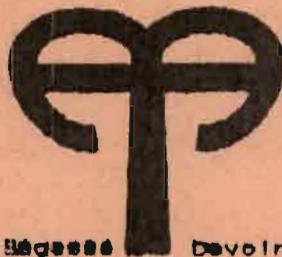


REPUBLIQUE DU SENEGAL

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP

ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTROMECANIQUE



Gm. 0152

PROJET DE FIN D'ETUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR DE CONCEPTION**

**DETERMINATION DES CAUSES D'ELEVATION DE TEMPERATURE
DANS LE CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT DES
LOCOMOTIVES DIESEL - ELECTRIQUES
BB 1600 AU NIVEAU DE LA S.N.C.S**

AUTEUR :	HOUBNAGNON Atégbo Michel
DIRECTEUR INTERNE :	Paul DEMBA
DIRECTEUR EXTERNE :	Birahim FALL
CO - DIRECTEUR :	Souleymane NDIONGUE

DATE : JUIN 1995

REPUBLIQUE DU SENEGAL

UNIVERSITE CHEIKH ANTA DIOP

ECOLE POLYTECHNIQUE DE THIES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTROMECANIQUE



PROJET DE FIN D'ETUDES

**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME
D'INGENIEUR DE CONCEPTION**

**DETERMINATION DES CAUSES D'ELEVATION DE TEMPERATURE
DANS LE CIRCUIT DE REFROIDISSEMENT DES
LOCOMOTIVES DIESEL - ELECTRIQUES
BB 1600 AU NIVEAU DE LA S.N.C.S**

AUTEUR :

DIRECTEUR INTERNE :

DIRECTEUR EXTERNE :

CO - DIRECTEUR :

HOUBNAGNON Atègbo Michel

Paul DBMBA

Birakim FALL

Souleymane NDIONGUE

DATE : JUIN 1993

• La meilleure procédure, la plus rationnelle et la plus économique, de guérir un mal, d'arrêter une épidémie, ..., d'atténuer ou d'annuler un effet, c'est de commencer à identifier ses causes, les vraies ."

Être Ingénieurs :

• C' est être capable de rassembler et de mettre en oeuvre des idées, des moyens matériels et des hommes pour réaliser, dans un contexte de sanctions économiques, des objets, des produits ou projets."

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui, de près ou de loin, par leur soutien moral ou matériel, ont contribué à la réalisation de cette oeuvre.

Je voudrais citer plus particulièrement :

- MM. Paul DEMBA, MM. Souleymane NDIONGUE, MM. Ndiaye Diouf NDIAYE et MM. Ngor SARR, Professeurs à l'E.P.T ;
- MM. Alioune LY et M^{me} Adou CUEYE, Techniciens à l'E.P.T,
- MM. El Hadj Ousmane NDAO, MM. Birahim FALL et MM. Cheikh H. Tidiane CUEYE de la S.N.C.S ;

pour toutes les informations utiles qu'ils n'ont ménagé aucun effort à me fournir jusqu'à la fin de ce travail.

Mes remerciements vont également à l'endroit de MM. Adama DIARRA de l'E.P.T par le biais de qui ce projet nous a été confié.

Toute ma gratitude est exprimée à MM. Sény TAMBA et M^{me} Fatou TAMBA, MM. Christian ADECOU et M^{me} Jeanne ADECOU, et toute la famille AKONDE pour les soutiens qu'ils m'ont apportés durant mes cinq années de formation à l'E.P.T .

Je ne saurai oublier l'Etat Béninois, l'Etat Sénégalais et l'A.C.D.I à qui je dois tous les supports financiers de mon titre d'ingénieur.

Enfin, honneur à tous ces enseignants, tant d'études primaires et secondaires que d'études supérieures qui ont su faire de ma vie celle d'un cadre.

DEDICACE

A L'ETERNEL

Tu es mon berger, je crois en toi.

A MON AMI AKINDES IFEBI PICO

Je me souviens encore des deux années que nous avons passées ensemble à rêver d'inscrire un jour ou l'autre nos noms parmi les grandes figures scientifiques et technologiques.

Et je me rends compte aujourd'hui de la portée des difficultés que présente cette ambition, cet amour, cette passion de vouloir ajouter une valeur scientifique au monde.

Néanmoins, je réagirai toujours avec cette volonté prospective aussi longtemps que je vivrai.

A NOS PARENTS

Mon DIEU, montre nous ce que nous devons faire pour qu'ils retrouvent en nous cette fierté qu'ils recherchent et pour laquelle ils n'ont jamais cessé de nous aimer, nourrir, vêtir, éduquer et assister.

A NOS FRERES ET SOEURS

Je vous présente ici le fruit de cinq années de séparations.

A NOS AMIS

Il n'existe pas de petite amitié.

SOMMAIRE

Le but de ce travail est d'identifier les causes de l'élévation excessive de la température de l'eau du circuit de refroidissement des locomotives Diesel-électrique de type BB 1600 à la S.N.C.S .

Nous avons, à cet effet, soumis des échantillons d'eau provenant de chacune des cinq régions de l'eau d'appoint - Dakar, Guinguinéo, Kidira, Tamba Counda, Thiès - à des tests pour déterminer le pH, la concentration en NaCl, la dureté totale et la concentration en CaSO_4 . Ceci a permis d'établir que les causes sont en partie imputables à l'eau utilisée.

Par ailleurs les éléments tels que :

- la considération, l'analyse et l'interprétation de certains faits observés par les conducteurs et le service d'entretien des BB 1600,
 - l'observation de l'évolution de la température de l'eau en fonction de la température atmosphérique lors des essais,
 - la comparaison des températures atmosphériques mesurées au banc d'essais à la S.N.C.S avant la mise en ligne des BB 1600 et des températures atmosphériques maximales relevées par la METEO pour les régions ferroviaires,
- ont montré que l'inadaptation des conditions atmosphériques complète les causes de l'anomalie observée.

Enfin nous avons procédé à l'évaluation sommaire des pertes financières occasionnées par l'élévation excessive de la température de l'eau avant de faire des suggestions remèdes .

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	III
DEDICACE	IV
SOMMAIRE	V
LISTE DES TABLEAUX	XI
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES ANNEXES	XIV
INTRODUCTION	1

lère PARTIE GENERALITES

CHAPITRE 1 PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	5
1.1 Vue panoramique de l'entreprise	5
1.2 Rôle du Moteur Diesel dans le fonctionnement d'une locomotive Diesel- électrique	7
1.3 Définition des types de locomotives Diesel- électrique : origine de la dénomination BB 1600	9

CHAPITRE 2 REFROIDISSEMENT DES MOTEURS DIESEL -	
LIMITATION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU :	
NECESSITE	11
2.1 Pourquoi faut-il refroidir les moteurs	
Diesel ?	11
2.2 Pourquoi la température de l'eau de	
refroidissement devrait-elle rester	
en dessous d'une certaine limite ?	13
2.3 Influences du fonctionnement au ralenti	
d'un moteur diesel suralimenté	15
2.4 Description des circuits de refroidissement	
des BB 1600	16
2.4.1 Circuit BT	16
2.4.2 Circuit HT	17

2ème PARTIE RECHERCHE METHODIQUE DES CAUSES

CHAPITRE 1 LE DIAGRAMME CAUSES-EFFET D'ARÊTE DE	
POISSON D 'HISHIKAWA ET HYPOTHESES DE	
TRAVAIL	19
1.1 Définition du diagramme	19
1.2 Elaboration du diagramme	19
1.3 Causes et conséquences des problèmes	
inhérents à la qualité de l'eau de	
refroidissement d'un circuit fermé	20
1.3.1 Les salissures	20
1.3.2 Les tartres	22
1.3.3 La corrosion	24

1.4	Prescriptions du constructeur des BB 1600 sur la qualité de l'eau à utiliser pour le refroidissement	24
1.5	Les conditions actuelles de l'eau utilisée par la S.N.C.S	26
1.6	Influence de la température atmosphérique sur le cycle de fonctionnement des moteurs Diesel	26
1.7	Les informations pertinentes recueillies à la S.N.C.S	28
1.8	Hypothèses de travail	30

CHAPITRE 2 ANALYSE DE L'EAU UTILISEE PAR

	LA S.C.N.S	32
2.1	Travail effectué	32
2.2	Potentiel d'hydrogène (ph)	32
2.3	Dureté Totale	33
2.5	Teneur en Chlorure de Sodium (NaCl)	33
2.5	Teneur en Sulfate de Calcium (CaSO ₄)	34
2.5.1	Teneur en Ca ²⁺	34
2.5.2	Teneur en SO ₄ ²⁻	35
2.5.3	Teneur en NO ₃ ⁻	35
2.5.4	Teneur en CaSO ₄	38
2.6	Conclusion sur l'analyse de l'eau	39

CHAPITRE 3 ETUDE DES CONDITIONS ATMOSPHERIQUES

	40
3.1	Hypothèses	40

3.2	Jours et lieux de détresses, en ligne, des BB 1600 due à la forte température	41
3.3	Les températures atmosphériques maximales et minimales mensuelles mesurées par la METEO dans les régions ferroviaires	44
3.4	Températures atmosphériques et températures eau mesurées à la S.N.C.S pendant certains essais sur les BB 1600	48
3.5	Analyse des informations recueillies	50
3.6	Conclusion sur les conditions atmosphériques	51

**3 ème PARTIE EBAUCHE DES PERTES FINANCIERES ENGENDREES PAR
L'EXCES DE TEMPERATURE**

CHAPITRE 1	HYPOTHESES	54
1.1	Introduction	54
1.2	Hypothèses	54
CHAPITRE 2	TABLEAUX DES INVESTISSEMENTS POUR LES REVISIONS GENERALES DES MOTEURS DIESELS DES BB 1600	58
2.1	Travail effectué	58
2.2	Sans problème de forte température eau : investissements	62

2.3	Avec problème d'élévation de température - durée de vie réelle égale 8 ans :	
	investissements	62
2.4	Avec problème d'élévation de température - durée de vie réelle égale 7 ans :	
	investissements	63
2.5	Avec problème d'élévation de température - durée de vie réelle égale 6 ans :	
	investissements	64
2.6	Avec problème d'élévation de température - durée de vie réelle égale 5 ans :	
	investissements	64
2.7	Coût au delà duquel la S.N.C.S renoncera à la résolution du problème de forte température de l'eau	66
2.8	Conclusion sur l'étude financière	66
SUGGESTIONS		67
CONCLUSION		70
BIBLIOGRAPHIE		71
ANNEXES		73

LISTE DES TABLEAUX

<u>TABLEAU</u>	<u>PAGE</u>
2.1.1 : Etude comparative entre conductivité thermique des tartres et conductivités thermiques matériaux	23
2.3.1 : Dates et lieux de détresses dues à forte température	42
2.3.2 : Températures atmosphériques et température eau mesurées pendant certains essais	49
3.2.1 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel - cas d'une durée normale de 9 ans	59
3.2.2 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel - cas d'une durée réelle de 8 ans	59
3.2.3 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel - cas d'une durée normale de 7 ans	60

- 3.2.4 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel - cas d'une durée normale de 6 ans 60
- 3.2.5 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel - cas d'une durée normale de 5 ans 61

LISTE DES FIGURES

<u>FIGURE</u>	<u>PAGE</u>
1.1.1 : Principe de fonctionnement d'une locomotive Diesel électrique	8
1.2.1 : Répartition de l'énergie libérée par la combustion dans un moteur Diesel	12
1.2.2 : Coefficient de chaleur Parois-fluide versus température parois	14
1.2.3 : Conductivité thermique de l'eau versus température eau à 1 bar	14
1.2.4 : Circuits de refroidissement HT et BT du moteur Diesel des locomotives BB 1600 de la S.N.C.S	93
2.1.1 : Diagramme Causes-effet d'HISHIKAWA	21
2.1.2 : Cycle thermodynamique équivalent des moteurs Diesel : cycle de SABATHE	27
2.1.3 : Variations des températures maximales du cycle de SABATHE versus variations de la température atmosphérique	29
2.3.1 : Températures atmosphériques Min. et Max. des régions ferroviaires	45

LISTE DES ANNEXES

<u>ANNEXE</u>	<u>PAGE</u>
A 1 : Liste des classes de matériaux constituant les circuit de refroidissement des BB 1600 et leurs conductivités thermiques	74
A 2 : Produits de traitement de l'eau homologués par le constructeur et adresses des fournisseurs . . .	79
A 3 : Carte ferroviaire du Sénégal	84
A 4 : Calculs thermiques détaillés	85
A 5 : Analyse de l'eau : références des méthodes et précautions - précautions sur les échantillons - formules de calculs	89
A 6 : Circuit de refroidissement des moteurs Diesel des locomotives BB 1600 de la S.N.C.S	93

INTRODUCTION

Les moteurs Diesel, suralimentés à 16 cylindres en V, des locomotives BB 1600 utilisées par la S.N.C.S sont refroidis à eau à travers deux circuits indépendants : un circuit Basse Température (BT) servant à refroidir l'huile de graissage du moteur et l'air de suralimentation, et un circuit Haute Température (HT) pour le refroidissement des chemises des cylindres, des culasses et du corps des turbosoufflantes; le refroidissement du corps des turbosoufflantes est assuré pour certains de ces moteurs par l'huile de graissage.

D'après les spécifications du constructeur, les moteurs Diesel des locomotives BB 1600 sont conçus pour que la température de l'eau HT soit toujours comprise entre 75°C et 92°C.

Mais déjà dès l'arrivée d'une BB 1600 à la S.N.C.S, on observe, en ligne, une élévation de la température de l'eau du circuit HT au delà de la limite maximale (92°C) lorsque la vitesse du moteur atteint 1500 tr/min. Alors un thermostat incorporé à ce circuit coupe la traction de la locomotive et provoque ainsi la mise au ralenti du moteur Diesel, sa vitesse passant de 1500 tr/min à 700 tr/min en vue de ramener la température de l'eau en dessous de 92°C.

La S.N.C.S, consciente de l'ampleur, de la dimension des influences néfastes d'un tel phénomène, nous a confié l'identification de ses causes.

La pertinence et l'importance de ce projet résident :

- sur le plan technique, dans les dommages mécaniques des structures du moteur que peuvent causer le passage brusque au ralenti et le fonctionnement au ralenti d'un moteur Diesel;
- sur le plan financier, dans les pertes financières énormes, conséquences directes de la réduction de la durée de vie de ces moteurs Diesel qui peut découler d'un dépassement fréquent de la température maximale;
- sur le plan socio-commercial, dans les préjudices portés aux clients, à cause des retards qu'accusent les trains utilisant ces moteurs Diesel et qui sont dus à ces mises au ralenti anormales, difficiles à prévoir dans la programmation des horaires des trains;
- enfin, dans la perte de vies humaines qui pourrait, éventuellement, se produire si jamais le thermostat s'avérait défectueux. En effet, si la température excède la limite permise alors que le thermostat est défaillant, les températures des structures vont s'accroître jusqu'au coincement ou à l'explosion subite du moteur; à moins que d'autres protections, prévues à cet effet, interviennent.

Une méthode préconisée pour l'identification des causes d'un effet, et que nous allons utiliser dans notre contexte, consiste à:

- énumérer, dans un premier temps toutes les causes possibles de l'effet,
- ensuite, utiliser les informations pertinentes recueillies et des hypothèses justifiables pour déduire les causes réelles.

Cette méthode est facilitée par l'utilisation d'un diagramme très bien connu en analyse de système d'information sous le nom de diagramme causes-effet d'arête de poisson d'Hishikawa¹ .

Le rapport est globalement divisé en trois parties :

- la première, traitant des généralités, présente l'entreprise et montre l'importance technique du sujet;
- la deuxième partie expose les démarches ayant conduit aux causes retenues pour le problème posé;
- enfin la troisième partie est consacrée à l'estimation sommaire des pertes financières liées à l'élévation de température .

¹

Le diagramme d'Hishikawa est défini et élaboré dans le chapitre 1 de la 2ème partie.

1ère PARTIE

GENERALITES

CHAPITRE 1

PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

1.1 Vue panoramique

La Régie des Chemins de Fer du Sénégal, R.C.F.S a vu le jour le 27 Août 1960, 5 mois environ après l'indépendance du Sénégal sous l'identité d'un établissement public à caractère industriel et commercial, ceci après tout une série de mutations dont les plus marquantes sont :

- la construction du réseau Dakar-St Louis du 22 Juin 1882 au 6 Juillet 1885; l'exploitation de cette voie sera concédée à la Compagnie des Batignoles de la France en 1932,
- la fusion des réseaux Thiès-Kayes et Kayes-Niger en 1924 pour former le Thiès-Niger;
- la création de la Régie des Chemins de Fer de l'AOF¹, en 1947, regroupant le Dakar-Niger, l'Abidjan-Niger, le Conakry-Niger et le Benin-Niger,
- enfin en 1960, le Dakar-Niger fut cindé en deux réseaux : la R.C.F.M² et la R.C.F.S.

Depuis lors, la R.C.F.S joue un rôle actif dans l'économie sénégalaise aussi bien sur le plan national que sur le plan international grâce :

¹ Afrique Occidentale Française. ² Régie du Chemin de Fer du Mali.

- à l'évacuation des minerais de phosphates pour le compte de la C.S.P.T¹ et de la S.S.P.T²; ce trafic est évalué en 1985, en moyenne, respectivement à 120 000 tonnes et 20 000 tonnes par mois
- aux transports des produits des Industries Chimiques du Sénégal
- aux transports de produits agricoles, arachides et coton notamment,
- aux transports de marchandises à destination ou en provenance de la République du Mali; de 34 000 tonnes par mois en moyenne jusqu'en 1984, ce transport a atteint en Mars 1985 un record historique de 43 000 tonnes ;
- aux transports national et international de masse,
- à sa participation au maintien et à la création d'emplois; le nombre d'employés était chiffré, en 1985, à 2 000 permanents et 1 000 temporaires,
- etc... .

C'est récemment, le 1er Novembre 1989, que la R.C.F.S va prendre la dénomination S.N.C.S, Société Nationale des Chemins de Fer du Sénégal dans le but : d'accroître son autonomie et la responsabilisation de ses cadres et dirigeants, de lui permettre un mode de gestion plus souple et proche de celui d'une entreprise privée, enfin de la doter d'un statut unique du personnel qui relève du Code du Travail.

La S.N.C.S enregistre, actuellement, des résultats très

¹ Compagnie Sénégalaise des Phosphates de Taïba. ² Société Sénégalaise des phosphates de Thiès.

satisfaisant pour ces transports avec un chiffre d'affaires égal à 9 500 000 000 de francs CFA environ.

Les transports sont assurés par des locomotives dont les locomotives Diesel-électriques de type BB 1600 construites par les entreprises françaises SACM et ALSTHOM¹.

1.2 Rôle du Moteur Diesel dans le fonctionnement d'une locomotive Diesel-électrique

On appelle boggie un chariot à 2 ou plusieurs essieux² (4 ou plusieurs roues) sur lequel est articulé par pivot le châssis d'un wagon pour lui permettre d'emprunter des voies courbées.

Il est placé sur chaque essieu un moteur³ de traction communiquant son mouvement de rotation aux roues. Le courant de fonctionnement des moteurs de traction est fourni par une Génératrice Principale (GP) à courant continu et à excitation séparée dont le courant d'excitation est généré par une petite génératrice dite auxiliaire (GA) ou Statodyne.

Le rôle principal du moteur Diesel est d'entraîner la GP et la GA en rotation.

Ce rôle est mis en évidence sur la figure 1.1.1 de la page suivante qui présente le principe de fonctionnement d'une locomotive Diesel-électrique.

¹ SACM construit le moteur et ALSTHOM, la caisse. ² chaque essieu relie 2 roues. ³ un essieu portant un moteur de traction est appelé essieu-moteur

Remarquons sur cette figure que la CA sert aussi à charger une batterie d'accumulateurs et à fournir le courant nécessaire aux auxiliaires tels que : compresseurs, ventilateurs des moteurs de traction, pompe à eau, etc....

1.3 Définition des types de locomotives Diesel-électrique : origine de la dénomination BB 1600

Le type ou la dénomination d'une locomotives Diesel-électrique est lié au nombre de boggies nécessaire à la traction de la locomotive et au nombre d'essieux-moteur par boggie.

Ainsi lorsque pour la traction, il est utilisé :

- 2 boggies et 2 essieux-moteur par boggie, l'appellation est 2B ou BB,
- 2 boggies et 3 essieux-moteur par boggie, l'appellation est 2C ou CC,
- 3 boggies et 2 essieux-moteur par boggie, il s'agit d'une 3B ou BBB,
- 3 boggies et 3 essieux-moteur par boggie, il s'agit d'une 3C ou CCC,
- 4 boggies et 2 essieux-moteur par boggie, nous avons une 4B ou BBBB,
- 4 boggies et 3 essieux-moteur par boggie, le type est 4B ou CCCC,
- etc... .

A la S.N.C.S, les appellations sont complétées par la

puissance nominale de la locomotive en chevaux-vapeur (cv). Une BB 1600 fait alors allusion à une BB de puissance nominale 1600 cv .

CHAPITRE 2

REFROIDISSEMENT DES MOTEURS DIESEL - LIMITATION DE LA TEMPERATURE DE L'EAU : NECESSITE

2.1 Pourquoi faut-il refroidir les moteurs Diesel ?

Le rendement des moteurs Diesel suralimentés est estimé à environ 40 %. En d'autres termes, le travail mécanique utile fourni à l'arbre n'avoisine que 40 % de l'énergie libérée par la combustion. Ainsi 60 % de l'énergie fournie par la combustion est dissipée sous forme de chaleur. Environ 30 à 40 % dans l'énergie perdue est emportée par les gaz d'échappement; alors les parois de la chambre de combustion devront évacuer les 20 à 30 % restant par convection et par radiation. L'énergie perdue par radiation est infime et évaluée approximativement à 7 % dans les 20 à 30 % restant. Il va falloir qu'environ 18 % de l'énergie libérée par la combustion soit évacuée par convection. L'huile de graissage se charge d'emportée au plus 4 % et vu les petites surfaces offertes par les chambres de combustion vis à vis des 14 % complémentaire à évacuer, on recourt en général à la circulation forcée de l'eau à travers les différentes structures concernées du moteur.

Le refroidissement opéré par l'eau circulant évite ainsi l'accumulation de l'énergie dans la chambre de combustion, cette accumulation qui aurait inévitablement conduit à une destruction du moteur.

La répartition décrite ci-dessus est illustrée par la figure 1.2.1 .

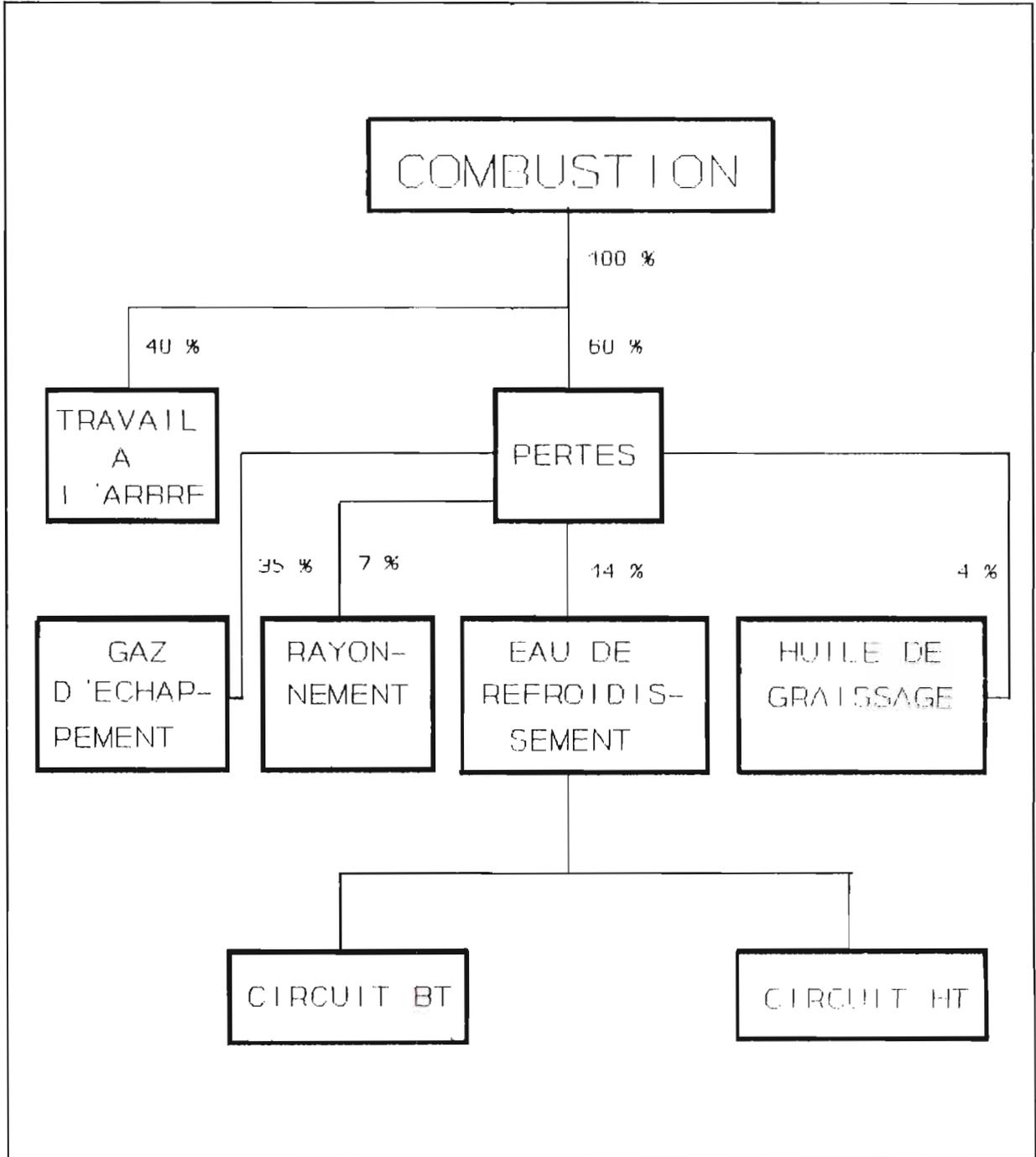


Figure 1.2.1 : Répartition de l'énergie libérée par la combustion dans un moteur Diesel .

2.2 Pourquoi la température de l'eau de refroidissement devrait-elle rester en dessous d'une certaine limite ?

La courbe du coefficient de transfert de chaleur entre les parois et le fluide (l'eau) de refroidissement versus la température de surface des parois présente, comme le montre la figure 1.2.2 à la page suivante, trois zones.

Dans la zone 1 limitée à droite par TA, le fluide est entièrement liquide. Dans la zone 2 entre TA et TB, nous sommes en présence de deux phases, liquide et vapeur, mais avec de toutes petites bulles de vapeur: le coefficient de transfert par convection augmente très rapidement de TA pour atteindre son maximum absolu en TB à cause de la quantité d'énergie importante consommée sous forme de chaleur latente de vaporisation. A partir de TB, de grosses bulles sont présentes et forment un écran thermique entre le liquide restant et les parois, d'où la chute brusque du coefficient de convection.

Concrètement, à une pression de 1 bar, la conductivité thermique de l'eau entre 70°C et 90°C (eau liquide) est de $66,8.10^{-2}$ à $68,0.10^{-2}$ $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$ alors que, entre 110°C et 150°C (eau vapeur) elle varie de $2,70.10^{-2}$ à $2,74.10^{-2}$ $\text{W.m}^{-1}.\text{°C}^{-1}$; soit 25 fois plus petite.¹

Ainsi, un fonctionnement dans la zone 3 allant de TB rendrait l'évacuation d'énergie par convection inefficace et

¹ La figure 1.2.3 de la page 14 présente la conductibilité thermique de l'eau versus température eau à 1 bar.

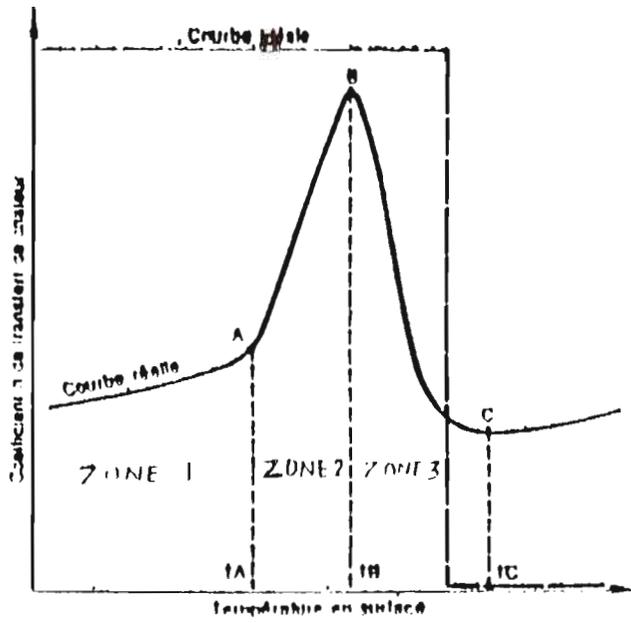


Figure 1.2.2 : Coefficient de chaleur Parois-Fluide versus température parois .

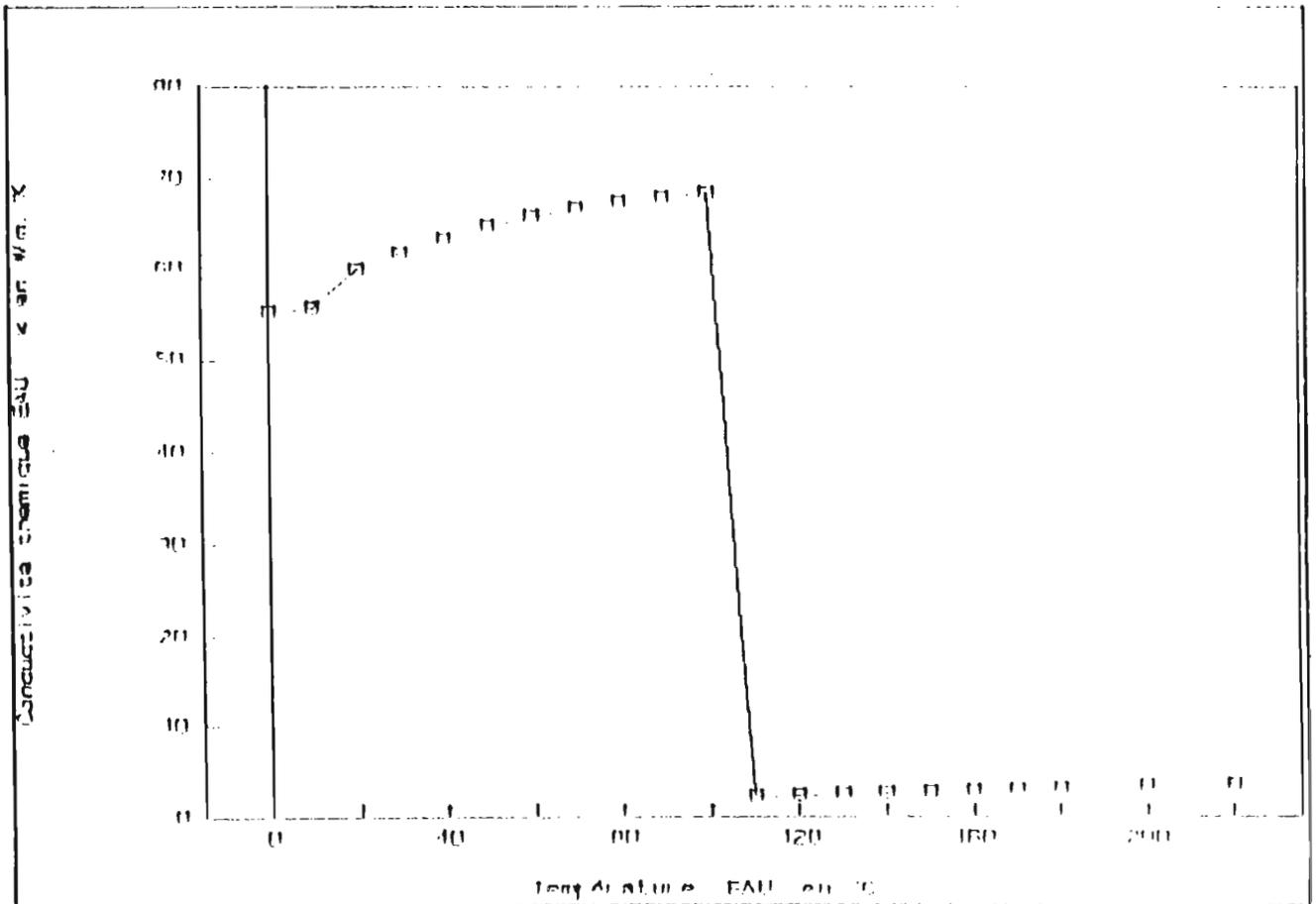


Figure 1.2.3 : Conductivité thermique de l'eau versus température eau à 1 bar.

aurait pour conséquence accumulation d'énergie dans le moteur et destruction de ce dernier.

C'est pour cela que les moteurs doivent être conçus de manière à éviter l'ébullition du fluide de refroidissement.

On comprend donc que la température de l'eau de refroidissement ait une limite maximale permise; et que pour des mesures de sécurité on ait incorporé au circuit un thermostat pour le respect de cette limite.

2.3 Influences du fonctionnement au ralenti d'un moteur Diesel suralimenté

Le fonctionnement au ralenti est très nocif pour un moteur Diesel suralimenté. On observe que :

- les gaz d'échappement entraînant les turbines des turbosoufflantes véhiculent peu d'énergie par unité de temps; les turbosoufflantes tournent alors lentement, la compression de l'air de suralimentation est moindre et la température de l'air en fin de compression devient faible;
- le combustible est injecté à une pression réduite; il se pulvérise alors et pénètre moins dans la chambre de combustion;
- La turbulence de l'air s'affaiblit.

Ces manifestations causent la destruction par craquage d'une bonne partie du combustible injecté, générant ainsi des produits lourds dont la plupart vont polluer l'huile de graissage. Au ralenti, l'huile est froide et ces produits, devenant insolubles, peuvent causer le blocage des segments au

fond de leur gorge et des tiges de soupape d'échappement dans leur guide. Alors on assiste à une augmentation des fuites, des pertes de pression, une dégradation totale de la qualité de la combustion et un risque d'accidents mécaniques très graves tels que le rattrapage des soupapes par les pistons, le flambage des tiges de culbuteurs, etc

On imagine donc, à travers cette analyse, les dangers encourus avec ces BB1600 à cause du fonctionnement au ralenti imposé par l'augmentation nocive de la température de l'eau, puis l'opportunité et la prépondérance de ce projet.

2.4 Description des circuits de refroidissement des BB1600

Les BB1600 sont refroidis à partir de deux circuits fermés d'eau, complètement indépendants: un circuit de refroidissement Basse Température (BT) et un circuit de refroidissement Haute Température (HT).

La figure 1.2.4 en annexe A6 présente schématiquement ces circuits de refroidissement.

2.4.1 Circuit BT

L'eau qui y circule sert à refroidir:

- l'huile de graissage du moteur servant également au refroidissement des pistons;
- l'air de suralimentation.

L'eau est refoulée, par une pompe montée sur le carter de distribution, dans deux échangeurs air-eau montés en parallèle sur le Diesel pour assurer le refroidissement de l'air de suralimentation du moteur. A la sortie l'eau passe à travers un échangeur eau-huile pour refroidir l'huile de graissage du moteur refroidissant aussi les pistons. L'eau traverse enfin une batterie de radiateurs où elle est à son tour refroidie grâce à une circulation d'air forcée à travers les éléments de radiateurs par un ventilateur hélicoïdale, puis retourne à l'aspiration de la pompe.

2.4.2 Circuit HT

L'eau de ce circuit assure le refroidissement du moteur: des culasses et des chemises des cylindres. Sur certains BB1600, elle refroidit également les corps des turbosoufflantes alors que sur d'autres cette fonction est plutôt assurée par l'huile.

L'eau est refoulée à travers le moteur par une deuxième pompe montée aussi sur le carter de distribution. A la sortie du moteur, elle traverse successivement les turbosoufflantes et une vanne thermostatique de régulation qui la retourne directement à l'aspiration de la pompe tant que sa température est en dessous de 75°C. Par contre quand la température dépasse 75°C, la vanne renvoie l'eau à travers une deuxième batterie de radiateur pour son refroidissement grâce au même ventilateur hélicoïdale à axe vertical.

Chaque circuit est muni d'une soute à eau contenant l'eau d'appoint.

2ème PARTIE

RECHERCHE METHODIQUE DES CAUSES

CHAPITRE 1

LE DIAGRAMME CAUSES-EFFET D'ARÊTE DE POISSON D 'HISHIKAWA ET HYPOTHESES DE TRAVAIL

1.1 Définition du diagramme

Le diagramme Causes-effet d'HISHIKAWA est un diagramme très utilisé en analyse de système d'information pour déterminer les causes d'un problème posé; il a l'avantage de présenter, sur une seule figure, toutes les causes possibles du problème étudié.

Ce diagramme est très bien adapté à notre contexte et il s'agira pour nous :

- d'y recenser, en fonction des connaissances théoriques, scientifiques et technologiques, toutes les causes éventuelles d'une élévation anormale de la température de l'eau de refroidissement du moteur Diesel d'une locomotive Diesel-électrique,
- ensuite, d'utiliser les informations pertinentes recueillies et de formuler des hypothèses judicieuses pour restreindre le volume des causes,
- enfin, de tester les causes identifiées, après restriction, afin d'exhiber les causes réelles.

1.2 Elaboration du diagramme

Le diagramme Causes-effet d'HISHIKAWA adapté à notre

contexte est représenté à la figure 2.1.1 de la page suivante.

Il indique que les causes, de l'élévation anormale de la température de l'eau HT, pourraient être imputées à l'eau, aux conditions climatiques (température atmosphérique), à des défauts d'entretien ou à des erreurs de conception.

Nous entendons par erreur de conception, ici, une conception non conforme aux hypothèses de conception émises; elle peut résulter d'une défaillance des outils de conception ou d'un manque d'attention de l'un ou plusieurs des agents impliqués dans la conception .

1.3 Causes et conséquences des problèmes inhérents à la qualité de l'eau de refroidissement d'un circuit fermé

Les problèmes peuvent provenir essentiellement des salissures, de l'entartrage et de la corrosion.

1.3.1 Les salissures

Il s'agit de tout autre constituant de l'eau différent des tartres et susceptible de se déposer sur les surfaces d'échanges thermiques.

Leur cause peut se situer au niveau :

- de l'eau d'appoint si elle contient des matières grenues ou des matières colloïdales instables précipitant lorsque la température est élevée;

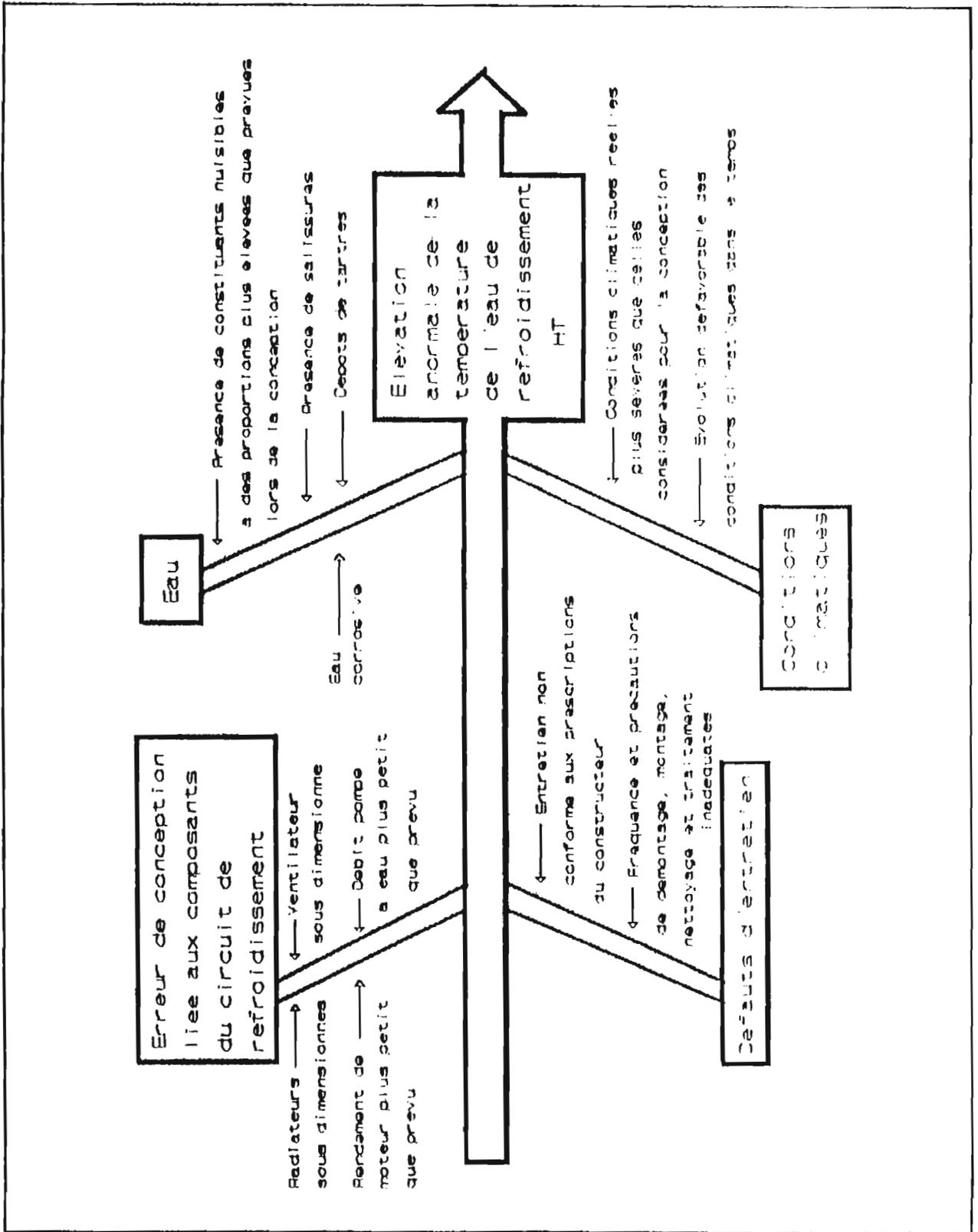


Figure 2.1.1 : Diagramme Causes-effet d'ISHIKAWA .

- de l'échangeur eau-huile en cas d'une fuite d'huile vers l'eau de refroidissement.

La conséquence est la diminution de l'efficacité des échanges thermiques.

1.3.2 Les tartres

Ce sont des dépôts de certains sels peu solubles dans l'eau chaude et pouvant se précipiter donc suite à une élévation de température de l'eau: il s'agit des sels de Calcium dont les plus prépondérants sont les Carbonates et les Sulfates. Les causes de l'entartrage peuvent aussi s'étendre aux Orthophosphates et aux Silices.

Ces tartres se déposent sur les parois des chemises et culasses, puis dans les tuyauteries de circulation de l'eau; les sections internes de ces tuyauteries sont alors réduites; le débit d'eau diminue; les échanges thermiques deviennent inefficaces et la température des parois structurales du moteur et de l'eau augmente car la conductivité thermique (k) de ces tartres (voisine de $2,3 \text{ W.m}^{-1}.\text{°K}^{-1}$) est très faible comparativement aux matériaux constituant les circuits de refroidissement .

En effet, la liste de ces matériaux- pour les BB 1600- et leur conductivité thermique est donnée en annexe A1. On remarquera sur cette liste que la k est pratiquement invariable dans l'intervalle de température concernant notre étude (75 à 92°C). Le tableau 2.1.1 présente une étude comparative entre

MATERIAU	k _{min} MATERIAU W/m. °K	k TARTRE W/m. °K	k TARTRE EST X FOIS PLUS PETITE	UNE COUCHE DE TARTRES DE 1mm D'ÉPAISSEUR EQUIVAUT A UNE PARI DE MATERIAU DE X mm D'ÉPAISSEUR ¹
Aluminium	207,014	2,3	90	90
Alliage d'Al	104,67		45	45
Acier	40,24		17	17
Bronze	25,586		11	11
Caoutchouc	0,037		0,016	0,016
Cuivre	372,16		162	162
Fer	45,357		20	20
Fonte	49,428		21	21
Laiton	79,084		34	34

Tableau 2.1.1 Etude comparative entre conductivité thermique des tartres et conductivités thermiques matériaux .

¹ Voir formule de calcul en annexe A4

la k des tartres et les valeurs minimales de k pour les différents types de matériaux .

Hormis le caoutchouc dont la surface d'échange thermique est relativement infirme et négligeable, ce tableau indique l'ampleur de la dégradation introduite par les tartres dans les échanges thermiques.

1.3.3 La corrosion

C'est la destruction lente, progressive des matériaux utilisés, par rongement- des surfaces en contact direct de l'eau- dû à certaines réactions chimiques et électrochimiques siégeant dans l'eau.

Les attaques chimiques sont causées par la présence de l'air dans le circuit alors que les attaques électrochimiques sont favorisées lorsque l'eau est acide: potentiel d'Hydrogène inférieur à sept (7).

Ces rongements amincissent les parois et peuvent aller jusqu'au percement des matériaux, causant ainsi des fuites et des dépressions. On assiste alors à la destruction prématurée des composants du circuit de refroidissement.

1.4 Prescriptions du constructeur des BB 1600 sur la qualité de l'eau à utiliser pour le refroidissement

Le constructeur soutient que les expériences effectuées

sur l'eau de refroidissement de ces moteurs Diesel ont révélé que des manifestations nuisibles- entartrage ou corrosion- s'observent toujours dans les deux cas suivants:

- lorsque l'eau utilisée n'a subi aucun traitement adéquat, même s'il s'agit d'eau distillée, adoucie, déminéralisée ou d'eau de pluie;

- lorsque pour traiter l'eau, on utilise l'un des produits mis sur le marché- à cet effet et qu'il a homologués- sans s'assurer que cette eau présente certaines qualités préalables:

limpidité : l'eau doit être limpide pour éviter les dépôts de matières en suspension aux points bas à faible vitesse de circulation;

potentiel d'Hydrogène (pH) : il doit être normalement supérieur à sept (7); mais dans le cas contraire, il pourrait être ramené à 7 par ajout du Bicarbonate de Sodium;

dureté : elle doit être la plus faible possible afin d'éviter les précipitations et incrustations responsables de l'entartrage. Une dureté inférieure à 25 degrés français est permise;

teneur en Chlorure de Sodium (NaCl) : elle ne doit pas excéder 60 mg/l;

teneur en Sulfate de Calcium (CaSO₄) : elle doit rester en dessous de 40 mg/l.

La liste des produits de traitement homologués par le constructeur se trouve en annexe A2; elle est suivie des adresses des vendeurs de ces produits.

1.5 Les conditions actuelles de l'eau utilisée par la S.N.C.S

Le remplissage des soutes à eau des BB1600 de la S.N.C.S se fait à Dakar, à Thiès, à Guinguinéo, à Tamba Counda ou à Kidira selon le moment où le besoin s'est fait sentir.

L'eau n'est sujette à aucun traitement, à aucune analyse préalable; elle est prélevée et utilisée directement; quelquefois on y ajoute du Bicarbonate de Sodium avant utilisation.

Les cinq régions de remplissage sont identifiables sur la carte ferroviaire en annexe A3.

1.6 Influence de la température atmosphérique sur le cycle de fonctionnement des moteurs Diesel

Le cycle de fonctionnement réel d'un moteur Diesel peut être assimilé, au niveau de chaque cylindre, à un cycle mixte dit cycle de Sabathe, représenté à la figure 2.1.2 de la page suivante.

Lorsque la température atmosphérique T_1 varie de DT_1 , les températures maximales, du cycle, T_2 , T_3 , T_4 et T_5 varient comme suit :

$$DT_2 = (e)^{n-1} * DT_1 = 2,5 * DT_1$$

$$DT_3 = (e)^{n-1} * DT_1 = 2,5 * DT_1$$

$$DT_4 = (e)^{n-1} * DT_1 = 2,5 * DT_1$$

$$DT_5 = (e)^{n-d} * (e')^{d-1} * DT_1 = 1,6 * DT_1$$

où :

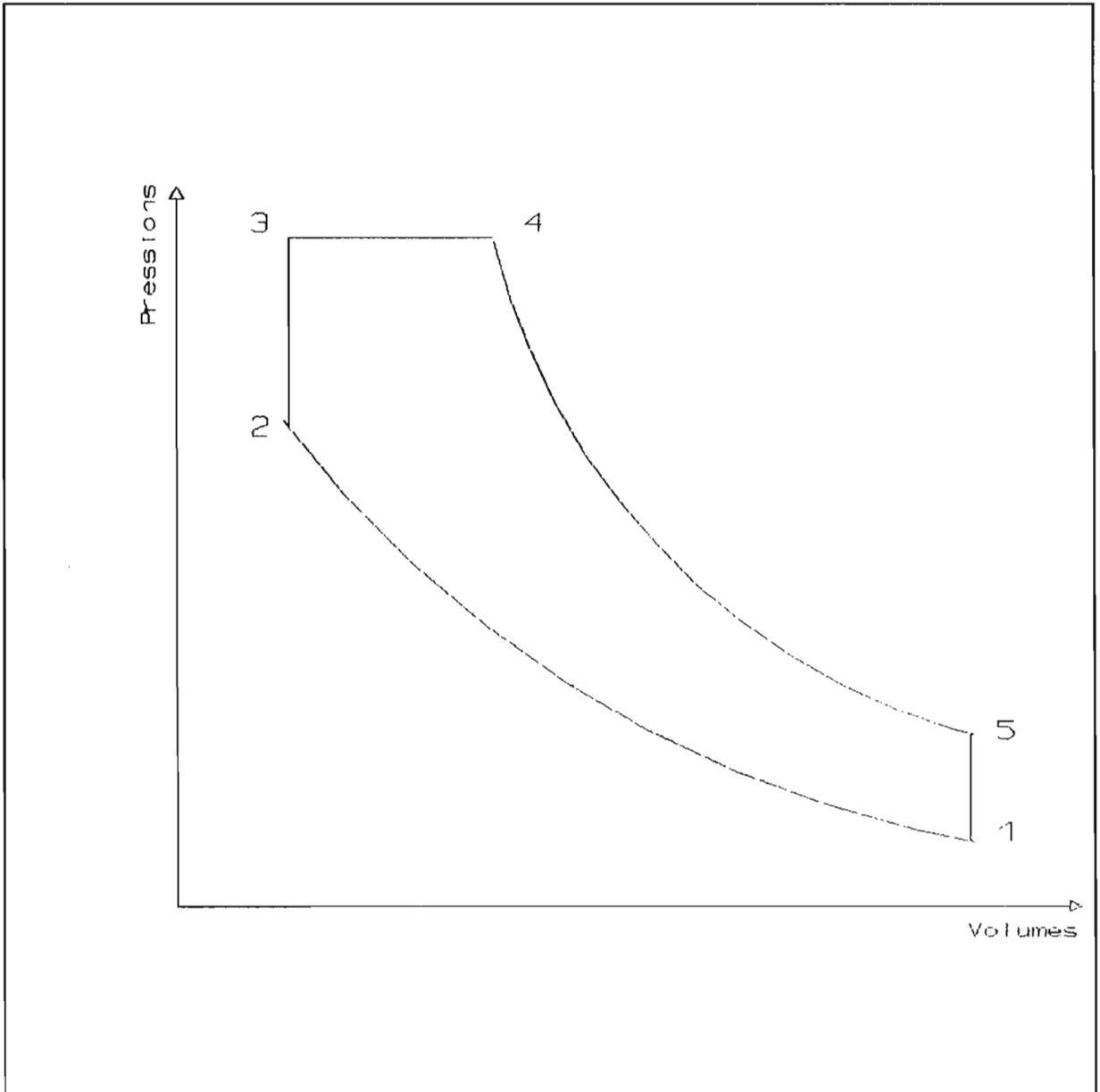


Figure 2.1.2 : Cycle thermodynamique équivalent des moteurs Diesel : cycle de SABATHE .

Transformations :

- 1 - 2 : compression adiabatique;
- 2 - 3 : combustion à volume constant;
- 3 - 4 : combustion à pression constante
- 4 - 5 : détente adiabatique

- $e = V_1 / V_2$ = rapport de compression volumétrique; nous ignorons sa valeur réelle pour les BB 1600, mais considérons 12 pour travailler car pour les moteurs Diesel suralimentés de locomotives, cette valeur est supérieure à 12 .

- n = coefficient de compression adiabatique de l'air; il est en moyenne égal à 1,37 ;

- d = coefficient de détente adiabatique des gaz de combustion; sa valeur moyenne est 1,21 ;

- $e' = T_4 / T_3$; sa valeur réelle n'est pas connue; mais elle excède 1,5 ; travaillons alors avec 1,5 .

Les formules sont établies en annexes A4 et graphiquement illustrées à la figure 2.1.3 de la page suivante.

Cet accroissement des températures du cycle augmente les températures des parois de la chambre de combustion. Les 16 chambres réunies, la quantité d'énergie à évacuer par l'eau s'élève considérablement et sa température finit par dépasser la limite maximale permise lorsque la température atmosphérique augmente jusqu'au delà de la valeur considérée pour concevoir le circuit de refroidissement.

1.7 Les informations pertinentes recueillies à la S.N.C.S

Nous avons, dans le souci de cerner tous les paramètres nécessaire à notre analyse, interrogé le personnel, du service d'entretien de la S.N.C.S, imprégné du problème posé. Nous avons

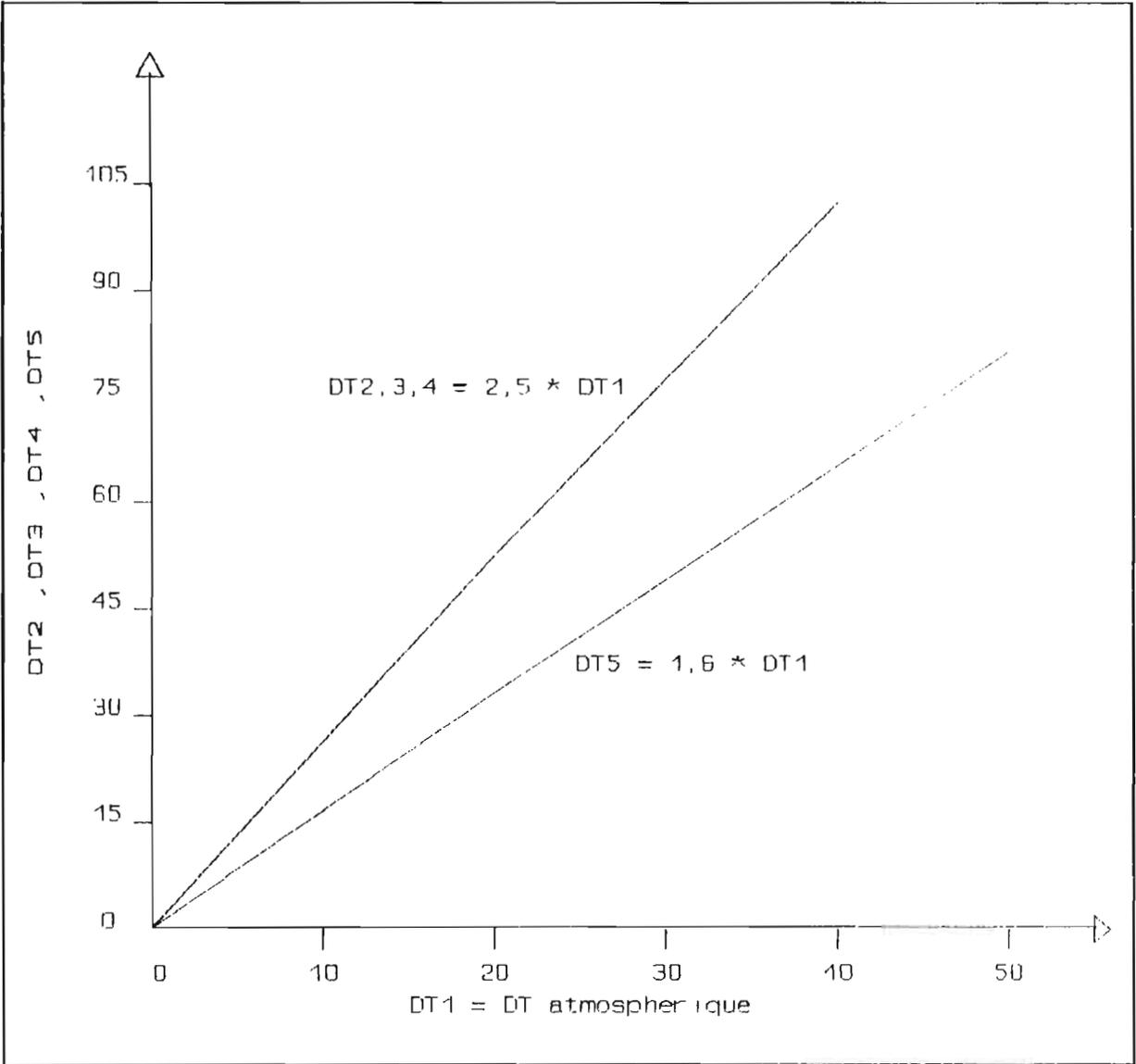


Figure 2.1.3 : Variations des températures maximales du cycle de SABATHE versus variations de la température atmosphérique.

ainsi été informé que :

- l'élévation indésirable de la température de l'eau HT s'observe au sein d'une BB 1600 déjà dès la 1ère année de son arrivée à la S.N.C.S ;
- tous les jours où le phénomène s'observe, c'est toujours entre 12 heures et 15 heures, heure universelle ;
- pendant les périodes d'entretien des BB 1600, ces dernières sont soumises à des essais de fonctionnement au cours desquels il est enregistré, entre autres, la température atmosphérique et la température de l'eau HT à la sortie du moteur Diesel pour différentes vitesses de ce dernier jusqu'à 1500 tr/min; on s'est toujours assuré qu'à cette vitesse (1500 tr/min) la température de l'eau HT est en dessous de 92°C avant la mise en ligne de la locomotive ;
- le phénomène ne s'observe pas tous les jours ;
- l'entretien des équipements se fait conformément aux indications des fichiers d'entretien fournis par le constructeur.

1.8 Hypothèses de travail

L'élévation pernicieuse de la température de l'eau de refroidissement est évidemment une conséquence directe de l'inefficacité des échanges thermiques au sein du circuit. Les causes de cette inefficacité peuvent se situer à divers niveaux comme le révèle le diagramme Causes-effet d'HISHIKAWA : eau, conditions climatiques, erreur de conception et défauts

d'entretien.

Cependant, l'erreur de conception, telle que nous l'avons définie, est difficile à tester; cela demande beaucoup plus de temps que nous n'en disposons, des équipements de mesure très sophistiqués que nous ne pourrions avoir et la connaissance de certaines données utilisées par le constructeur pour la conception .

Par ailleurs, nous considérons que l'entretien suivant le guide du constructeur est celui qui confère à la locomotive les meilleures conditions de fonctionnement.

En conséquence, aux données précédentes, deux causes restent à tester : l'eau et les conditions atmosphériques.

CHAPITRE 2

ANALYSE DE L'EAU UTILISEE PAR LA S.C.N.S

2.1 Travail effectué

Il s'agit d'effectuer sur chacun des cinq différents échantillons d'eau (échantillon de Dakar, de Guinguinéo, de Kidira, de Tamba Counda et de Thiès) toutes les analyses nécessaires à la détermination du pH, de la dureté, de la teneur en Chlorure de Sodium (NaCl) et de la teneur en Sulfate de Calcium.

Toutes les précautions prises sur les échantillons qui nous ont été prélevés, toutes les références des méthodes d'analyse utilisées et toutes les formules de calculs sont explicitement décrites en annexe A5 .

Hypothèse : le laboratoire d'expérimentation est celui de l'E.P.T .

2.2 Potentiel d'hydrogène (ph)

Le pH a été déterminé à 25°C à l'aide d'un pH-mètre.

Résultat

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
pH	7,05	8,05	7,4	7,8	7,5

Standard : pH \geq 7

Conclusion : Tous les échantillons ont un pH conforme aux prescriptions du constructeur.

2.3 Dureté Totale

Elle a été mesurée par la méthode complexométrique à l'EDTA.

Résultat : en degré français;

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
Dureté	28,30	5,06	6,70	22,50	23,80

Standard : dureté totale \leq 25 degrés français

Conclusion : Seul l'échantillon de Dakar a une dureté supérieure à la dureté maximale imposée.

2.4 Teneur en Chlorure de Sodium (NaCl)

Nous avons dosé les chlorures par la méthode de Mohr.

Résultat : en mg/l;

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
[NaCl]	225,32	571,64	12,27	31,56	26,30

Standard : [NaCl] \leq 60 mg/l

Conclusion : Seuls les échantillons de Dakar et de Guinguinéo sont en porte-à-faux avec le standard.

2.5 Teneur en Sulfate de Calcium (CaSO₄)

Afin de connaître la concentration en CaSO₄, nous allons considérer l'ordre de regroupement le plus communément utilisé pour les ions :

Cations : Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺

Anions : NO₃⁻, SO₄²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻.

Il nous faut alors déterminer en milliéquivalent par litre (még/l) les concentrations en Ca²⁺, NO₃⁻ et SO₄²⁻. En effet, en tenant compte de l'ordre de regroupement, nous avons:

[CaSO₄] = Minimum { [Ca²⁺] - [NO₃⁻] ; [SO₄²⁻] } où toutes les concentrations sont exprimées en még/l.

2.5.1 Teneur en Ca²⁺

Nous avons pour cela déterminé la dureté calcique par la méthode complexométrique à l'EDTA. En effet [Ca²⁺] en még/l est égale à la dureté calcique en még/l.

Résultat : en még/l;

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
[Ca ²⁺]	3,04	0,47	0,49	1,17	0,96

2.5.2 Teneur en SO_4^{2-}

Elle a été obtenue à partir de la méthode turbidimétrique.

Résultat : en méq/l;

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
$[\text{SO}_4^{2-}]$	0,6	1,08	0,20	1,05	0,24

2.5.3 Teneur en NO_3^-

Les pH des échantillons d'eau analysés sont voisins de 7; ainsi dans l'hypothèse que les résultats de nos analyses sont fiables, nous pouvons utiliser la balance ionique pour déterminer la teneur en NO_3^- pour chacun de ces échantillons.

En effet, d'après la théorie, la balance ionique est l'égalité qui doit s'observer entre la somme des anions et celle des cations, exprimées en concentration de milliéquivalents, d'un même échantillon dont le pH est voisin de 7 pour des analyses faites dans des conditions garantissant la fiabilité des résultats.

Nous avons donc l'égalité :

$$[\text{NO}_3^-] + [\text{SO}_4^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{Cl}^-] = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+]. \quad \text{Or}$$

$$[\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] = \text{CCAF} + \text{T}_{\text{AC}} \quad \text{où}$$

CCAF = concentration en cations d'acides forts ;

T_{AC} = Alcalinité Totale. Ainsi :

$$[\text{NO}_3^-] = \text{CCAF} + \text{T}_{\text{AC}} - ([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{Cl}^-])$$

2.5.3.1 CCAF

La concentration de ces cations a été déterminée par le dosage des échantillons avec la soude en présence de l'indicateur mixte.

Résultat : en méq/l

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
CCAF	5,66	8,82	0,84	1,29	0,65

2.5.3.2 T_{AC}

Nous avons utilisé le dosage des échantillons avec l'acide Chloridrique (HCl) en présence de l'indicateur mixte.

Résultat : en méq/l

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
T _{AC}	4,26	7,76	2,74	5,39	5,23

2.5.3.3 HCO₃⁻

Nous nous sommes servis de l'Alcalinité à la Phénolphtaléine (P) en méq/l et de l'Alcalinité Totale en méq/l.

En effet, la théorie enseigne que :

si $P = 0$ alors $[HCO_3^-] = T_{AC}$;

si $P \leq T_{AC} \leq 2P$ alors $[HCO_3^-] = 0$;

si $T_{AC} > 2P$ alors $[HCO_3^-] = T_{AC} - 2P$.

Résultat : en még/l

	Dakar	Guinguini- néo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
P	0	0.44	0	0	0
T_{AC}	4,26	7,76	2,74	5,39	5,23
$[HCO_3^-]$	4,26	6,88	2,74	5,39	5,23

P a été déterminée à partir du dosage avec l'HCl en présence de l'indicateur Phénolphtaléine.

2.5.3.4 $[Cl^-]$

Nous avons utilisé la méthode de Mohr à cet effet .

Résultat : en még/l

	Dakar	Guinguini- néo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
$[Cl^-]$	3,85	9,78	0,21	0,54	0,45

2.5.3.5 $[\text{NO}_3^-]$

$$[\text{NO}_3^-] = \text{CCAF} + T_{\text{AC}} - ([\text{SO}_4^{2-}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{Cl}^-])$$

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba Counda	Thiès
CCAF	5,66	9,99	0,84	1,63	0,72
T_{AC}	4,26	7,76	2,74	5,39	5,23
$[\text{SO}_4^{2-}]$	0,6	1,08	0,2	1,05	0,24
$[\text{HCO}_3^-]$	4,26	6,88	2,74	5,39	5,23
$[\text{Cl}^-]$	3,85	9,78	0,21	0,54	0,45
$[\text{NO}_3^-]$	1,21	0,01	0,43	0,04	0,03

2.5.4 Teneur en CaSO_4

Rappelons l'ordre de regroupement le plus communément utilisé pour les ions :

cations : Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+

Anions : NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- .

D'où $[\text{CaSO}_4] = \text{Minimum} \{ [\text{Ca}^{2+}] - [\text{NO}_3^-] ; [\text{SO}_4^{2-}] \}$.

	Dakar	Guinguinéo	Kidira	Tamba counba	Thiès
[Ca ²⁺]	3,04	0,47	0,49	1,17	0,96
[NO ₃ ⁻]	1,21	0,01	0,43	0,04	0,03
[Ca ²⁺] - [NO ₃ ⁻]	1,83	0,46	0,06	1,13	0,93
[SO ₄ ²⁻]	0,6	1,08	0,2	1,05	0,24
[CaSO ₄] méq/l	0,6	0,46	0,06	1,05	0,24
[CaSO ₄] mg/l	40,8	31,28	4,08	71,4	16,32

Standard : [CaSO₄] ≤ 40 mg/l

Conclusion : Seuls les échantillons de Dakar et de Tamba Counda ont des concentrations de CaSO₄ plus élevées que la limite maximale prescrite par le constructeur.

2.6 Conclusion sur l'analyse de l'eau

Les résultats de l'analyse révèlent que, d'après les prescriptions du constructeur, les prises d'eau d'appoint à Dakar, à Guinguinéo et à Tamba Counda sont très préjudiciables aux échanges thermiques au sein du circuit de refroidissement.

ETUDE DES CONDITIONS ATMOSPHERIQUES

3.1 Hypothèses

Lorsqu'on parle, en général, de conditions atmosphériques dans les échanges thermiques, l'allusion est faite à trois propriétés de l'air à savoir : la pression totale communément appelée pression atmosphérique, l'humidité absolue et la température atmosphérique.

Cependant, la pression atmosphérique est constante dans le temps et dans l'espace, et l'humidité absolue dans un pays tropical existe dans l'atmosphère uniquement sous forme de vapeur et ne peut avoir d'influence sensible sur les échanges thermiques dont il est question dans notre contexte.

Par conséquent, l'étude des conditions atmosphériques se confond, ici, à l'étude des températures atmosphériques.

L'implication des températures atmosphériques dans les causes du problème posé serait sans doute confirmée ou infirmée très rapidement si on disposait en face pour chaque BB 1600 les informations suivantes :

- les jours et les lieux de détresse en ligne due à la forte température ,
- les températures atmosphériques mesurées par la METEO, ces jours, pour ces lieux ,
- puis la température atmosphérique et la température de l'eau

mesurées lors du dernier essai sur la BB 1600 à la S.N.C.S avant la détresse et à 1500 tr/min .

Mais, toutes ces informations ne sont pas disponibles et pour celles qui le sont, il n'existe pas une compatibilité aussi frappante entre les dates de recueil.

Néanmoins, nous essayerons d'organiser, judicieusement, les informations dont nous avons pu disposer pour arriver à des conclusions fiables .

3.2 Jours et lieux de détresse, en ligne, des BB 1600 due à la forte température

Ces informations sont apparentes sur le tableau 2.3.1 ; elles ont été tirées des procès verbaux d'incidents faits à la S.N.C.S.

Mentionnons que nous n'avons pu avoir que des procès verbaux d'incidents pour certains mois de 1989, 1990 et 1991 .

ANNEE 1989

BB	DETRESSE DUE A FORTE TEMPERATURE	
	DATE	LIEU
1601	03 AVRIL	PK 204
	12 AVRIL	DAKAR
1606	20 AVRIL	PK 612
1607	14 MARS	KOUNGHEUL
	07 AVRIL	M. HODAR
	25 AVRIL	KIDIRA
	05 JUIN	BALA
1608	24 JUIN	TAMBA
	08 NOVEMBRE	PK 58 + 500 m
	15 NOVEMBRE	COUDIRY
1609	02 JUILLET	PK 25 + 500 m
	12 JUILLET	COLOBANE
1610	28 DECEMBRE	PK 1

ANNEE 1990		
BB	DETRESSE DUE A FORTE TEMPERATURE	
	DATE	LIEU
1601	17 AVRIL	PK 167
	05 MAI	M. HODAR
	02 JUIN	PK 115
1603	24 SEPTEMBRE	PK 50 + 400 m
1606	13 AOUT	PK 49
1608	24 SEPTEMBRE	TAMBA
1609	26 MAI	PK 5
	23 AOUT	THIAROYE
	06 SEPTEMBRE	DIOURBEL
	21 SEPTEMBRE	M. HODAR

ANNEE 1991		
BB	DETRESSE DUE A FORTE TEMPERATURE	
	DATE	LIEU
1603	04 FEVRIER	PK 374
	18 FEVRIER	PK 391
	19 FEVRIER	PK 317

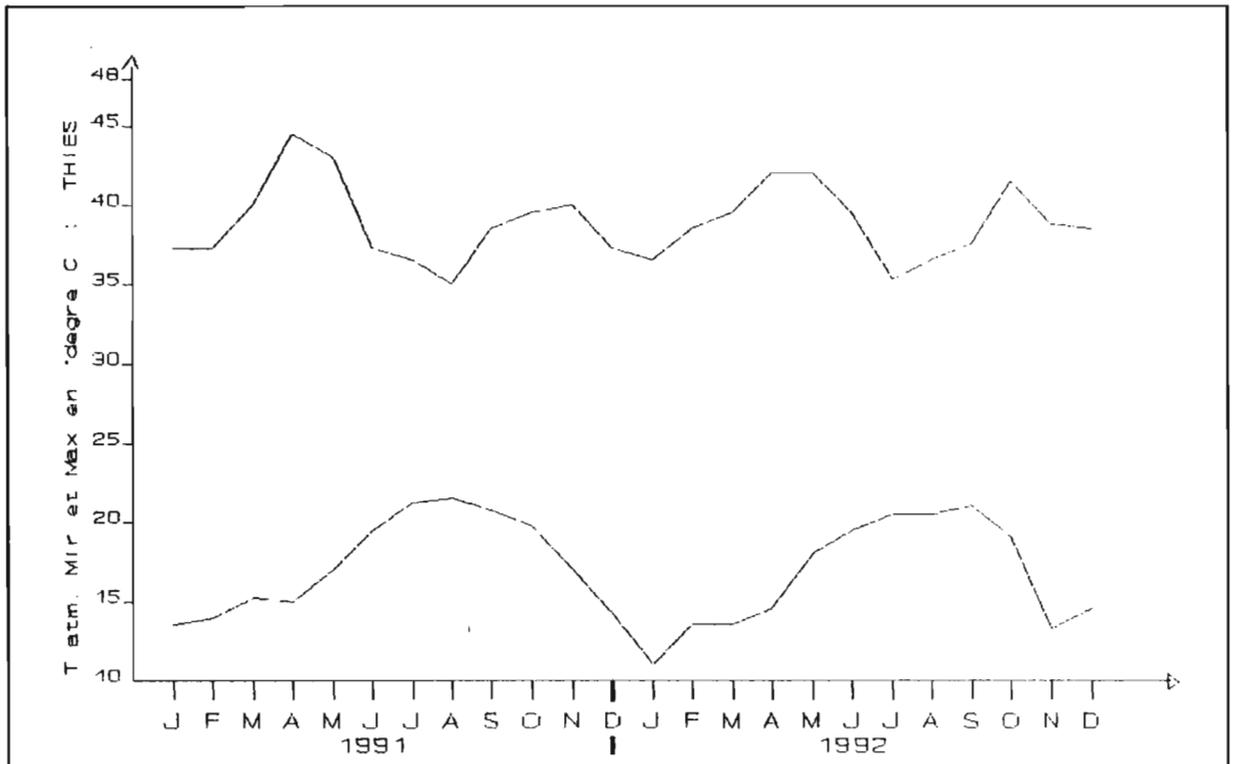
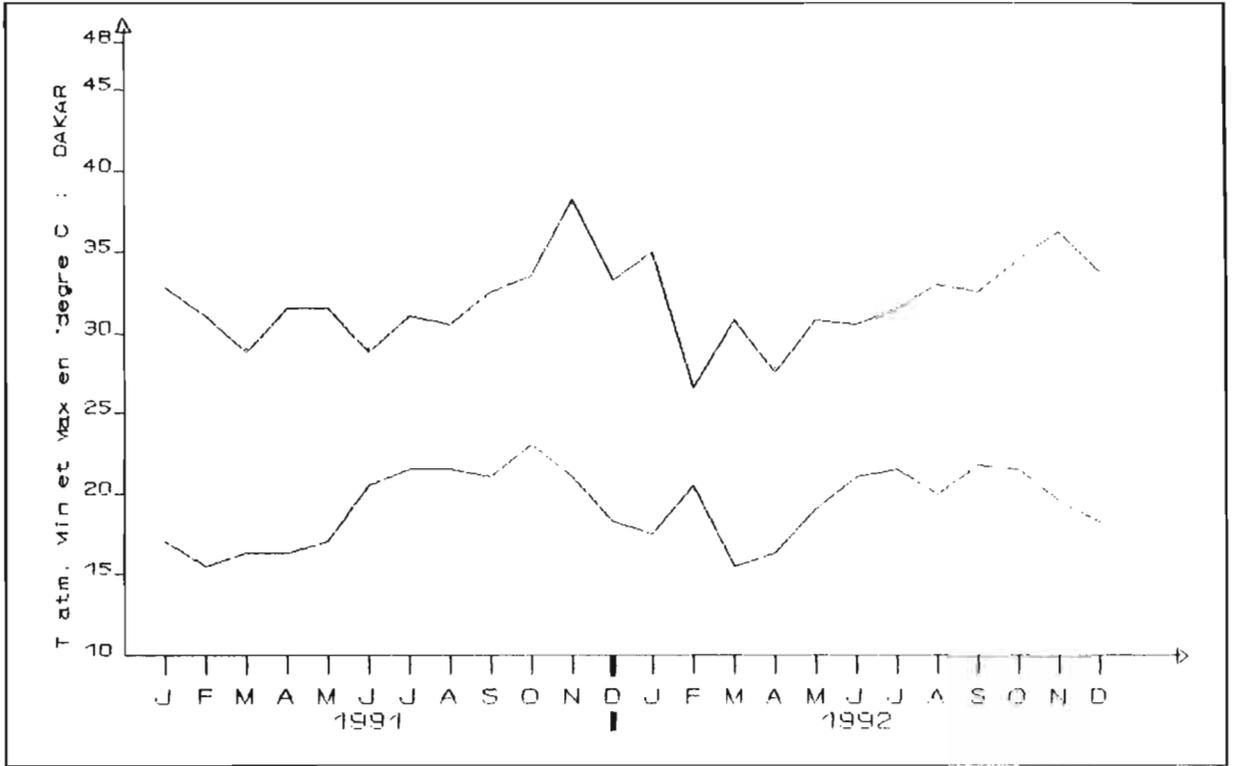
	22 FEVRIER	PK 134
	01 MARS	BAMBEY
	02 MARS	PK 139
	14 MARS	COTIART
1606	01 MARS	PK 172
	09 MARS	LAM-LAM
	26 MARS	GOSSAS
1609	14 FEVRIER	M.NIANI
	18 OCTOBRE	PK 65

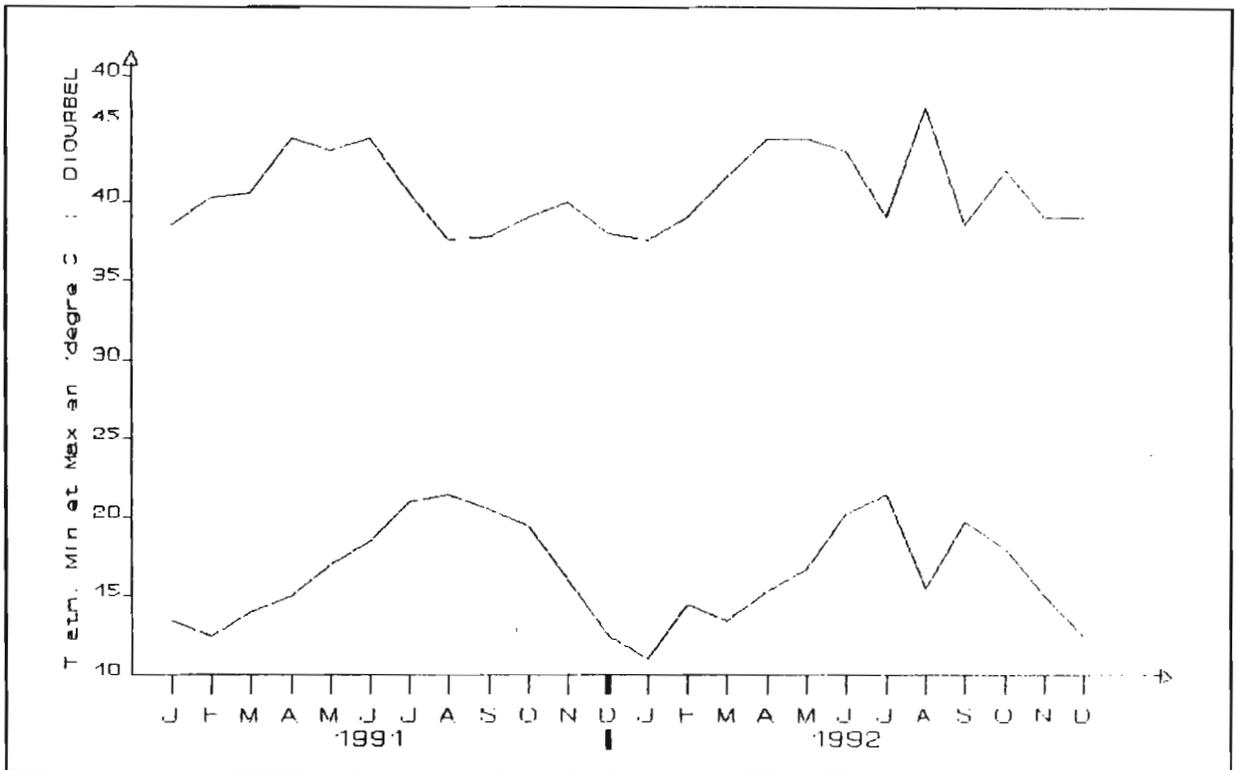
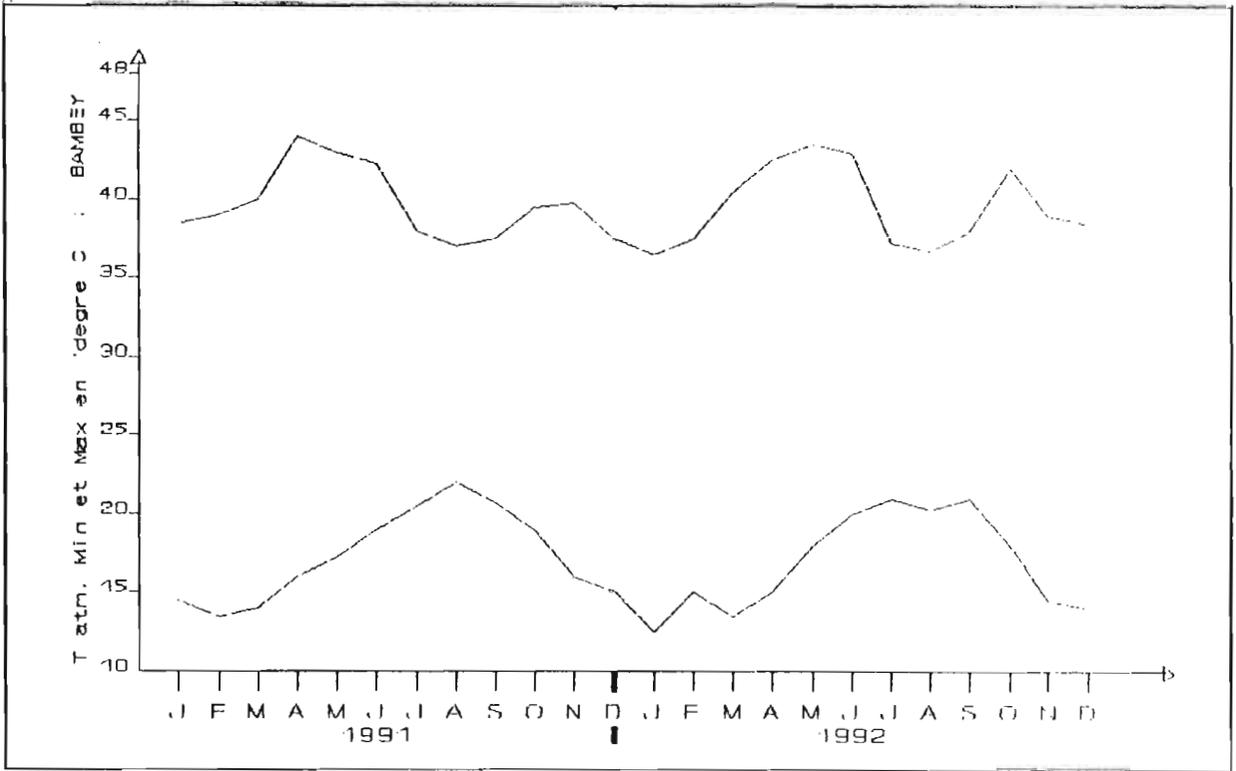
Tableau 2.3.1 : Dates et lieux de détresses dues à forte température .

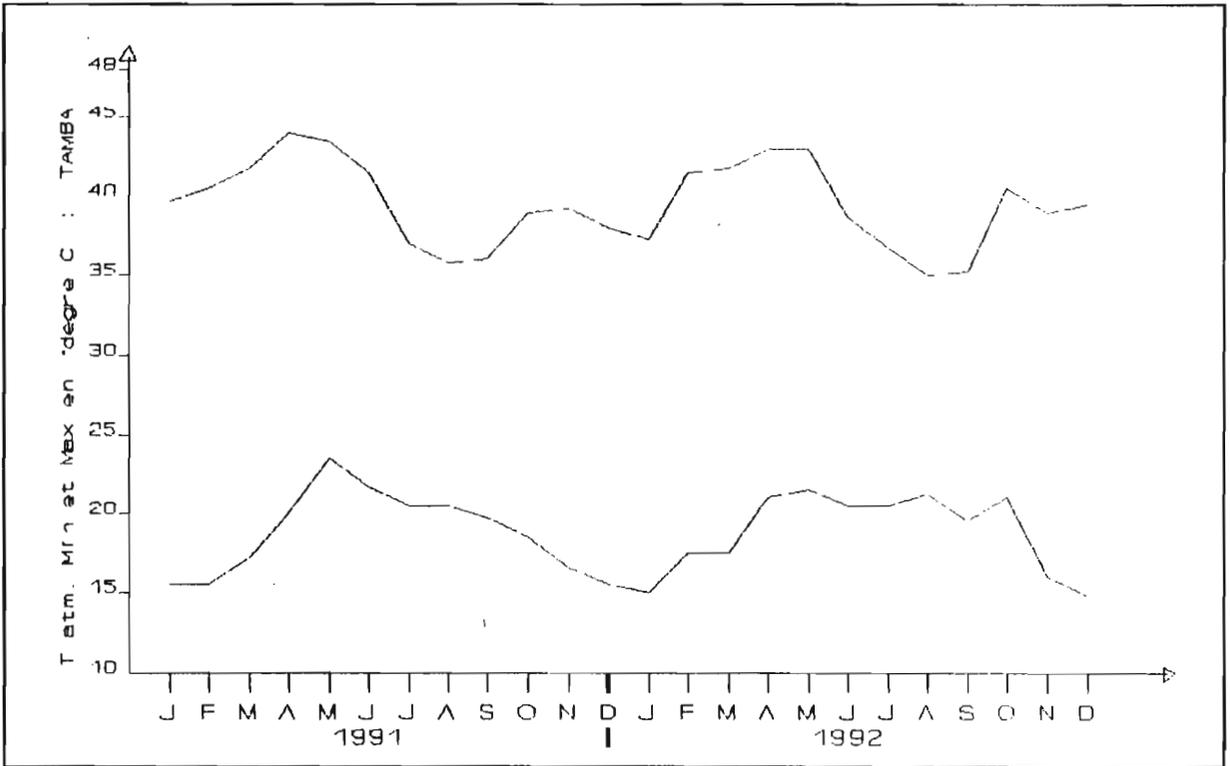
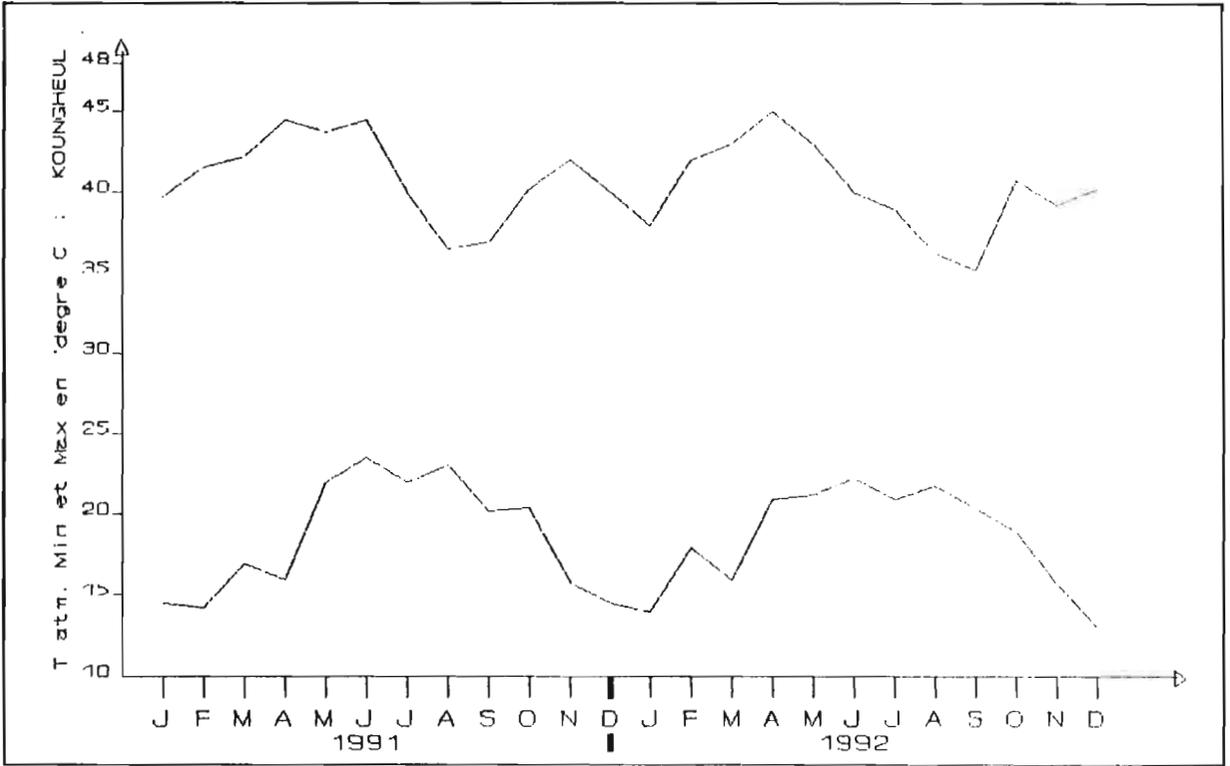
3.3 Les températures atmosphériques maximales et minimales mensuelles mesurées par la METEO dans les régions ferroviaires

Il ne nous a pas été possible d'obtenir ces températures pour les jours de détresses mentionnés ci- haut. Par ailleurs elles sont disponibles seulement pour les années 1991 et 1992, et pour les régions ferroviaires Dakar, Thiès, Bambeï, Diourbel, Guinguinéo, Koungheul, Tamba Counda et Goudiry .

Ces températures sont représentées sur la figure 2.3.1 .







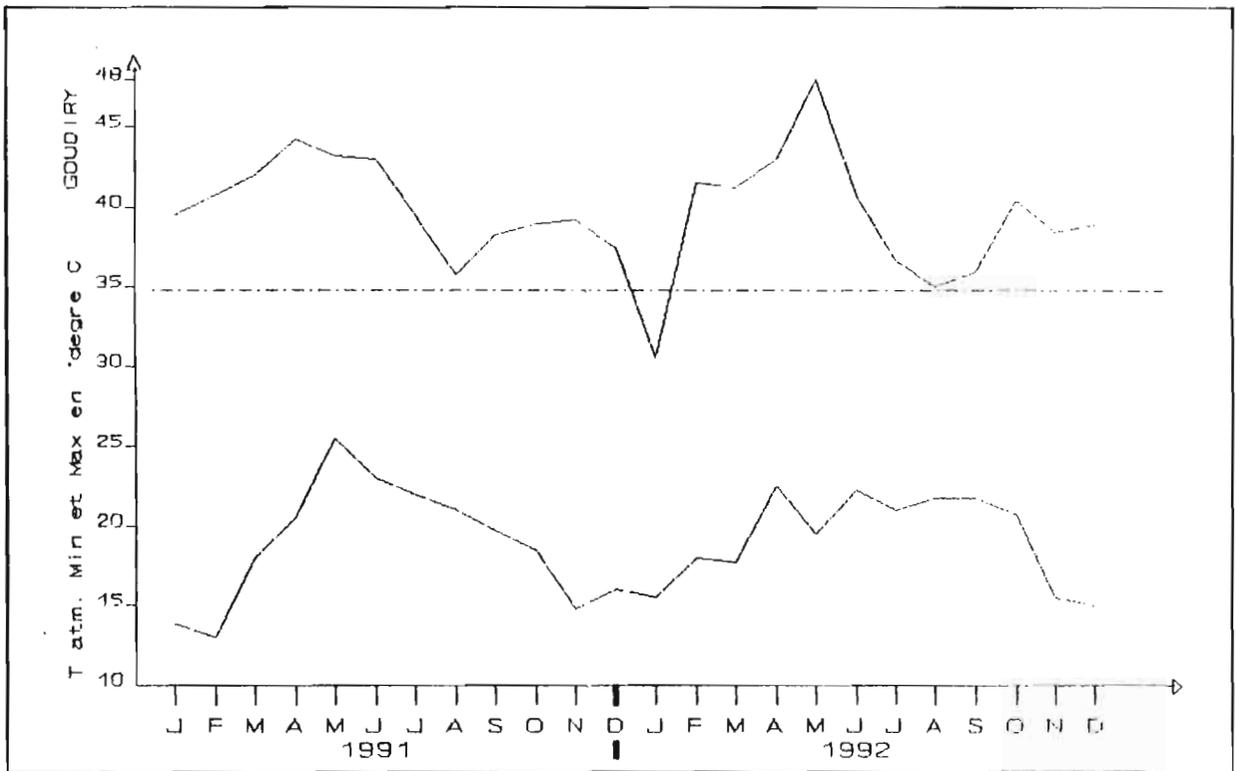


Figure 2.3.1 : Températures atmosphériques Min. et Max des régions ferroviaires

3.4 Températures atmosphériques et températures eau mesurées à la S.N.C.S pendant certains essais sur les BB 1600

Celles que nous avons pu recueillir sont inscrites dans le tableau 2.3.2 .

BB	T. atm. °C	T. eau °C	DATE DE MESURE	ANNEE D' ARRIVEE
1601	31	84	21/11/1980	1977
1603	24	76	12/02/1981	
	30	91	06/06/1990	
	22,5	76	06/05/1992	
	32	84	06/05/1992	
1604	28	52	18/10/1990	1980
	28	55	18/10/1990	
1606	24	80	21/11/1991	1983
	33,5	91	21/11/1991	
1609	28	88	13/03/1992	
	29	88	25/09/1992	
	30	88	25/09/1992	
	35	91	15/06/1993	
1610	23	86	23/04/1991	
	23	88	23/04/1991	
	34	90	06/11/1991	

Tableau 2.3.2 : Températures atmosphériques et températures eau mesurées pendant certains essais .

3.5 Analyse des informations recueillies

L'analyse va se fonder uniquement sur les informations de 1991 et 1992, question de rationalité; étant donné que les températures maximales et minimales atmosphériques météorologiques sont disponibles seulement pour ces deux années.

Le tableau 2.3.1 permet de comprendre que le nombre de détresses liées aux fortes températures n'est pas négligeable et que cette panne mérite réellement de faire l'objet d'une étude.

D'après la figure 2.3.1, les températures atmosphériques varient entre 15 et 38°C, 11 et 44°C, 12 et 44°C, 11 et 44°C, 13 et 45°C, 15 et 44°C, 14 et 48°C respectivement pour les régions Dakar, Thiès, Bambey, Diourbel, Koungheul, Tamba Counda et Coudiry. Les moyennes de températures maximales sont respectivement 32, 39, 40, 41, 41, 40 et 38°C.

Alors que le tableau 2.3.2 indique que la température atmosphérique maximale déjà mesurée à la S.N.C.S pendant des essais est de 35°C; cette valeur est inférieure respectivement de 3, 9, 9, 9, 10, 9 et 13°C aux températures maximales des régions citées ci-dessus; donc soit les essais sont effectués dans un milieu où il fait relativement moins chaud par rapport aux régions ferroviaires, soit les périodes d'essais coïncident, par hasard, avec les moments où il fait relativement moins chaud. Par ailleurs pour une température atmosphérique atteignant 30°C, les mesures d'essais montrent qu'on est certain d'avoir une température d'eau HT au dessus de 88°C (BB 1606, 1609 et 1610)

et que pour une température atmosphérique à 35°C, l'eau atteindra sûrement 90°C (BB 1606, 1610) .

Il n'y a certes pas suffisamment de données pour connaître l'allure de la courbe température eau HT versus température atmosphérique, mais en se servant du tableau 2.3.2, on note une augmentation de 11°C température eau pour une augmentation de 9,5°C température atmosphérique (BB 1606). On ne peut donc que s'attendre, très souvent, à des dépassements de température eau HT (au delà de 92°C) lorsqu'une BB 1600 traverse les régions ferroviaires à 1500 tr/min pendant les périodes où la température atmosphérique est supérieure à 35°C .

3.6 Conclusion sur les conditions atmosphériques

De l'analyse précédente et du fait que déjà dans leur lère année de mise en service, le dépassement de température s'observe au niveau de l'eau HT des BB 1600, il ressort que ces dernières évoluent dans des conditions atmosphériques plus sévères que celles appropriées pour l'efficacité du circuit de refroidissement de leur moteur Diesel.

Cependant nous nous gardons d'affirmer que les circuits de refroidissement n'ont pas été conçus pour l'environnement dans lequel les BB 1600 doivent fonctionner. En effet même si le défaut se manifeste déjà dans les lère années de mise en service alors que le temps écoulé a suffit pour engendrer des dépôts de tartres par l'eau et occasionner des interventions sur le circuit

de refroidissement, la logique veut qu'on considère la nature et la qualité des interventions opérées; surtout quand on sait qu' une seule intervention mal faite sur les radiateurs suffit pour altérer complètement ceux-ci et faire chuter leur rendement thermique.

3 ème PARTIE

EBAUCHE DES PERTES FINANCIERES
ENGENDREES PAR L'EXCES DE
TEMPERATURE

CHAPITRE 1

HYPOTHESES

1.1 Introduction

Il est important pour nous de signaler que l'objet de cette partie du travail effectué est de faire voir sommairement, sur le plan financier, l'importance du sujet traité dans ce rapport. Ce serait prétentieux de notre part de vouloir présenter une étude économique ou une analyse avantages/coûts détaillée alors que nous venons à peine d'identifier les causes du problème posé.

La S.N.C.S possède, au total, 10 BB 1600 (1601 à 1610); les 3 premières sont arrivées en 1977, les 4 suivantes en 1980 et les 3 dernières en 1983 .

Six de ces BB 1600 (2, 4, 5, 7, 8, 10) sont utilisées pour les Petits Trains Bleus (PTB) qui assurent la desserte de la banlieue de Dakar alors que les quatres autres servent aux transports de marchandises telles que phosphates, arachides, etc... .

1.2 Hypothèses

Les informations recueillies à la S.N.C.S nous ont permis de formuler les hypothèses sur lesquelles reposent les calculs financiers effectués :

- les dépôts de tartres occasionnés par la mauvaise qualité de l'eau augmentent la fréquence d'intervention sur le circuit de refroidissement; ceci réduit la durée de vie des éléments de radiateurs et de la pompe à eau; mais cet aspect ne sera pas pris en compte dans la suite ;
- l'entretien supplémentaire causé par l'élévation de température n'est pas sous traité; nous supposons que le personnel d'entretien ne sera pas réduit si on résout le problème de forte température ; donc il n'y a pas de coût supplémentaire engendré par ce problème ;
- la mise au ralenti due à la forte température dure environ 30 à 40 minutes; il a toujours été possible de faire remplacer une BB 1600 immobilisée pour entretien : nous supposons que la somme d'argent rentrée par les BB 1600 n'est pas affectée ;
- la durée de vie technique d'une locomotive Diesel électrique BB 1600 est de 25 ans ;
- la durée de vie normale (sans problème d'élévation de température) du moteur Diesel d'une BB 1600 : nous considérons qu'elle est égale à la durée moyenne normale de fonctionnement entre deux Révisions Générales (RC). En effet une RC consiste à remettre à neuf le moteur Diesel .

D'après les prescriptions du constructeur, le parcours entre 2 RC doit être 360.000 kilomètres (km).

Les données des trois exercices précédents (1990 ,1991 et 1992) indiquent un parcours moyen annuel égal à 413 000 km pour les 10 BB 1600 ; ceci correspond à 41 300 km/an pour une BB 1600.

La durée moyenne normale entre deux RC est alors
 $360\ 000 / 41\ 300 = 8,7$ ans ; considérons 9 ans pour la suite .

On en déduit que la durée de vie normale (sans problème d'élévation de température eau) d'un moteur Diesel de BB 1600 à la S.N.C.S est de 9 ans .

- toutes les théories sur les moteurs Diesel sont unanimes sur le fait que la durée de vie d'un moteur Diesel est essentiellement liée aux contraintes (surtout thermiques) induites par les conditions de fonctionnement dans les matériaux composant ce moteur. Vu la fréquence de la panne de forte température et compte tenu des contraintes qui vont être générées dans les structures du moteur Diesel, il est évident que sa durée de vie va être considérablement réduite : nous supposons que la durée de vie réelle n'est rien d'autre que la durée de fonctionnement réelle entre 2 RC; cette durée est inférieure à la durée normale de fonctionnement.

La réduction de la durée de fonctionnement entre 2 RC est directement imputable à l'élévation excessive de température.

En effet, d'après le service d'entretien de la S.N.C.S, les RC anticipées interviennent toujours suite à un grippage¹ du moteur ; ce grippage qui n'a jamais eu d'autres causes que la forte température de l'eau. Lorsque la température de l'eau s'élève exagérément, ne permettant plus l'évacuation suffisante

¹ coincement du moteur.

de l'énergie des structures du moteur Diesel, il se produit une hausse anormale de la température de l'huile de graissage qui se dégrade entièrement et n'assure plus pratiquement sa fonction : il en résulte un grippage du moteur Diesel .

Pour estimer la durée réelle entre 2 RC, il nous faut disposer des fichiers de RC depuis l'arrivée des BB 1600 à la S.N.C.S jusqu'à 1993; mais nous n'avons pas pu avoir tous les fichiers requis .

Cependant nous supposerons que la durée de vie réelle se trouve dans l'intervalle de 5 ans à 8 ans et notre étude financière considérera tous les 4 cas : durée de vie égale 8 ans, 7 ans, 6 ans et 5 ans .

- le coût de la Révision Générale du moteur Diesel d'une BB 1600 est de 50 millions de francs CFA ;

- le coût du capital est supposé égal à 7 % ;

- nous considérons qu'il n'y a pas d'inflation sur toute la période d'étude .

- enfin nous ne nous intéresserons pas, dans cette étude, aux économies d'impôt dues à l'amortissement ou aux économies d'impôt sur dépenses ;

Mentionnons que nous avons, en fait, visé à travers nos hypothèses l'évaluation d'une perte certaine subie par la S.C.N.S à cause du problème de forte température .

CHAPITRE 2

TABLEAUX DES INVESTISSEMENTS POUR LES REVISIONS GENERALES DES MOTEURS DIESELS DES BB 1600

2.1 Travail effectué

L'objectif principal de ces tableaux d'investissements est de répondre aux questions suivantes :

- si le problème de forte température ne se posait pas, autrement pour une durée de vie égale à 9 ans, quels seraient les dépenses de la S.N.C.S pour les RC des moteurs Diesel depuis l'arrivée du premier lot de BB 1600 en 1977 jusqu'à la fin de la durée de vie technique du dernier lot en l'an 2007 ?
- à cause de la réduction de vie causée par l'élévation de température de l'eau, quelles sont réellement les dépenses de RC dans le cas d'une réduction de 1 an, 2 ans, 3 ans et 4 ans ?
- dans l'hypothèse que la S.N.C.S n'achètera plus de BB 1600, quel est le coût de la résolution du problème de forte température au delà duquel la S.N.C.S aura intérêt à renoncer à la résolution de ce problème ?

En considérant l'année 1994 comme année de référence, nous allons calculer dans chaque cas les dépenses devant avoir été effectuées du début 1977 à fin 1993 et les dépenses futures à effectuer du début 1994 à fin 2007.

Les tableaux d'investissements sont sur les pages 59, 60 et 61 .

	19																			20												
	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	
BB																																
1601																																
1602																																
1603																																
1604																																
1605																																
1606																																
1607																																
1608																																
1609																																
1610																																
TOTAL																																

Tableau 3.2.1 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel-cas d'une durée normale de 9 ans.

	19																			20												
	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07	
BB																																
1601																																
1602																																
1603																																
1604																																
1605																																
1606																																
1607																																
1608																																
1609																																
1610																																
TOTAL																																

Tableau 3.2.2 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel-cas d'une durée réelle de 8 ans.

	19																			20											
	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
BB																															
1601																															
1602																															
1603																															
1604																															
1605																															
1606																															
1607																															
1608																															
1609																															
1610																															
TOTAL																															

Tableau 3.2.3 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel-cas d'une durée réelle de 7 ans.

	19																			20											
	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	00	01	02	03	04	05	06	07
BB																															
1601																															
1602																															
1603																															
1604																															
1605																															
1606																															
1607																															
1608																															
1609																															
1610																															
TOTAL																															

Tableau 3.2.4 : Investissements (millions de francs CFA) en révisions générales des moteurs Diesel-cas d'une durée réelle de 6 ans.

2.2 Sans problème de forte température eau :

investissements

Dans ce cas deux RC doivent être séparées par 9 ans. Le tableau d'investissement est le tableau 3.2.1 .

Les dépenses passées auraient été :

$$I_{9e} = 150 * (1,07)^2 + 200 * (1,07)^5 + 150 * (1,07)^8 = 709,973$$

$$I_{9e} = 709,973 \text{ millions de FCFA .}$$

Les dépenses futures seront :

$$I_{9f} = 150/(1,07) + 200/(1,07)^4 + 150/(1,07)^7$$

$$I_{9f} = 386,178 \text{ millions de FCFA .}$$

2.3 Avec problème d'élévation de température-

durée de vie réelle égale à 8 ans :

investissements

le tableau d'investissements correspondant est le tableau 3.2.2 .

Dépenses passées :

$$I_{8e} = 150 * (1,07)^1 + 150 * (1,07)^3 + 200 * (1,07)^6 + 150 * (1,07)^9$$

$$I_{8e} = 920,171 \text{ millions de FCFA .}$$

Dépenses futures :

$$I_{8f} = 200/(1,07)^2 + 150/(1,07)^5 + 150/(1,07)^7 + 200/(1,07)^{10} + 150/(1,07)^{13}$$

$$I_{8f} = 538,963 \text{ millions de FCFA .}$$

Ecart par rapport à la situation normale :

$$DI_{89e} = 920,171 - 709,973 = 210,198 \text{ millions de FCFA .}$$

$$DI_{89f} = 538,963 - 386,178 = 152,785 \text{ millions de FCFA .}$$

Ainsi dans le cas d'une réduction de la durée de vie de 1 an, les dépenses passées ont augmenté de 210,198 millions alors que les dépenses futures augmenteront de 152,785 millions par rapport à la situation normale.

2.4 Avec problème d'élévation de température-
durée de vie réelle égale à 7 ans
investissements

Les investissements sont présentés sur le tableau 3.2.3.

Dépenses passées :

$$I_{7e} = 150 * (1,07)^3 + 150 * (1,07)^4 + 200 * (1,07)^7 + 150 * (1,07)^{10}$$

$$I_{7e} = 996,605 \text{ millions de FCFA .}$$

Dépenses futures :

$$I_{7f} = 200/(1,07)^0 + 150/(1,07)^3 + 150/(1,07)^4 + 200/(1,07)^7 + 150/(1,07)^{10}$$

$$I_{7f} = 637,681 \text{ millions de FCFA .}$$

Ecarts par rapport à la situation normale :

$$DI_{79e} = 996,605 - 709,973 = 286,632 \text{ millions de FCFA .}$$

$$DI_{79f} = 637,681 - 386,178 = 251,503 \text{ millions de FCFA .}$$

Ainsi pour une durée de vie réduite de 2 ans, les dépenses passées ont augmenté de 286,632 millions alors que les dépenses futures augmenteront de 251,503 millions par rapport à la situation normale.

2.5 Avec problème d'élévation de température-
durée de vie réelle égale à 6 ans
investissements

Les investissements sont exposés au tableau 3.2.4 .

Dépenses passées :

$$I_{6e} = 200 * (1,07)^2 + 300 * (1,07)^5 + 200 * (1,07)^8 + 150 * (1,07)^{11}$$

$$I_{6e} = 1,309111 \text{ milliards de FCFA .}$$

Dépenses futures :

$$I_{6f} = 300/(1,07)^1 + 200/(1,07)^4 + 300/(1,07)^7 + 200/(1,07)^{10} + 150/(1,07)^{13}$$

$$I_{6f} = 783,692 \text{ millions de FCFA .}$$

Ecarts par rapport à la situation normale :

$$DI_{69e} = 1309,111 - 709,973 = 599,138 \text{ millions de FCFA .}$$

$$DI_{69f} = 783,692 - 386,178 = 532,189 \text{ millions de FCFA .}$$

Donc pour une durée de vie réduite de 3 ans, les dépenses passées ont augmenté de 599,138 millions alors que les dépenses futures augmenteront de 532,189 millions par rapport à la situation normale.

2.6 Avec problème d'élévation de température-
durée de vie réelle égale à 5 ans
investissements

Le tableau 3.2.5 montre les investissements pour cette situation .

Dépenses passées :

$$I_{5e} = 150 * (1,07)^1 + 150 * (1,07)^2 + 200 * (1,07)^4 + 150 * (1,07)^6$$

$$+ 150 \cdot (1,07)^7 + 200 \cdot (1,07)^9 + 150 \cdot (1,07)^{12}$$

$$I_{5e} = 1,765892 \text{ milliards de FCFA .}$$

Dépenses futures :

$$I_{5f} = 200/(1,07)^1 + 150/(1,07)^3 + 150/(1,07)^4 + 200/(1,07)^6 + 150/(1,07)^9$$

$$I_{5f} = 638,653 \text{ millions de FCFA .}$$

Ecart par rapport à la situation normale :

$$DI_{59e} = 1765,892 - 709,973 = 1,055919 \text{ milliards de FCFA .}$$

$$DI_{59f} = 638,653 - 386,178 = 252,475 \text{ millions de FCFA .}$$

Donc pour une diminution de la durée de vie égale 4 ans, les dépenses passées ont augmenté de 1,055919 milliards alors que les dépenses futures augmenteront de 252,475 millions par rapport à la situation normale.

Les pertes précédemment évaluées sont consignées dans le tableau suivant :

DUREE DE VIE REELLE	8 ans	7 ans	6 ans	5 ans
PERTES PASSEES (millions)	210,198	286,632	599,138	1.055,919
PERTES FUTURES (millions)	152,785	251,503	532,189	252,475

Une manière d'identifier, parmi les différents cas examinés, la durée la plus proche de la durée de vie réelle aurait été de comparer les dépenses passées précédemment estimées aux dépenses

enregistrées dans le Journal Comptable de la S.N.C.S ; mais ce travail est fastidieux et requiert plus de temps que nous n'en disposons .

Cependant, signalons que les calculs de dépenses passées effectués visent essentiellement à montrer à la S.N.C.S la perte, déjà subie, due au problème d'élevation de température. Ces dépenses passées ne sont pas utiles à la prise de décision concernant les investissements nécessaires pour remédier au problème posé.

2.7 Coût au delà duquel la S.N.C.S renoncera à la résolution du problème de forte température de l'eau

Le coût que nous retenons ici suppose que l'investissement pour la résolution du problème d'élevation de température se fera en début 1994 .

Ce coût est égal à la perte future correspondant à chaque durée de vie. Sa valeur minimale est :

$$\text{COUT}_{\text{limite}} = 152,785 \text{ millions de FCFA .}$$

2.8 Conclusion sur l'étude financière

Cette étude sommaire nous a conduit à percevoir que la S.N.C.S a absolument intérêt à investir le plus tôt pour remédier au problème d'élevation de température pourvu que les dépenses nécessaires n'excèdent pas 152,785 millions de FCFA .

La S.N.C.S aura même intérêt à dépenser au delà de 152,785 millions si nous considérons les économies d'impôts .

SUGGESTIONS

Concernant l'eau de refroidissement, nous suggérons :

- que l'on évite, pour le moment, tant que cela est possible de prendre d'eau à Dakar, à Guinguinéo ou à Tamba Counda ;
- qu'il ne soit pas utilisé de produits chimiques pour abaisser les concentrations des constituants en excès ; ceci requiert du personnel qualifié et pourra s'avérer nuisible si les produits utilisés ne sont pas compatibles avec les produits recommandés par le constructeur ou suite à une erreur de dosage ;
- qu'il soit plutôt installer dans chacune des régions concernées (Dakar, Guinguinéo et Tamba counda) un module de distillation solaire de l'eau; c'est un procédé qui est entrain de se répandre dans le domaine de traitement des eaux à cause de son efficacité; il est peu coûteux, une fois l'installation effectuée, on n'a plus besoin de personnel qualifié; il ne présente pas de danger chimique pour les matériaux car il ne fait pas intervenir des produits chimiques .
- qu'une fois les teneurs abaissées, par distillation, dans les limites spécifiées par le constructeur, il soit utilisé le produit de la Catégorie 5 recommandé par celui-ci pour traiter l'eau ; on peut remarquer en lisant les caractéristiques des produits en annexe A2 que la Catégorie 5 ne requiert pas d'entretien fréquent du circuit de refroidissement et ne présente aucun risque de rejet toxique contrairement aux autres catégories.

Quant aux conditions atmosphériques, nous suggérons :

- que l'on suit les prévisions météorologiques pour que les jours où la température atmosphérique dans une région doit dépasser 35°C, il soit précisé au conducteur de rouler dans cette région à une vitesse inférieure à 1500 tr/min du moteur Diesel ;
- une intervention au niveau du ventilateur pour augmenter le débit d'air; pratiquement il faut multiplier le rapport de liaison entre l'arbre du moteur et l'axe du ventilateur, mais au paravent on devrait s'assurer que les hélices pourront supporter la nouvelle vitesse du ventilateur sans se casser; sinon il faudra procéder strictement au remplacement de ventilateur à condition d'effectuer une analyse économique préalable ;
- d'augmenter les surfaces d'échanges thermiques des radiateurs, soit en mettant d'autres éléments de radiateurs en série, soit en remplaçant partiellement ou entièrement les éléments de radiateurs existant par d'autres de surfaces thermiques plus importantes si une étude financière le permet ;
- d'informer le constructeur des BB 1600 sur le problème d'élévation de température et de prendre les dispositions requises pour qu'il en tienne compte dans le cas où la S.N.C.S voudra acquérir d'autres BB 1600 .

Enfin nous terminerons cette rubrique en insistant sur :

- les soins qui doivent être accordés aux composants des circuits de refroidissement lors des entretiens ;
- le fait qu'il est impératif, pour la S.N.C.S, de régler le

plus tôt possible le problème de la qualité de l'eau de refroidissement; les dépôts de tartres ne se manifesteront pas seulement au sein des BB 1600, mais s'étendront en fait à toutes les locomotives utilisées par la S.N.C.S et causeront donc d'énormes pertes financières qu'il faudra éviter dès à présent : il vaut mieux prévenir que guérir.

CONCLUSION

L'élévation excessive de température de l'eau de refroidissement HT, des moteurs Diesel des locomotives BB 1600 construites par SACM et ALSTHOM, et utilisées par la S.N.C.S, est responsable de détresses fréquemment observées en ligne pour ces locomotives. Ce problème qui a particulièrement retenu l'attention du service d'entretien de la S.N.C.S retrouve, à l'issue de cette étude, ses causes au sein de la mauvaise qualité de l'eau de refroidissement et des conditions atmosphériques très sévères pour l'efficacité du circuit de refroidissement.

L'enjeu financier, du problème étudié justifie qu'il devra faire l'objet des premières préoccupations de l'heure à la S.N.C.S et à travers, nous avons suggéré, des interventions :

- au niveau de l'eau par installation des modules de distillation solaire dans les régions d'eau d'appoint DAKAR, GUINGUINEO et TAMBA COUNDA ;
- au niveau du ventilateur pour une augmentation du débit d'air de refroidissement ;
- au niveau des éléments de radiateurs pour une augmentation des surfaces d'échanges thermiques .

Mais , en attendant les mesures précédentes, il serait moins nuisible de faire fonctionner les locomotives à des vitesses de moteur Diesel en dessous de 1500 tr/min dans les régions et les jours où la température atmosphérique prévue par la METEO doit excéder 35°C .

BIBLIOGRAPHIE

* Volet eau

- S.A.C.M, Manuel de conduite et d'entretien
- Souleymane NDIONG, Manuel de travaux pratiques d'Assainissement des eaux. E.P.T 1992-1993.
- Monique Tardat-Henry avec la collaboration de Jean-Paul Beaudry, Chimie Des Eaux. Le Griffon d'argile inc. 3022, chemin Sainte-Foy, Sainte-Foy QC G1X3V6, 1984.
- Jean Rodier, L'analyse de l'eau. 7^e édition, Bordas, Paris 1984.
- V. Alexéev, Analyse Qualitative, 4^e édition. Editions MIR, MOSCOU, 1980.
- V. Alexéev, Analyse Quantitative, 3^e édition. Editions MIR, MOSCOU, 1980.
- Degrémont, Memento Technique de l'Eau tome1, 9^e édition. Edition du Cinquantenaire, 1989.
- Degrémont, Memento Technique de l'Eau tome2, 9^e édition. Edition du Cinquantenaire, 1989.
- Tchobanoglons G. et E.D. Shroeder, Water Quality, Addison-Wesley Publishing Company, 1985 .
- Standard Methods for examination of Water and Waste Water, 16th edition, APHA. AWWA. WPCF, 1985 .

* Volet thermique

- R.Brun, Science et Technique du Moteur Diesel Industriel et de Transport tome1. Société des Editions Technip. 27 rue Ginoux 75737 Paris CEDEX 15, 1976.
- R.Brun, Science et Technique du Moteur Diesel Industriel et de Transport tome2, 2^e édition. Société des Editions Technip. 27 rue Ginoux 75737 Paris CEDEX 15, 1977.
- R.Brun, Science et Technique du Moteur Diesel Industriel et de Transport tome3, 4^e édition. Société des Editions Technip. 27 rue Ginoux 75737 Paris CEDEX 15, 1986.
- Roger Roudil, Moteurs Diesel. Dunod, Paris, 1970.
- B. Derreumaux, Moteur à Essence tome1. E.T.A.I, 96 rue de Paris 92100 Boulogne Billancourt France, 1991.
- B. Derreumaux, Moteur à Essence tome2. E.T.A.I, 96 rue de Paris 92100 Boulogne Billancourt France, 1991.
- R. Positello, La Vapeur d'Eau Industrielle , Technique et Documentation (Lavoisier), 1983 .

* Autres

- M. Bailleul, Notions de Matériels Roulant de Chemin de Fer, Editions Eyrolles, 1951 .

ANNEXES

ANNEXE A1

LISTE DES CLASSES DE MATERIAUX CONSTITUANT LES
CIRCUITS DE REFROIDISSEMENT DES BB 1600 ET
LEURS CONDUCTIVITES THERMIQUES

METAL	SYMBOLE CHIMIQUE	TEMPERATURE °C	CONDUCTIVITE THERMIQUE k (W/m.°K)
Aluminium	Al		
99 %		0	209,34
		100	207,014
99,75 %		0	229,111
		200	229,111
Cuivre		Cu	
commercial	20		372,16
électrolytique pur	0		395,42
	100		391,931
pur 99,98 %	0		386,116
	100		379,138
Fer	Fe		

acier 99,2 % Fe 0,2 % C		0	45,357
		100	45,357
armco		20	73,269
		100	67,454
fonte 1 % Ni		20	50,009
		100	49,428
fonte 3 % C		20	55,313
malléable, pure		0	59,313
		100	56,987
ALLIAGE	COMPOSITION %	TEMPERATURE °C	CONDUCTIVITE THERMIQUE k (W/m.°K)
Acier	0,1 C	0	59,313
		100	52,335
	0,2 C	20	50,009
	0,6 C	20	46,52
Bessemer	0,52 C; 0,34 Si	20	40,24
Alliage d' Aluminium	96 Al;1,8 Cu 0,9Fe;0,9 Cr 0,4 Si	20	104,67

Bronze	92 Al; 8 Cu	20	131,419
		100	143,049
	92 Al; 8 Mg	20	105,833
		100	123,278
	90 Cu; 10 Sn	20	41,868
	75 Cu; 25 Sn	20	25,586
	88 Cu; 10 Sn;	20	47,683
	2 Zn; 84 Cu; 6 Sn ; 9 Zn; 1Pb	20	58,15

ALLIAGE	COMPOSITION %	TEMPERATURE °C	CONDUCTIVITE THERMIQUE k (W/m. °K)
Laiton	90 Cu; 10 Zn	0	102,344
		100	117,344
	70 Cu; 30 Zn	0	105,833
		100	109,322
	67 Cu; 33 Zn	0	100,018
		100	106,996

	60 Cu; 40 Zn	0	105,833
		100	119,789
	61,5 Cu; 38,5Zn	20	79,084
		100	88,388
CAOUTCHOUC	TEMPERATURE °C	CONDUCTIVITE THERMIQUE k (W/m.°K)	
artificiel Buna	20	0,233	
artificiel Perbunan	20	0,291	
artificiel Thiocol	20	0,291	
dur (ébonite)	20	0,163	
dur normal	0	0,157	
	100	0,160	
mousse	20	0,037	
naturel	20	0,163	
spongieux vulcanisé, mou	20	0,055	

40 % caoutchouc	20	0,233
80 % caoutchouc	20	0,279
100 % caoutchouc	20	0,055

PRODUITS DE TRAITEMENT DE L'EAU HOMOLOGUES PAR LE
CONSTRUCTEUR ET ADRESSES DES FOURNISSEURS.

- Produits homologués par la SACM

- Classement des produits

Les produits placés sur le marché sont classés en 5 catégories.

Catégorie 1

- Poudre à base de chromates avec sels tampons.
- Bonne stabilité dans le temps, pas de contrôles fréquents si appoints d'eau limités.
- Le pH de ces complexes est de l'ordre de 8,8.
- Incompatible avec les antigels. Protection moyenne des alliages d'aluminium selon les conditions.
- Est susceptible de poser un problème de rejet toxique, (limite de rejet = 1 mg/l de chromate de sodium).
- Est interdit dans la MARINE si l'eau de refroidissement des Diesel est utilisée au réchauffage de bouilleurs destinés à la production d'eau potable.

Catégorie 2

- Liquide ou poudre à base de nitrite de sodium avec sels tampons (borates ou benzoates) plus inhibiteurs organiques.
- Compatible avec antigel (monoéthylène glycol pur).
- Insuffisant en présence d'aluminium selon les conditions.
- Contrôle facile. La présence d'air ou d'oxygène dans le circuit accroît la consommation des nitrites et nécessite une remise à niveau fréquente.

- La formulation liquide plus volumineuse que la poudre facilite la mise en solution rapide.
- Le pH de ces complexes est supérieur à 8,5 et peut atteindre des valeurs supérieures à 10.

Catégorie 3

- Même formulation que la catégorie 2 mais avec addition d'éthylène glycol jouant le rôle d'antigel. La concentration dépend de l'indice de protection. Nous demandons de limiter la concentration en éthylène glycol à 40 % pour ne pas trop augmenter les températures des parois (protection jusqu'à - 25° C).

La présence d'éthylène glycol-améliore la protection contre la corrosion et rend le produit plus stable.

Catégorie 4

- Complexe de même type que la catégorie 3 mais avec addition de silicates. Le pH est généralement inférieur à 9 (8,2 à 8,7). Le comportement vis-à-vis de l'aluminium est assez bon. La présence de silicates a pour effet de faire apparaître des boues qu'il sera nécessaire d'éliminer fréquemment pour éviter l'obstruction des circuits.
- Ces complexes tendent à être remplacés par ceux de la catégorie 5.

Catégorie 5

- Complexes nouveaux récemment mis sur le marché pour répondre aux exigences de certains pays interdisant les rejets de nitrites. Ces complexes contiennent des inhibiteurs organiques et minéraux (du type phosphate-amines et molybdate par exemple).
- Ils ne contiennent pas de chromates ou de nitrites, ni aucun sel classé polluant ou dangereux.
- Ils sont compatibles avec les antigels du type éthylène glycol.
- Ils sont spécialement recommandés pour les circuits scellés contenant des alliages d'aluminium.

Catégorie 6

- Complexe contenant peu ou pas d'inhibiteur minéral et contenant des glycols et polyglycols et des inhibiteurs organiques.

- Ils peuvent être livrés prêts à l'emploi (avec addition d'eau adoucie ou déminéralisée) dans les pays où les eaux saumâtres sont difficilement utilisables. (Cas des zones désertiques).
- Le dosage doit être supérieur à 20 % (protection minimum jusqu'à - 10° C) mais ne doit pas dépasser 40 % (protection -25° C); pour les protections contre le gel plus efficaces, consulter la SACM.
- Ils ne contiennent pas de sels classés polluants ou dangereux (chromates, nitrites...).
- Ils sont homologués pour les moteurs allégés comportant un nombre important de pièces en alliage d'aluminium.

Nota :

- 1 - La présence de glycol ou polyglycol en grande quantité constitue à la fois une protection contre le gel et une protection anti-corrosion de type film-surface.
- 2 - Dans le cas de produit prêt à l'emploi, la dose d'éthylène-glycol atteint 45 %. Bien que la présence d'éthylène-glycol diminue sensiblement, le coefficient d'échange liquide-paroi, la diminution de viscosité compense en partie cet effet par l'accroissement de la vitesse de circulation. Il faut néanmoins s'attendre à une élévation de température de paroi chaude de 7 à 8° pour un dosage aussi élevé. Dans le cas de moteur dont la pme est élevée (utilisation sévère) on peut être amené à limiter la puissance par un détarage. Il est important dans ce cas de nous consulter.

- Homologation des produits :

La SACM a homologué un certain nombre de produits dont elle a l'expérience. Ils sont donnés plus loin § 6.

- Limitations

L'utilisation, si nécessaire, de produits similaires est admise sous réserve de répondre intégralement aux exigences du présent document et avoir obtenu l'avis favorable de SACM à laquelle toutes justifications utiles doivent être fournies.

A défaut d'expérimentation dynamique possible sur moteur en fonctionnement, l'avis favorable émis par SACM n'engage pas sa responsabilité.

Sauf convention contraire stipulée en temps utile, les produits homologués sont seuls utilisables en période de garantie des moteurs.

- TABLEAU DES PRODUITS ET FOURNISSEURS HOMOLOGUES

Fournisseurs	Catégorie des produits					
	1	2	3	4	5	6
DUCLITE INTERNATIONAL	RD8 RD8-M (P)	RD11 ou RD11-M (P) RD11-L (A et B) (*)	RDH (L)		RD 25 (L) RD 24 (P)	RD-gel (O) DIAGEL DIAMIGEL (G) (L)
NALCO ou NALFLOC	NALFLEET 9-038 ou NALCO 38 (P)	NALFLEET 19-121(P) ou 19-131 C (L) ou NALCO 39 (P ou L)	NALCOGEL 7WT93L	NALCOOL 2000 ou NALFLEET 9-111		NALCO 41 L
JEFFA						CR 80
BURMAH CASTROL		SOLVEX WT2 (L) WT4 (P)				
COFRAN			REFRIGEL (O)			
ERPAC	ERPA- CHROME CC et CM	ERPON CNM			SOLERPON TCN	SOLERPON CNS et MDI
DREW AMEROID	DEWTL (P)	DEWT NC (P) MAXIGARD (L)				
PEROLIN MARINE		FORMET 326				INHIBITIN
DEGREMONT	KEMAZUR 1603	KEMAZUR 1618	KEMAZUR 1525			
GANLEN SYBRON		GAMCOR NB			GAMCOR 57M	

Nota : (P) = poudre (L) = liquide EG = éthylène glycol
(O) : répond à la spécification DCEA 515 symbole XS 79
(*) = produits à introduire séparément dans l'eau
(G) : répond à la recommandation F3-85 du GPEM/CP pour les
liquides de refroidissement antigels d'usage général pour
moteurs thermiques.

Adresse des fournisseurs

DUOLITE INTERNATIONAL
La Tour de Lyon
185, Rue de Bercy
75574 PARIS Cédex 12
Tél. (1) 40.02.54.00
Tx. 214100 DUOLI F

NALCO FRANCE S.à.r.l.
Boîte Postale N° 179
70313 MAUREPAS Cédex
Tél. (3) 051.55.54
Tx. NALCOPA 696813 F

SOCIETE JEFFA
40-42, rue de Seine
Zone Industrielle
92700 COLOMBES
Tél. (1) 242.87.95

BURNAH FRANCE
Boîte Postale N° 9
70230 LE PECQ

COFRAN
ZI de Chef de Baie
Boîte Postale N° 163
17001 LA ROCHELLE Cédex

ERPAC
65, Rue des Carpeaux
59290 WASQUEHAL
Tél. 20.26.95.05
Tx. ERPAC 132658 F

DREW AMEROID FRANCE
66, Boulevard Notre-Dame
13006 MARSEILLE

PEROLIN MARINE CIE Ltd
BRIMSCOMBE MILLS STROUD
CLOS GL5 2 SA
Angleterre
Tx. 43573 PERCOR G

DEGREMONT
183, Av. du 18 Juin 1940
92503 RUEIL-MALNAISON Cédex

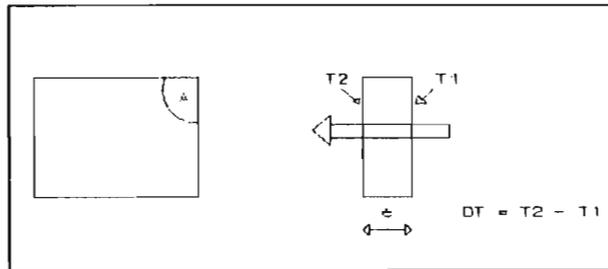
SYBRON GAMLEN
GAMLEN EUROPE S.A.
62-70 Rue Yvan Tourgueneff
78380 BOUGIVAL
Tél. 39.13.92.34
Tx. 695355 F

CALCULS THERMIQUES DETAILLES

A4 - 1 Equivalence 1 mm d'épaisseur de tartres
et X mm d'épaisseur de matériau

- conductivité thermique tartres : voisin de $k_t = 2,3 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$;
- considérons matériau = Aluminium : $k_a = 207,014 \text{ W/m.}^\circ\text{K}$;
- $k_t / k_a = 1/90$; donc k_t est 90 fois plus petite que k_a .
- La formule de conduction thermique s'écrit :

$$Q = -(k * A * DT) / e$$



- soit Q_a l'énergie que laisse passer une épaisseur e_a d'Al pour une variation de température DT ;
- quelle est l'épaisseur e_t de tartres requise pour pouvoir évacuer la même quantité d'énergie Q_a pour la même variation de température DT ?

$$Q_a = -(k_t * A * DT) / e_t \quad \text{pour les tartres ;}$$

$$Q_a = -(k_a * A * DT) / e_a \quad \text{pour l'Al .}$$

- Donc $e_t = (k_t / k_a) * e_a$; $e_t = e_a / 90$; alors pour $e_a = 90 \text{ mm}$ on a : $e_t = 1 \text{ mm}$; il suffit ainsi de 1 mm d'épaisseur de tartres pour opposer la même résistance thermique que 90 mm d'épaisseur d'Al .

C'est cette équivalence qui est traduite dans le tableau 2.1.1 lorsque nous écrivons " une couche de tannes de 1 mm d'épaisseur équivaut à une paroi de matériau de X mm "; ici matériau = Al et donc $X = 90$.

A4 - 2 Variations des températures maximales
du cycle de SABATHE versus variations
de la température atmosphérique

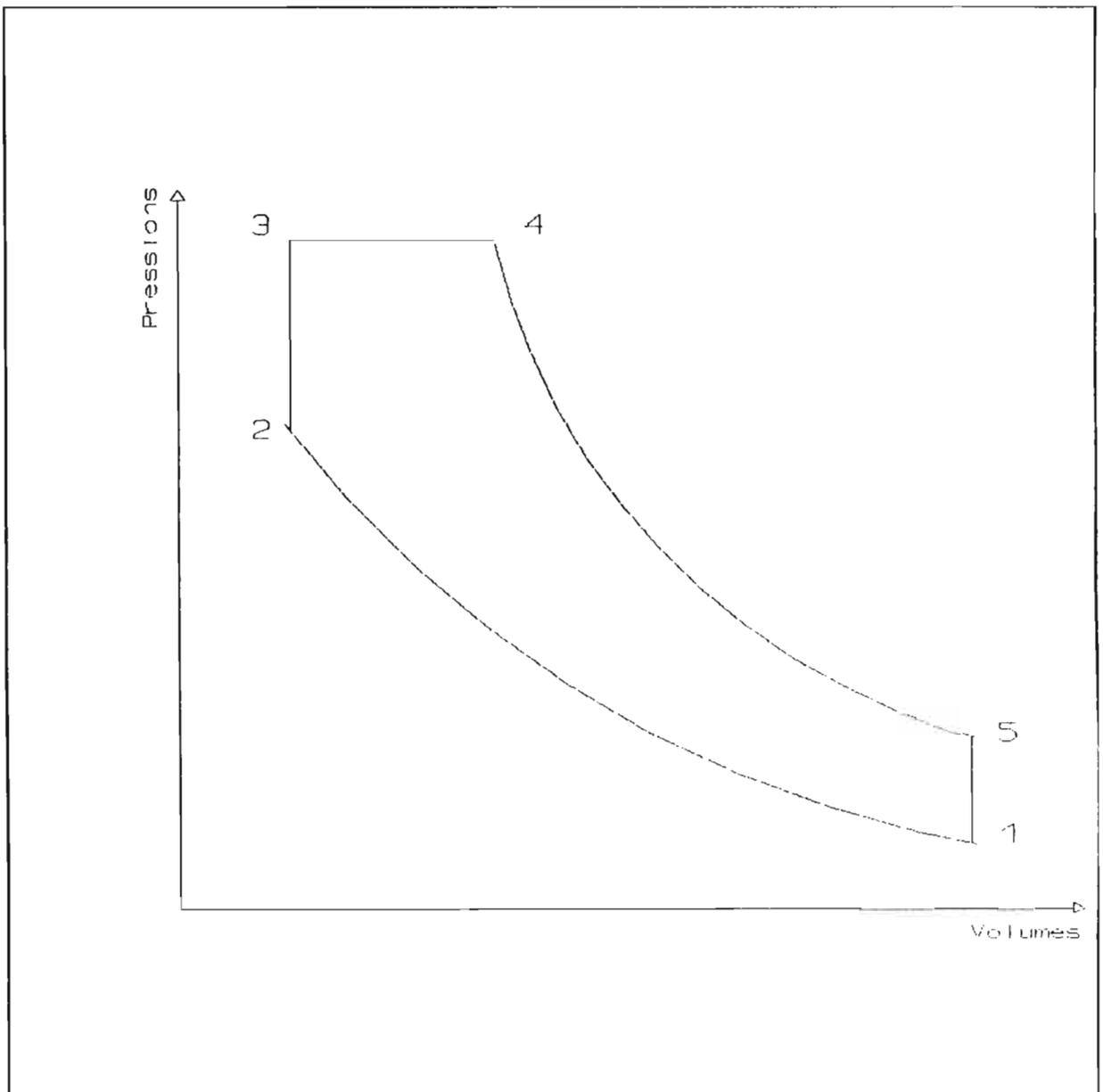


Figure 2.1.2 : Cycle thermodynamique équivalent des moteurs Diesel : cycle de SABATHE .

Transformations :

- 1 - 2 : compression adiabatique;
- 2 - 3 : combustion à volume constant;
- 3 - 4 : combustion à pression constante
- 4 - 5 : détente adiabatique

Paramètres caractéristiques fixés :

- Rapport de compression volumétrique $e = V_1 / V_2$;
- Rapport massique air / combustible $x = m_a / m_c$;
- Fraction de la masse de combustible brûlée à volume constant z .
- Coefficient de compression adiabatique de l'air n ;
- Coefficient de détente adiabatique des gaz de combustion soit d ;
- Chaleur massique du mélange homogène air-combustible à volume constant c_v ;
- Chaleur massique du mélange homogène air-combustible à pression constante c_p ;
- Rapport $R = c_p / c_v$;
- Constante massique d'état de l'air R^*_a ;
- Masse volumique de l'air m_{va}
- Pouvoir calorifique inférieur du combustible H ;

compression 1-2

* $T_2 = T_1 * (e)^{n-1}$; $DT_2 = (e)^{n-1} * DT_1$ où D = variation

combustion à volume constant 2-3

- Quantité de chaleur libérée durant 2-3 : $Q'_1 = z * m_c * H$;

- pour un mélange homogène air-combustible :

$$Q'_1 = (m_a + m_c) * c_v * DT_{23} = (1+x) * m_c * c_v * DT_{23} \quad ; \text{ donc}$$

$$DT_{23} = (z * H) / (1+x) * c_v .$$

$$* T_3 = T_2 + DT_{23} = T_1 * (e)^{n-1} + (z * H) / (1+x) * c_v ;$$

$$DT_3 = (e)^{n-1} * DT_1 .$$

combustion à pression constante 3-4

- Quantité de chaleur libérée pendant 3-4 : $Q''_1 = (1-z) * m_c * H$

- pour un mélange homogène air-combustible :

$$Q''_1 = (1+x) * m_c * c_p * DT_{34} \quad ; \text{ donc } DT_{34} = (1-z) * H / (1+x) * c_p$$

$$* T_4 = T_3 + DT_{34} = T_1 * (e)^{n-1} + [(z * H) / (1+x) * c_v]$$

$$+ [(1-z) * H / (1+x) * c_p]$$

$$DT_4 = (e)^{n-1} * DT_1$$

détente adiabatique 4-5

$$* T_5 = T_4 * (e' / e)^{d-1} \quad \text{où}$$

$$e' = T_4 / T_3 = 1 + (1-z) * H / [(1+x) * c_p * (e)^{n-1} * T_1 + z * H * R]$$

Considérons $e' = \text{constante} = e'_{\text{moyen}}$ lorsque T_1 varie entre les limites de notre étude; alors :

$$DT_5 = DT_4 * (e' / e)^{d-1} = (e)^{n-d} * (e')^{d-1} * DT_1 .$$

ANNEXE A5

Analyse de l'eau : références des méthodes et
 précautions - précautions
 sur les échantillons -
 formules de calculs .

A5 - 1 Références des méthodes et précautions

- Monique Tardat-Henry avec la collaboration de Jean-Paul Beaudry, Chimie Des Eaux. Le Griffon d'argile inc. 3022, chemin Sainte-Foy, Sainte-Foy QC G1X3V6, 1984.
- Jean Rodier, L'analyse de l'eau. 7^e édition, Bordas, Paris 1984. Pages 193 ; 504.

A5 - 2 Précautions sur les échantillons selon
 la nature de l'analyse

ANALYSE	CONTENANT	VOLUME REQUIS (ml)	PRECAUTION	DELAI MAXIMAL
PH	P	100	mesurer sur place ou réf 4°C	immédiatem ent 6 heures
Dureté	P , V	200	réf.4°C	7 jours
Chlorures	P , V	100	aucune	7 jours

Sulfates	P , V	100	réf.4°C	7 jours
Alcalinité	P	100	réf.4°C	24 heures

P :plastique ; V :verre ; réf.4°C :réfrigération à 4°C .

A5 - 3 Formules de calculs

- V : volume d'échantillon (ml) ;
- A : volume, de la solution de dosage, nécessaire pour doser le V échantillon (ml)

Dureté totale

méthode à l'EDTA :

- détermination de la correction B par dosage de l'eau distillée avec une solution d'EDTA 0,02 éq/l en présence d'indicateur Net;
- dosage de V échantillon, avec la solution d'EDTA, en présence d'indicateur Net : on obtient A ;

$$\text{Dureté totale} = (A-B) * 1000 / V \quad \text{mg/l de CaCO}_3$$

$$1 \text{ degré français} = 10 \text{ mg/l de CaCO}_3 ; \text{ d'où}$$

Dureté totale en degré français .

[NaCl]

méthode de Mohr :

- détermination de la correction B par dosage de l'eau distillée, avec une solution de AgNO₃ 0,015 éq/l, en présence de

l'indicateur K_2CrO_4 ;

- dosage de V échantillon, avec la solution de $AgNO_3$, en présence de K_2CrO_4 : lecture de A ;

$$[Cl^-] = 0,015 * (A-B) / V \quad \text{éq/l} ;$$

$$[NaCl] = 0,015 * (A-B) * 58500 / V \quad \text{mg/l} .$$

Dureté Calcique

méthode à l'EDTA :

- détermination de la correction B par dosage de l'eau distillée, avec une solution d'EDTA 0,02 éq/l , en présence de NaOH et d'indicateur murexide ;

- dosage de V échantillon, avec la solution d'EDTA, en présence de NaOH et d'indicateur murexide ;

$$\text{Dureté Calcique} = (A-B) * 20 / V \quad \text{még/l} .$$



méthode Turbidimétrique :

- établissement d'une courbe standard $[SO_4^{2-}]$ (mg/l) versus absorbance;

- mesure de l'absorbance de l'échantillons avec le Turbidimètre;

- déduction de $[SO_4^{2-}]$ (mg/l) à partir de la courbe standard ;

l'équation de la courbe que nous avons utilisée est :

$$[SO_4^{2-}] \text{ (mg/l)} = 111,11 * \text{Absorbance} + 3,11 .$$

$$[SO_4^{2-}] \text{ (még/l)} = 0,021 * [SO_4^{2-}] \text{ (mg/l)} .$$

Cations d'acides forts

méthode :

- chauffage et agitation de V échantillon en présence de la résine ;
- filtrage de V échantillon avec papier filtre ;
- dosage de V échantillon, avec une solution de NaOH 0,019 éq/l, en présence de l'indicateur Mixte : lecture de A ;

Concentration en cations d'acides forts = $A * 19 / V$ méq/l .

Alcalinité totale (TAC)

méthode :

- dosage de V échantillon, avec de l'HCl 0,02 éq/l, en présence de l'indicateur Mixte : on lit A ;

TAC = $A * 20 / V$ méq/l .

Alcalinité à la Phénolphtaléine (P)

méthode :

- dosage de V échantillon, avec de l'HCl 0,02 éq/l, en présence de l'indicateur Phénolphtaléine : lecture de A ;

P = $A * 20 / V$ méq/l .