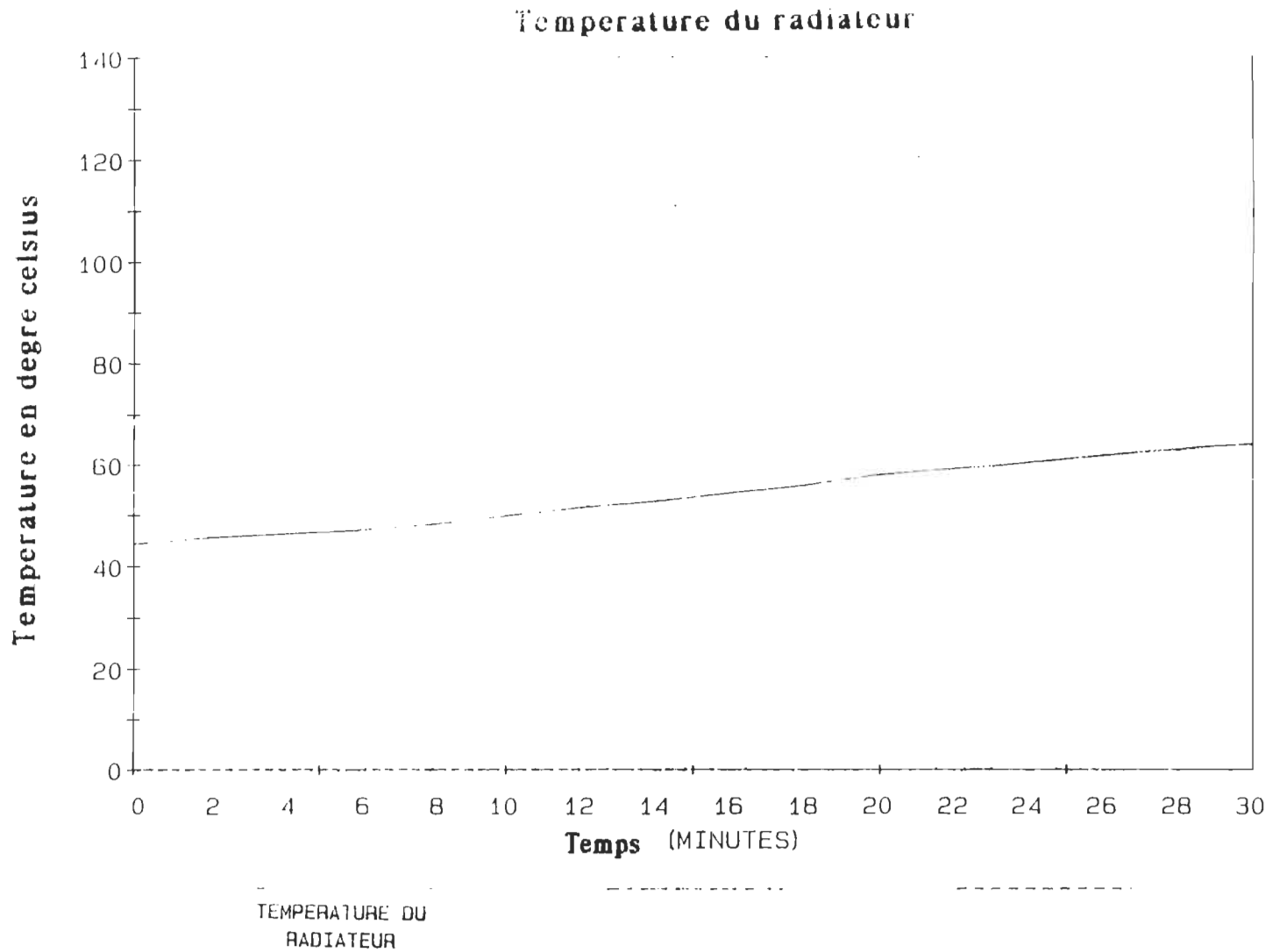


Figure VII .7 : Relevé de la mesure de température du radiateur sur lequel sont fixés la diode de puissance et les deux thyristors .

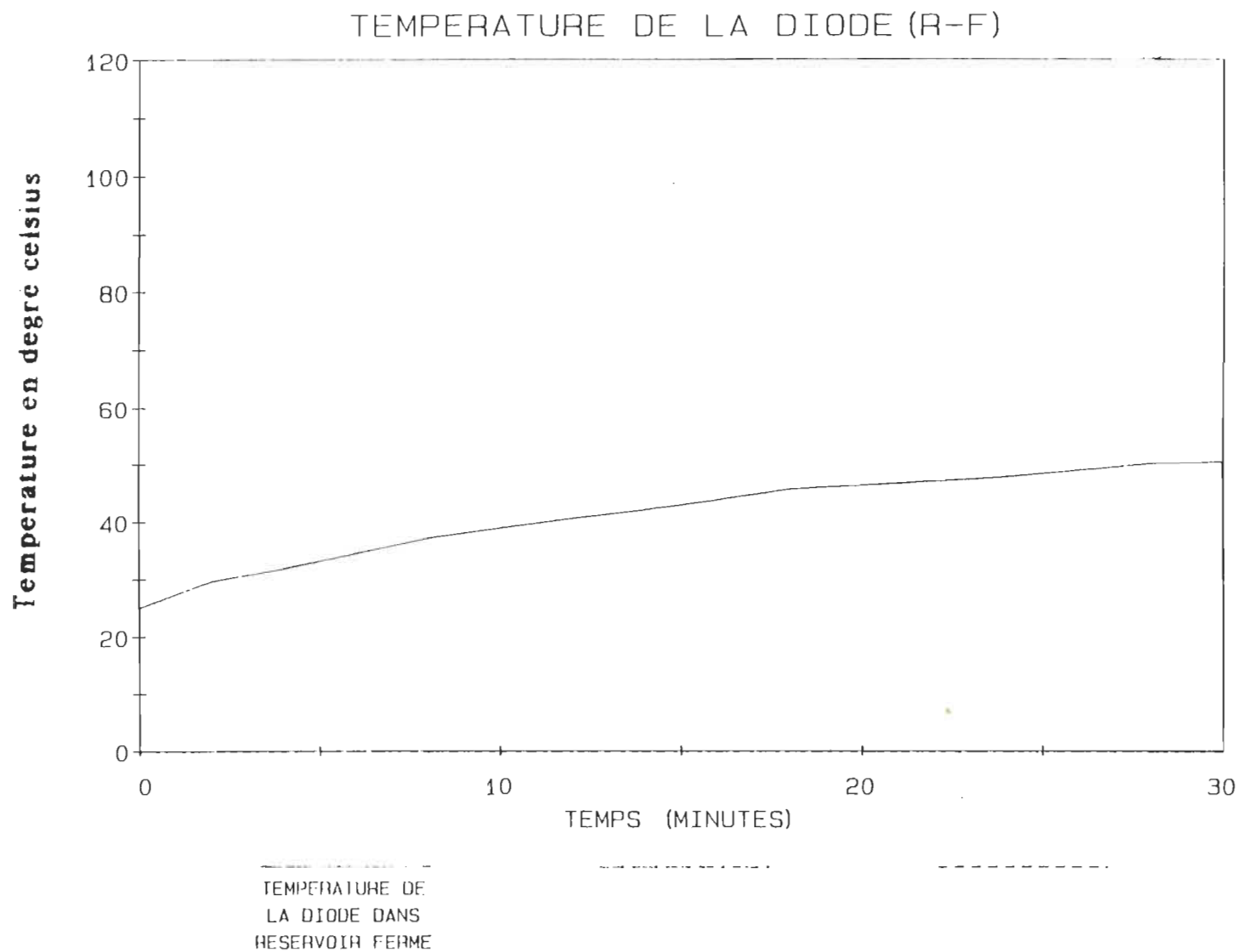


Figure VII . 9 : Relevé de la mesure de température de la diode dans le réservoir fermé .

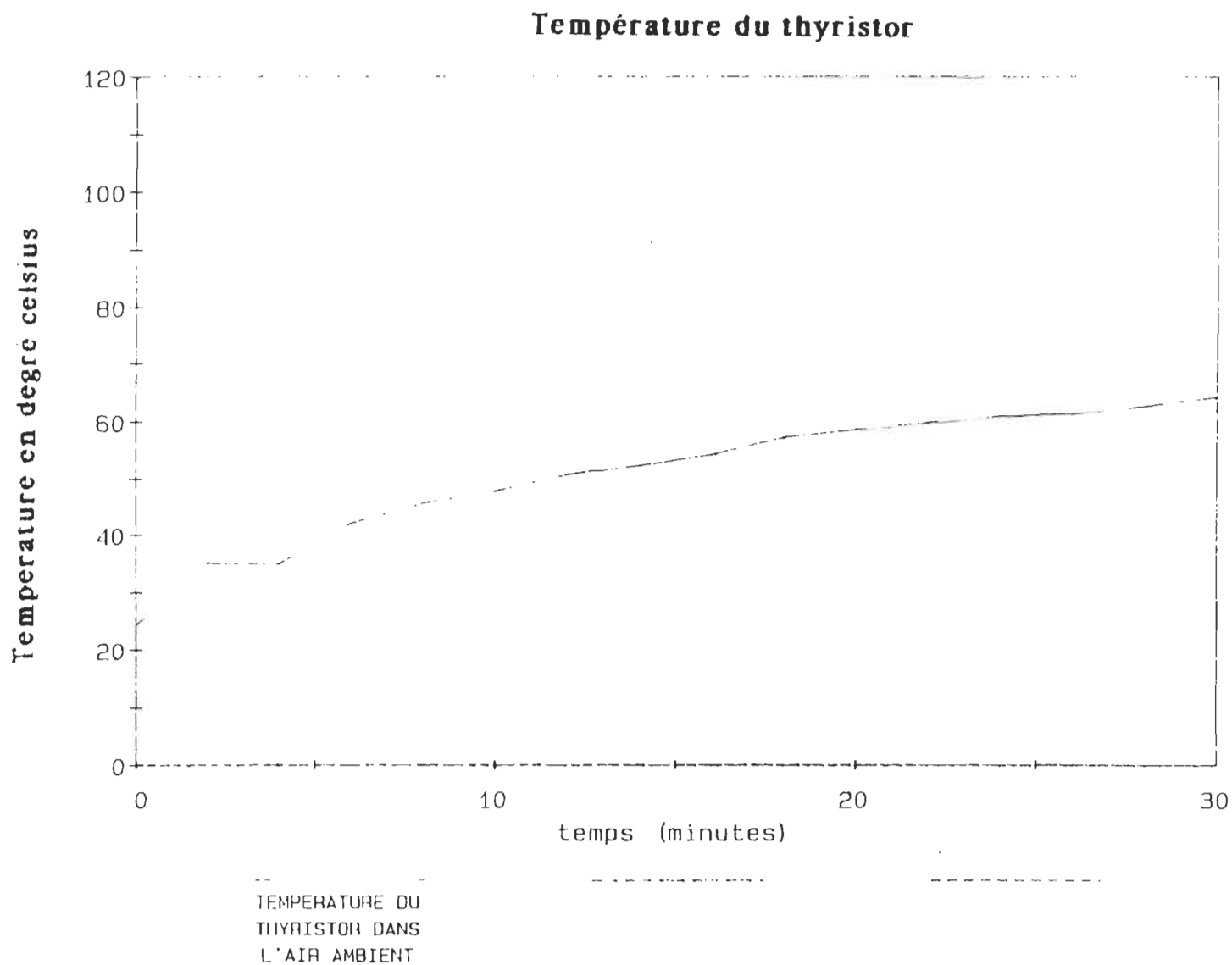


Figure VIII .11 : Relevé de la mesure de température du thyristor dans l'air ambiant .

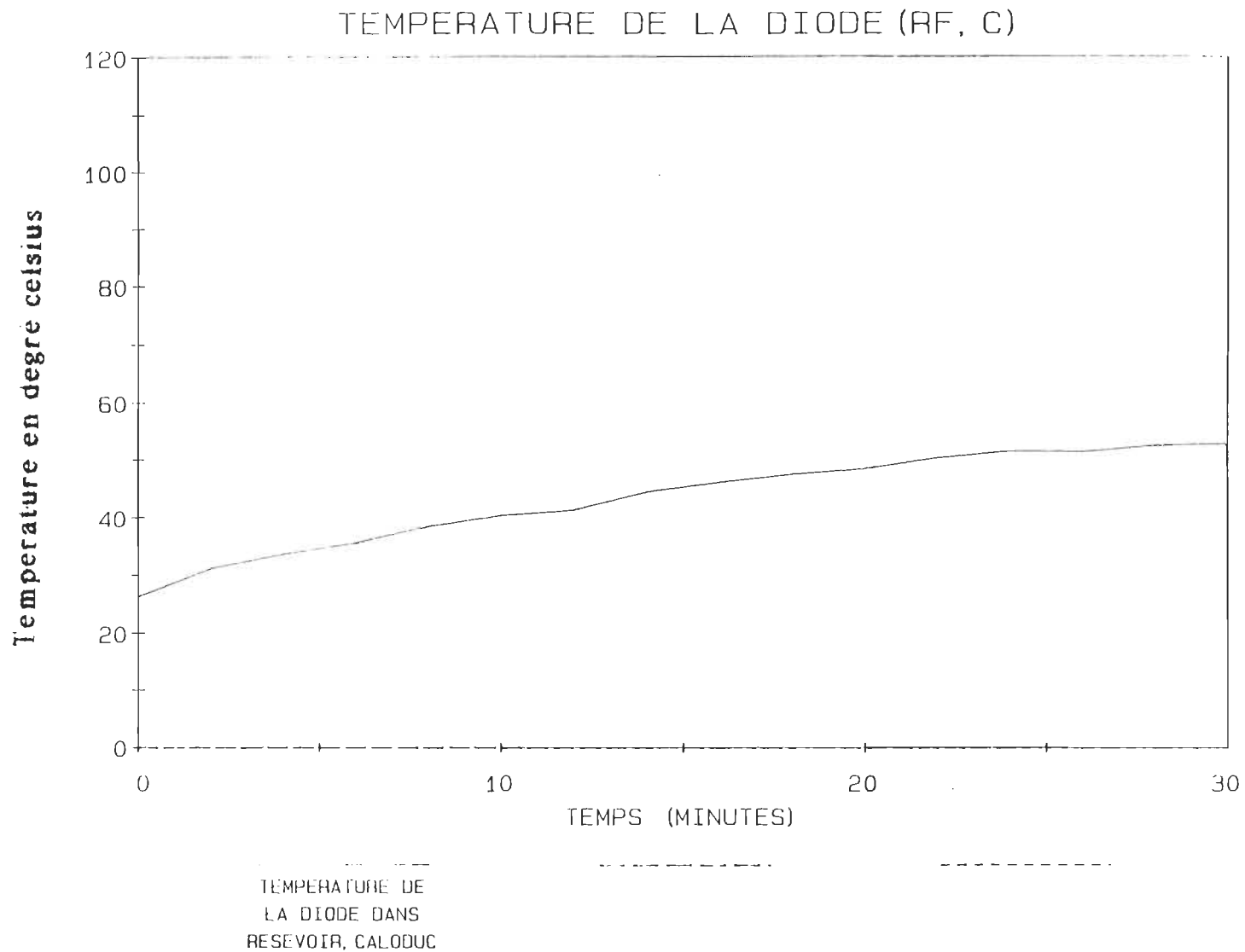


Figure VII . 10 : Relevé de la mesure de température de la diode dans le réservoir fermé et associé au caloduc .

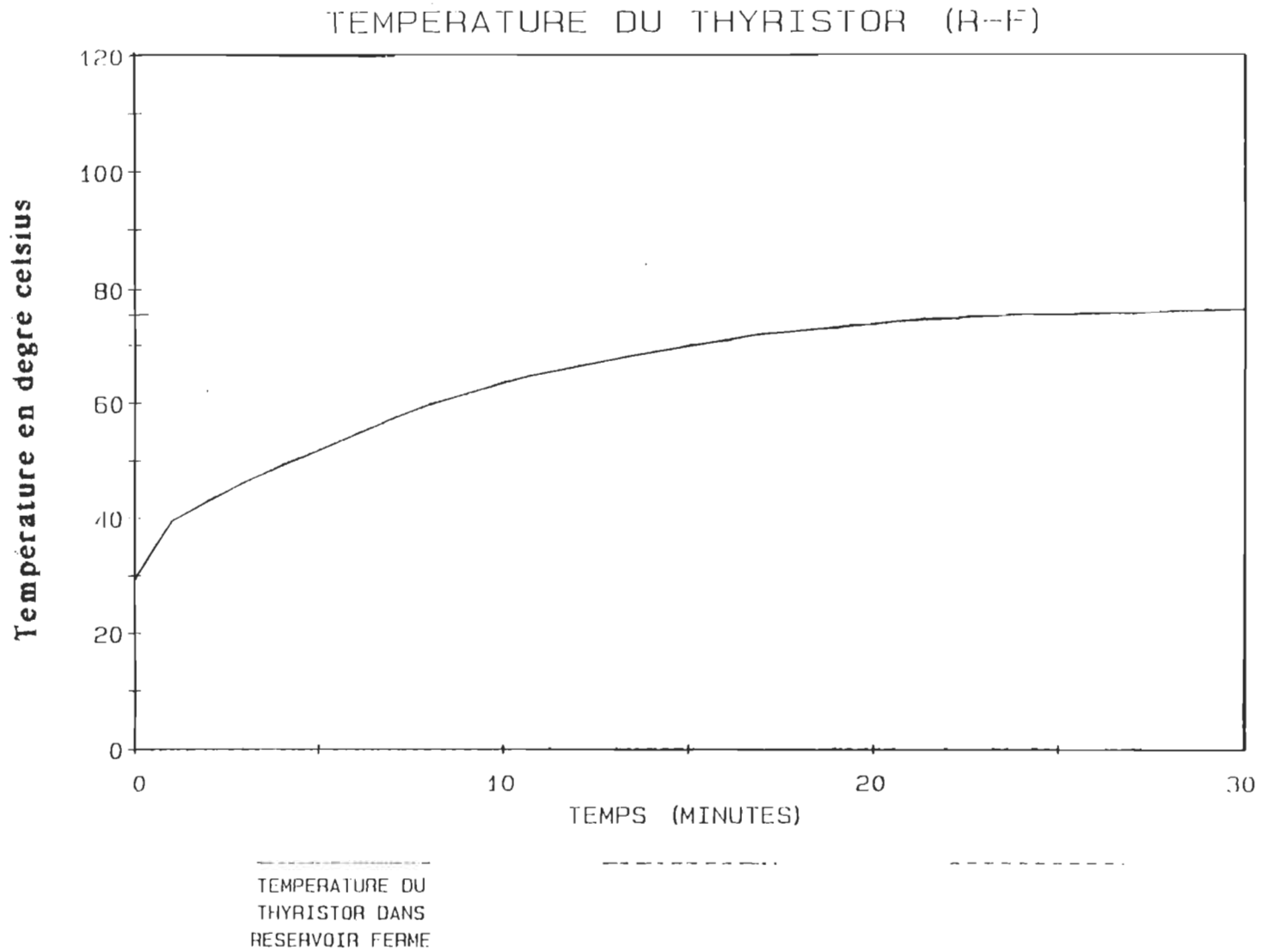


Figure VII .12 : Relevé de la mesure de température du thyristor dans le réservoir fermé .

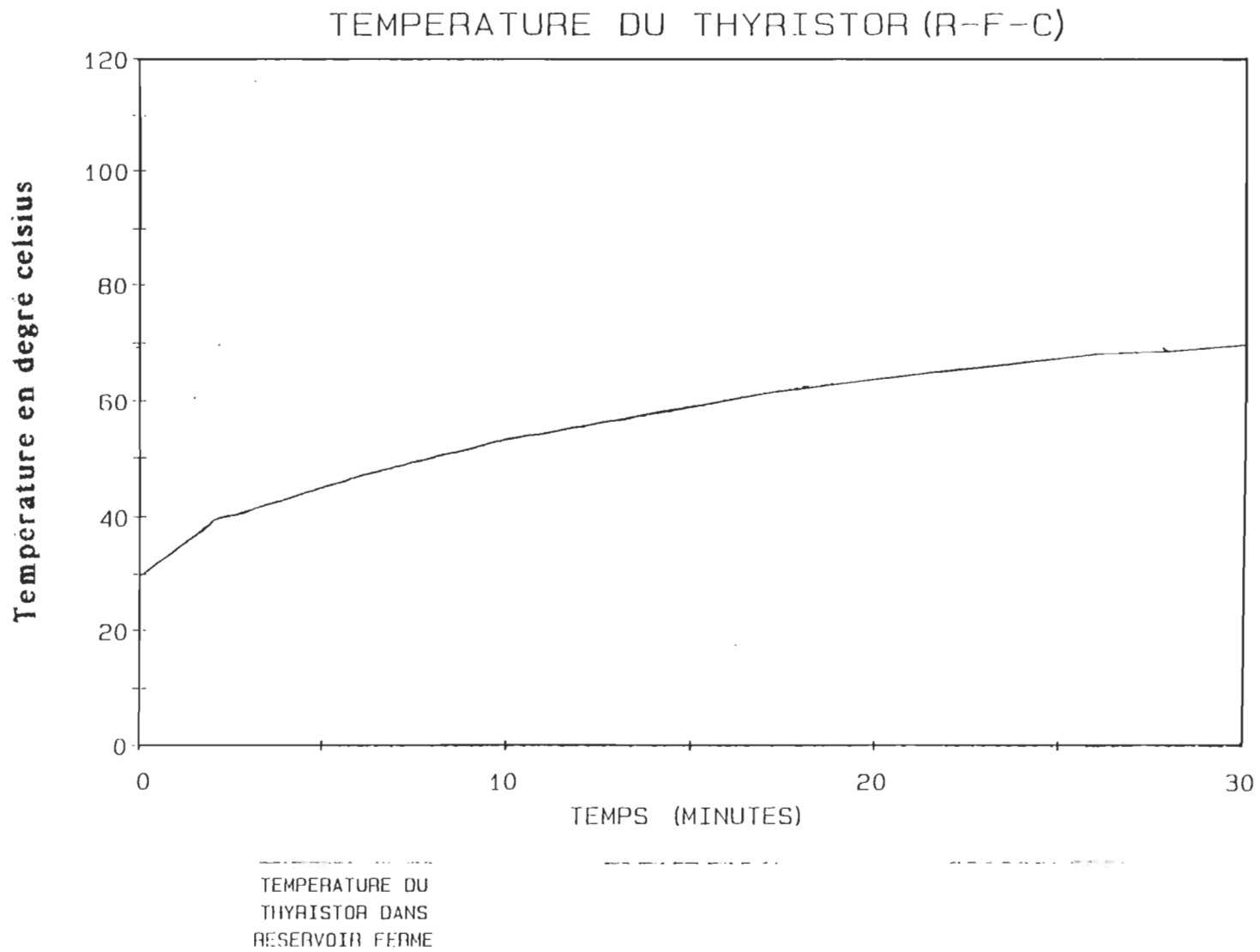


Figure VII .13 : Relevé de la mesure de température du thyristor dans le réservoir fermé et associé au caloduc .

VII.4 Résultats des mesures avec le caloduc et le liquide-fluide

FC-72

Avant de commencer l'expérience avec le système hybride constitué du caloduc et du liquide-fluide FC-72 , nous voulons nous assurer du phénomène d'évaporation du FC-72 qui conduit à sa perte.

Dans ce sens , nous avons versé une petite quantité de ce liquide dans un récipient , exposé à l'air ambiant , afin de surveiller son niveau .

Quatre heures après , nous avons constaté que le niveau du liquide a baissé de quelques millimètres . Le deuxième jour , le liquide a été totalement évaporé .

Le FC-72 ne peut garder son volume constant à l'air ambiant et par conséquent , il faut chercher un moyen pour le protéger .

Ainsi , dans le but de ne pas avoir de pertes considérables nous avons fait appel à la colle silicone pour bien fermer le réservoir.

Après la fermeture complète du réservoir , nous avons par la suite procédé à notre expérience dont nous discuterons les résultats .

Quand nous avons associé le caloduc avec le FC-72 , nous avons obtenu de très bons résultats . Ces derniers se traduisent par une stabilisation de la température à 60 °C même après quelques heures de fonctionnement comme le montrent les figures ci-jointes . Donc , si on compare ces résultats avec les mesures déjà prises avec le réservoir fermé et associé au caloduc et sans liquide fluide , on constate une chute de température importante .

Signalons que le seul élément qui peut atteindre dans l'air ambiant une température égale à 120 °C ou même plus est le circuit d'amortissement

"snubber", mais avec le système hybride il ne peut pas dépasser les 60 °C .

Nous avons aussi procédé à relever les mesures des températures en mettant en arrêt notre convertisseur après quatre heures de fonctionnement pour visualiser dans le temps le refroidissement des composants électroniques de puissance par ce système (voir figure VII.18).

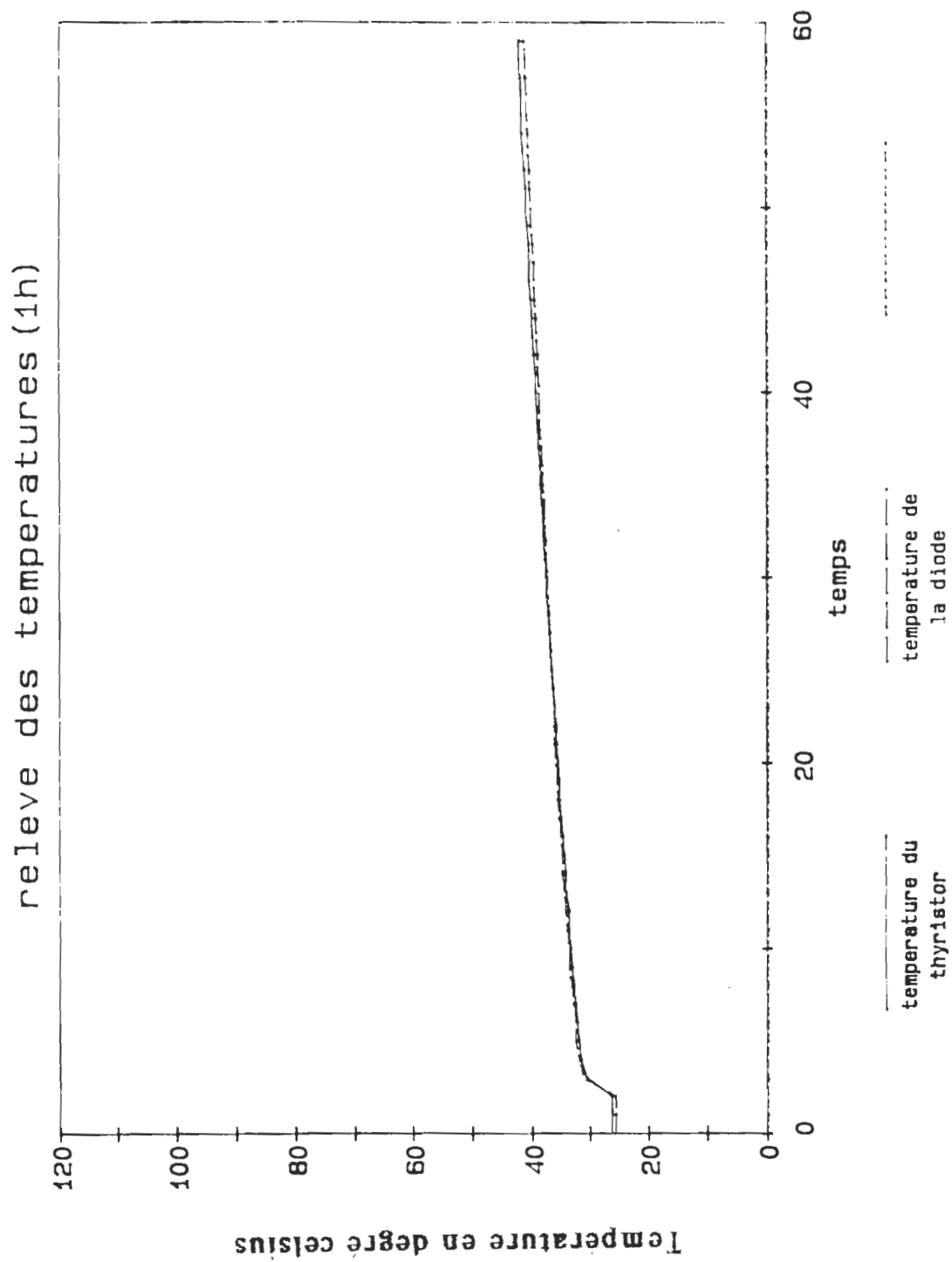


Figure VII.14 : Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor avec le caloduc et le liquide fluide FC-72 pour une durée d'une heure .

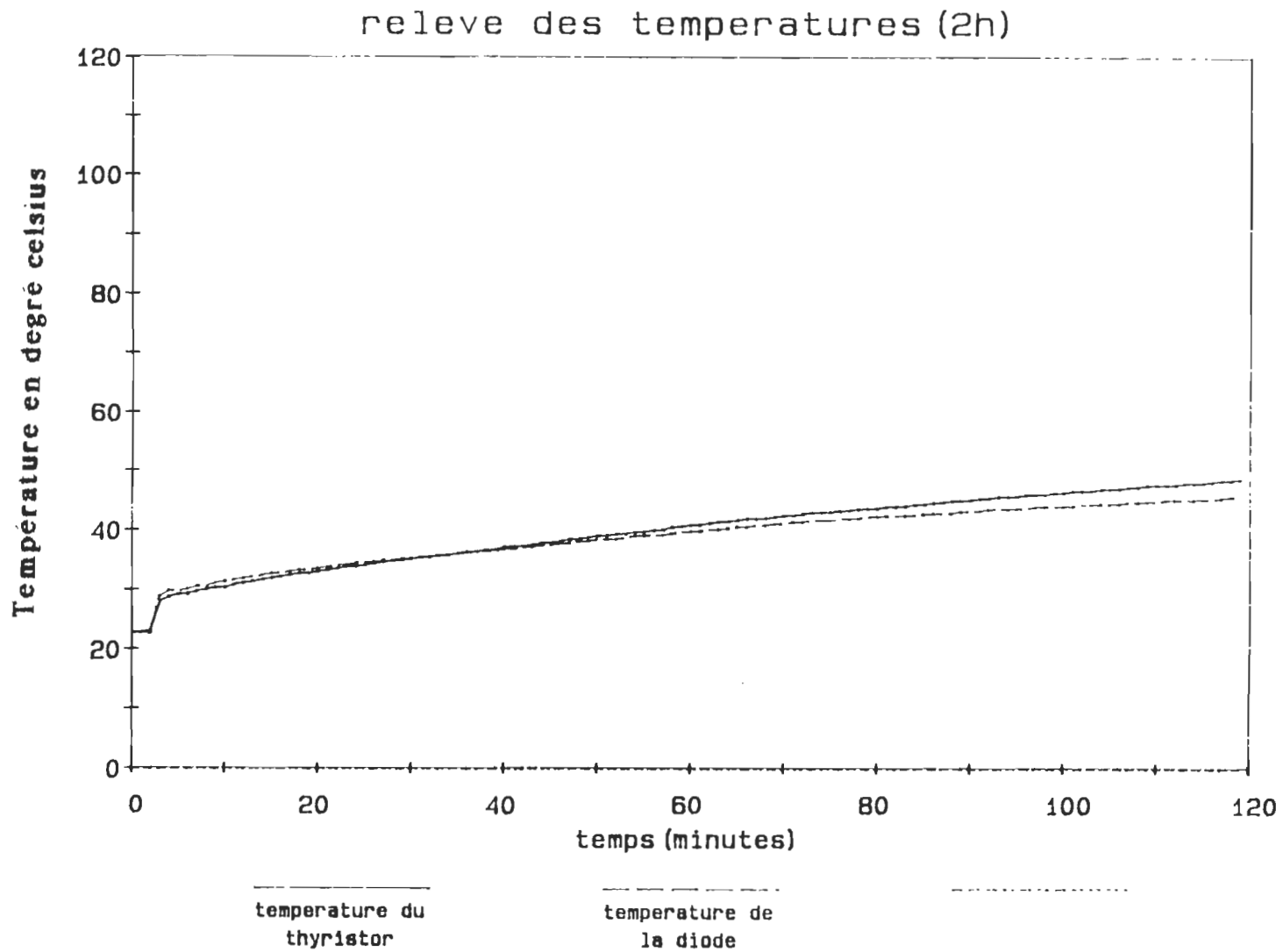


Figure VIII.15 : Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor avec caloduc liquide fluide FC-72 pour une durée de deux heures .

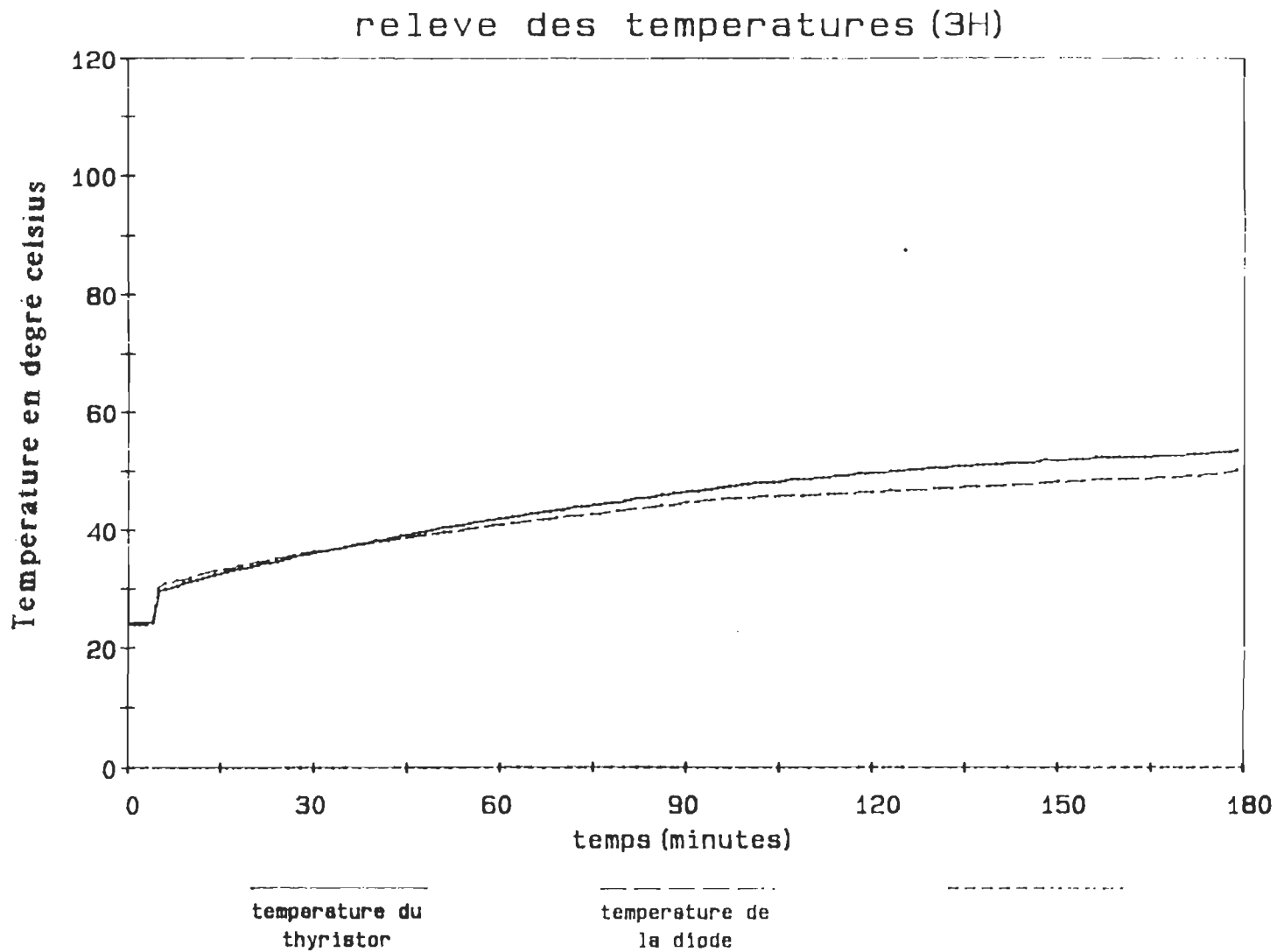


Figure VII.16 : Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor avec le caloduc et le liquide fluide FC-72 pour une durée de trois heures .

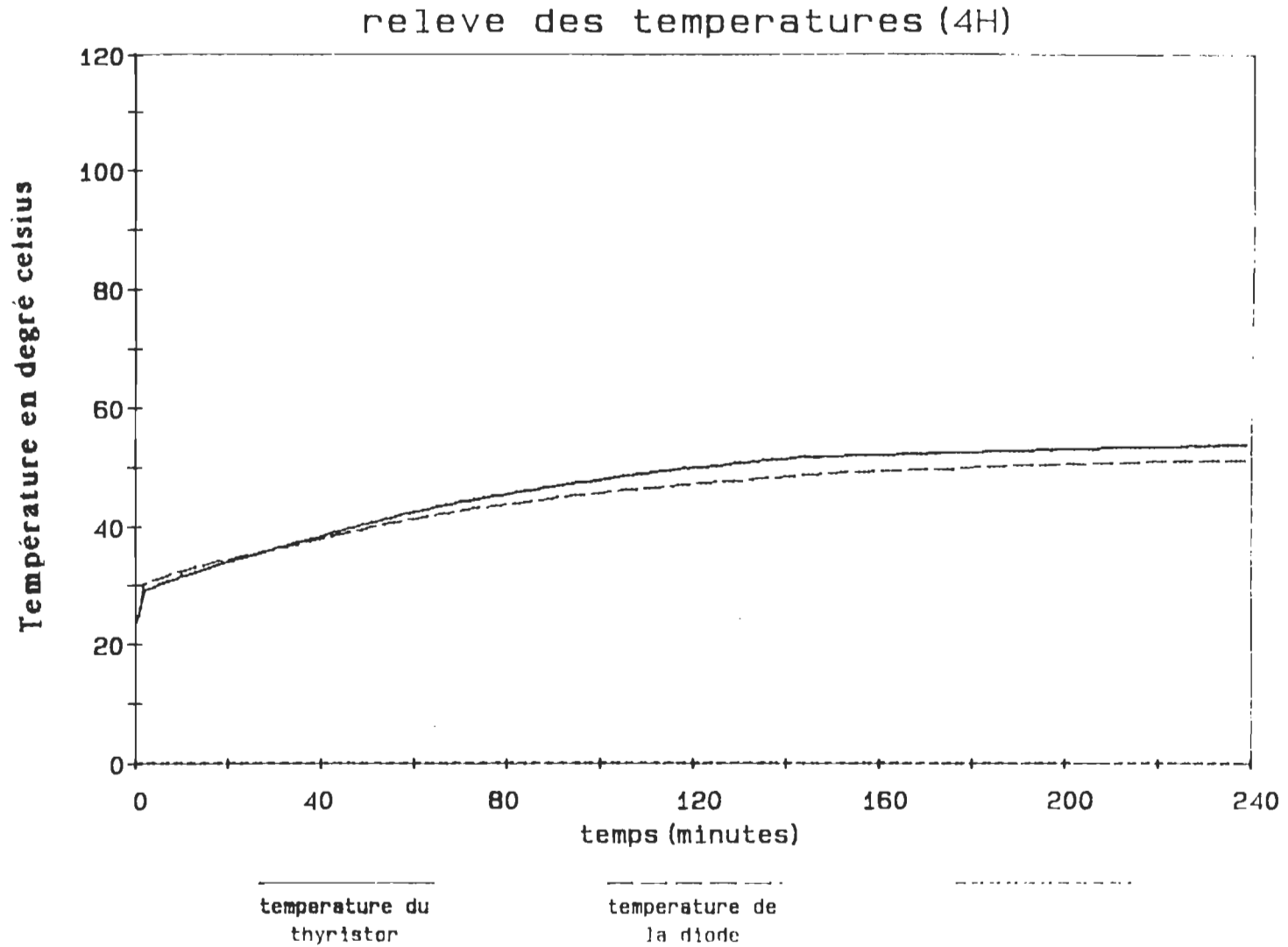


Figure VII.17 : Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor avec le caloduc et le liquide fluide FC-72 pour une durée de quatre heures .

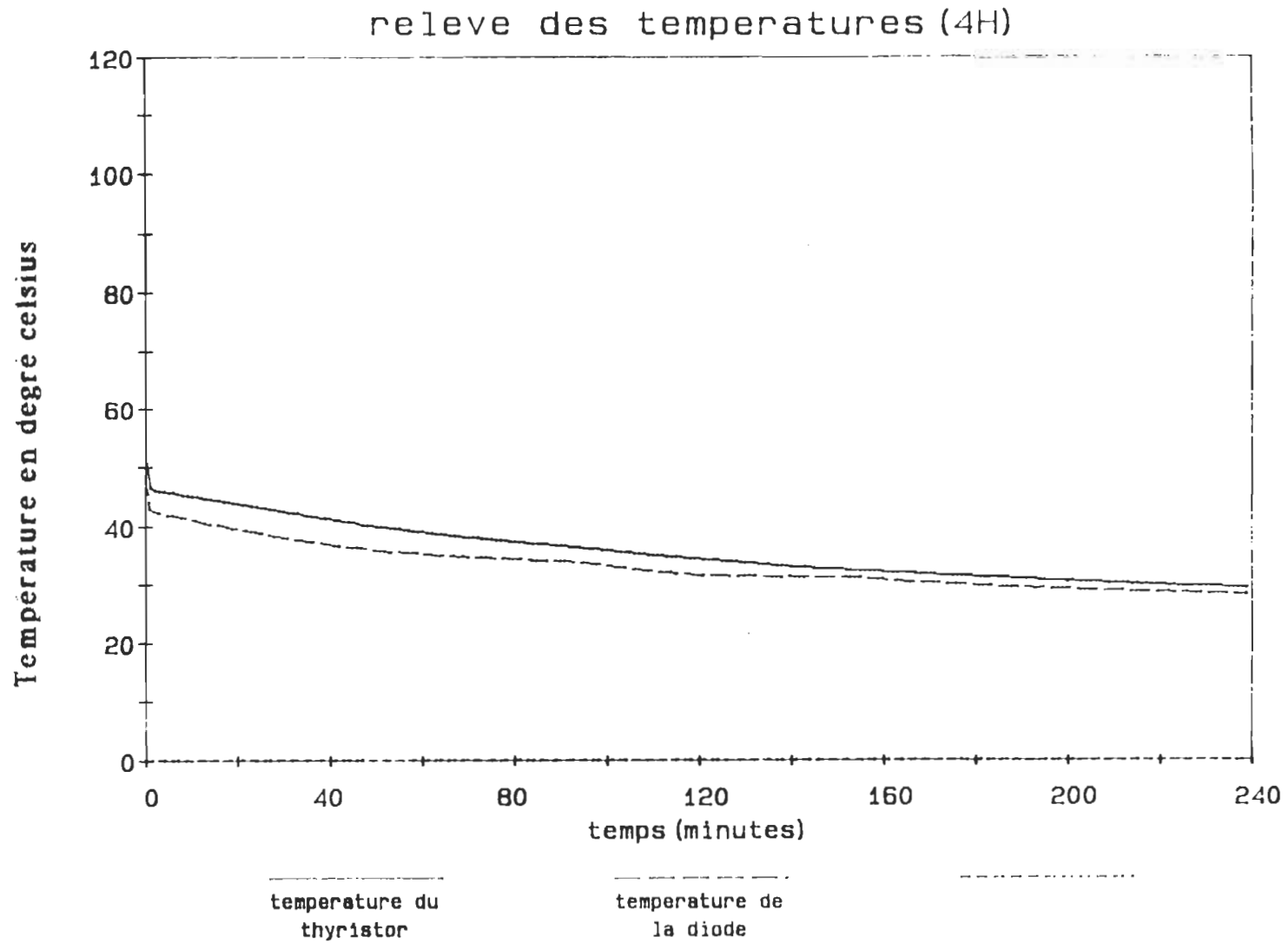


Figure VII 18 : Relevé des mesures de températures de la diode et du thyristor après l'arrêt immédiat du convertisseur et ce pour une durée de quatre heures .

VII.5 Résultats des mesures avec le caloduc et l'huile VOLTESSO 35

Finally, we proceeded to temperature measurements with the caloduc and the oil VOLTESSO 35.

These measurements are performed in the same way as previously. The figures attached show the results of the measurements.

One notices that these results are identical to those performed with the caloduc and the FC-72. From these measurements, one notes that the temperature does not exceed 60 °C and this after several hours of operation. Therefore, this cooling system contributes effectively to the drop and stabilization of temperature. In addition, it is a system that presents an economic advantage, and this is very low cost of the oil compared to the fluid FC-72.

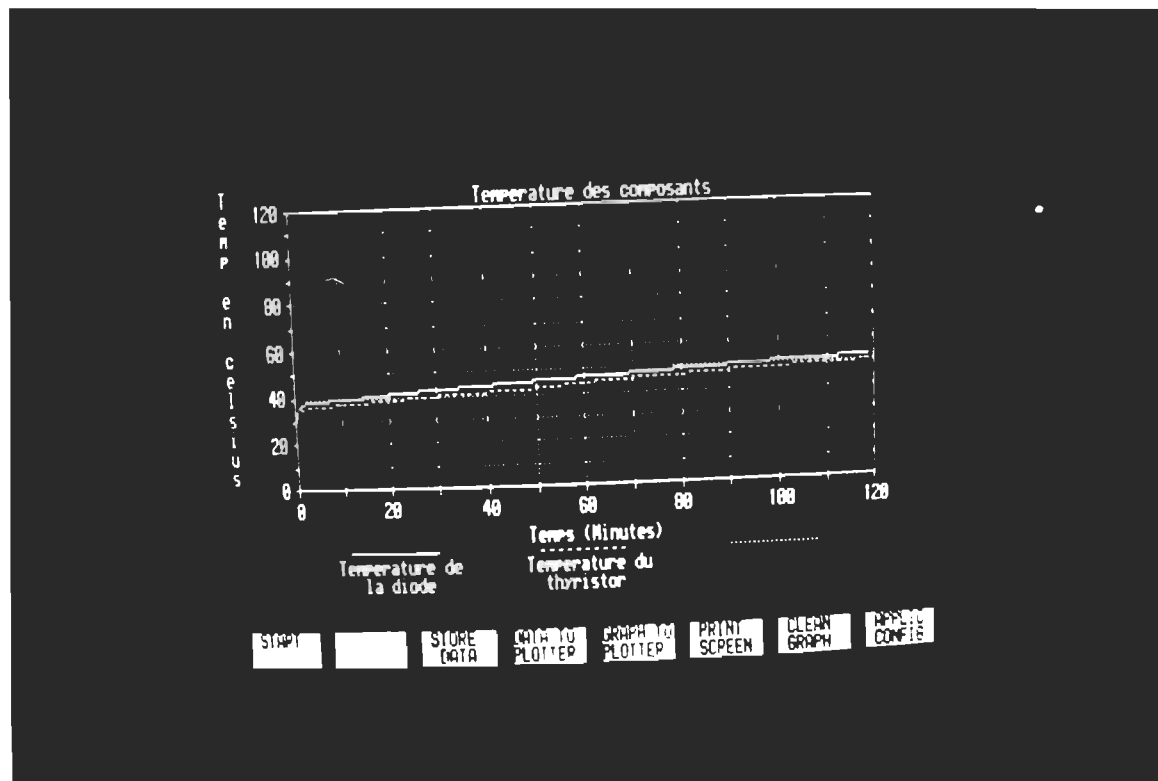
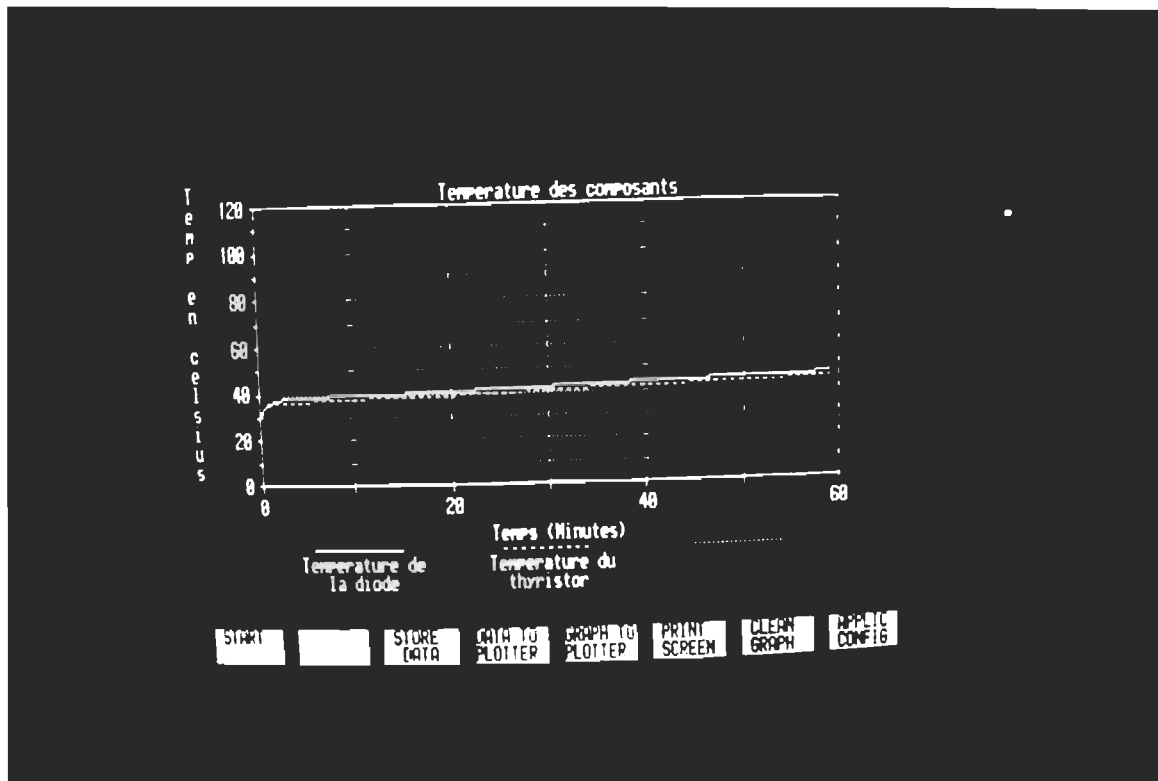


Figure VII.19 : Relevé des mesures de températures avec le caloduc et l'huile VOLTESSO 35 pour une durée d'une heure et de deux heures .

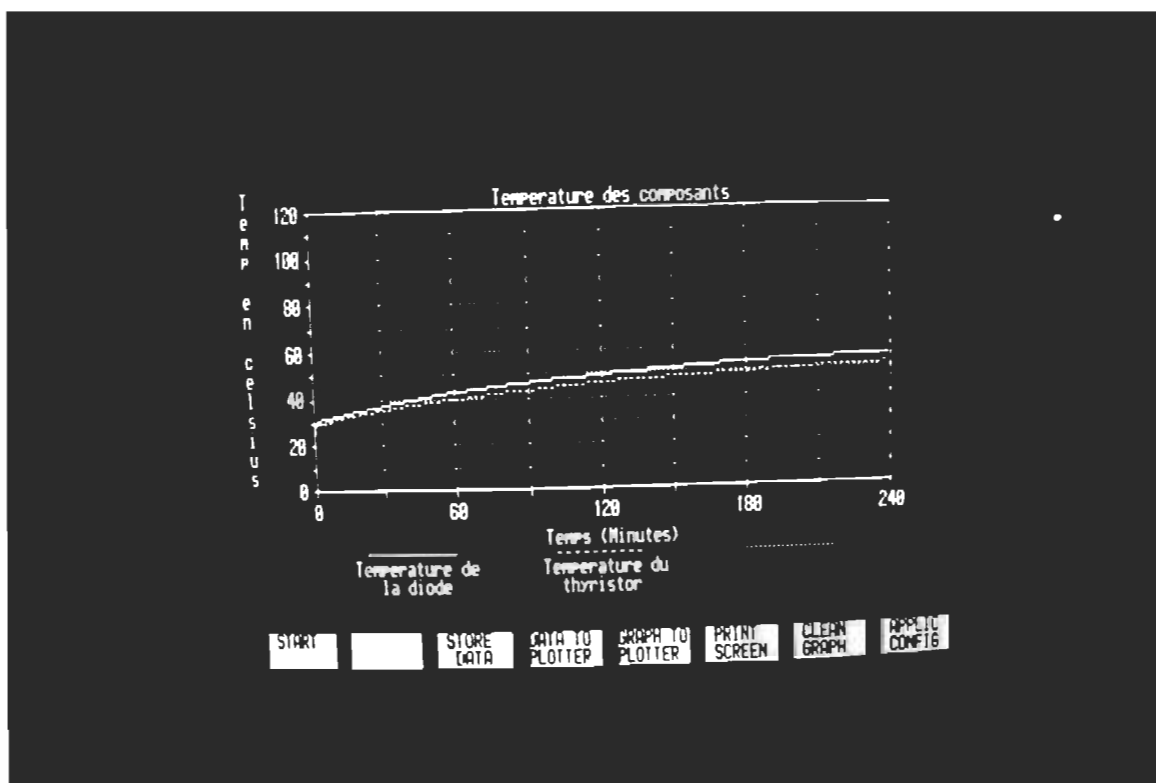
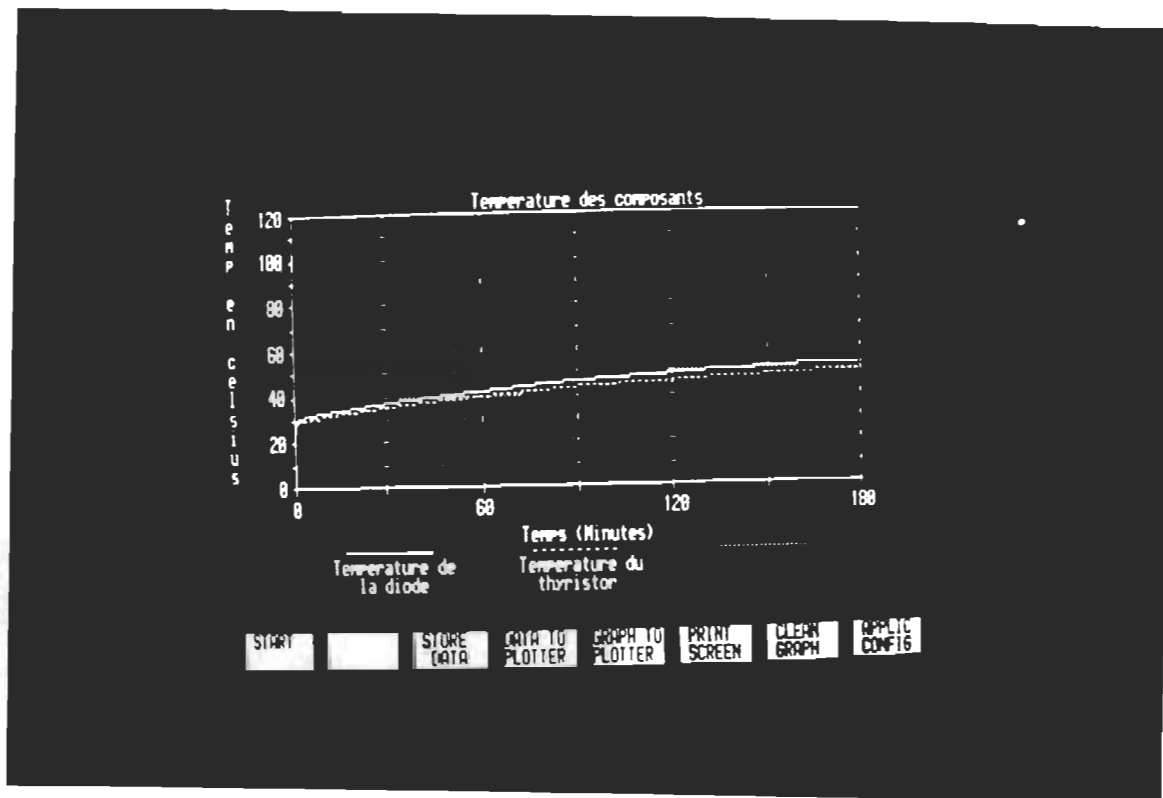


Figure VII.20 : Relevé des mesures de température avec le caloduc et l'huile VOLTESSO 35 pour une durée de trois heures et quatre heures .

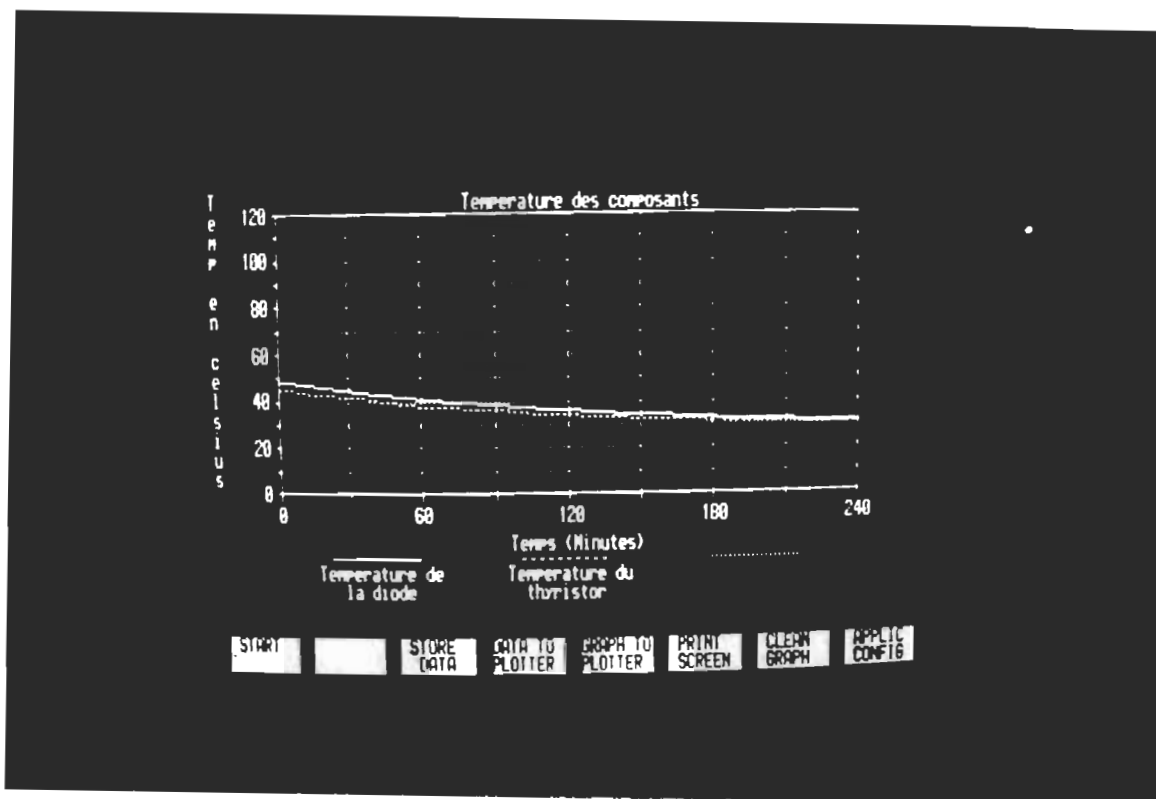


Figure VIII. 21 : Relevé des températures avec caloduc et l'huile VOLTESSO 35 après l'arrêt immédiat du convertisseur et ce pour une durée de quatre heures .

CONCLUSION

Ce travail de recherche a pour objectif de résoudre le problème thermique des composants électroniques de puissance d'un convertisseur ca-ca de 2 kW. Parmi les applications industrielles de ce convertisseur, on le retrouve actuellement dans les usines de pâtes et papiers au Canada. Elles comptent environ six milles convertisseurs. Les refroidissants spécialisés, comme les liquides fluorinert et les caloducs, sont ces dernières années utilisés séparément dans le but d'évacuer la chaleur produite par les composants électroniques. Afin d'aboutir à des résultats plus efficaces, on a proposé un système hybride, constitué du caloduc et le liquide fluide ou l'huile VOLTESSO 35. Les résultats obtenus ont montré une nette amélioration se manifestant par une chute de température.

Signalons que les mesures de températures expérimentales ont été effectuées au moyen de thermocouples et d'un système d'acquisition de données. Avec ce système hybride, on remarque que la température ne dépasse pas 60 °C, tandis que les mesures de températures dans l'air ambiant (c'est à dire sans notre système) montrent que la température atteint 80 °C et plus pour les composants. Elle peut même atteindre 120 °C à 130 °C pour le circuit d'amortissement.

Soulignons que les systèmes de refroidissement avec de l'huile constitue une solution économique optimale du fait de son très bas prix, contrairement au coût très élevé des liquides fluorinerts.

Bibliographie

- [1]. Elberg , S . , et Mathonnet , P . **Evacuation de la chaleur dissipée dans les équipements électroniques** , Eyrolles , Paris , Edition 1978.
- [2]. Belaid, F . " **Étude théorique et expérimentale des phénomènes thermiques dans un convertisseur électronique de puissance** ".Mémoire présenté A l'Université du Québec A Trois-Rivières , comme exigence partielle de la maîtrise en électronique industrielle . Septembre 1990.
- [3]. Avram Bar-Cohen , Allan D . Krauss . **Advances in thermal modeling of Electronic compenents And Systems** . Volume 1 , 1988 .
- [4]. 3M . Fluorinert Electronics liquids . " **Industrial chemical** " products Division / 3M , Catalogue , 1987 product information .
- [5]. André B , De Vriendt . **La transmission de la chaleur** : volume 1 , Tome 1 , Edition 2 , éditeur Gaetan morin , 3^{eme} trimestre 1984 .
- [6]. Lorenzetti , V et Wakefield , G . " **Effective compenent cooling In A Performance- Driven systems** " . Proceedings of the Power Electronics show and conference PP . : 234-42 . 1988 .
- [7]. Andrew D , Althouse . , Carl H , Turnquist . , et Alfred F , Bracciano . " **Modern Refrigeration and Air Contioning** " . The goodheart-Willcox company , Inc . 1988 .
- [8]. Wataru , N . , Sadaynki , O . et Heikichi , K . " **Experiance in cooling**

- power electronic devices by phase-changing refrigerants and prospect of its application to cooling microelectronic devices** . ISHM'87 Proceedings , pp . : 165-74 .
- [9]. Pc Instruments . Owner's Guide . **Data Acquisition Software** . Hewlett Packard . Printed in USA 6/85 .
- [10]. 3M . " Fluorinert Electronic Liquids " , section : **Heat transfert design recommendations** . Product manual .
- [11]. Gentry , F. E . , Gutzwiller , F . W . , Holonyak , Jr . N . , Von Zastrov , E . E. **Semiconductor Controlled Rectifiers : Principles and Applications of p-n-p-n Devices** . Prentice-Hall-Inc . , Englewood Cliffs , N . J . 1964 .
- [12]. Fraser , D. A . **The Physics of Semiconductor Devices** . Oxford University Press , Third edition . 1983 .
- [13]. Esso Petroleum Canada . L'huile **VOLTESSO 35** . Product Data . Fiche technique , Avril 1983 .
- [14]. Anderson , TM . , et Mudawar , I . " **Microelectronic cooling by enhanced pool Boiling of a dielectric fluorocarbon liquid** " . Transactions of the ASME . 752 / vol . 111 , August 1989 .
- [15]. IRET , La londe les maures . " **La climatisation** " Maintenance - 1^{er} niveau . Direction de la formation professionnelle des télécommunications . Montpellier , France , 1985 .