

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE  
PRESENTE A

L'UNIVERSITE DU QUEBEC A CHICOUTIMI  
COMME EXIGENCE PARTIELLE  
DE LA MAITRISE EN RESSOURCES ET SYSTEMES

PAR  
JEAN-ROBERT CLAVEAU  
B. ING.

SIMULATION DYNAMIQUE D'UNE BOUILLOIRE  
ELECTRIQUE DU CENTRE ENERGETIQUE VAUDREUIL

NOVEMBRE 1987



### Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, **l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the **Université du Québec à Chicoutimi (UQAC)** is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

## RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une simulation dynamique sur ordinateur de réponses d'une bouilloire électrique soumise à des variations de conditions opératoires. Le travail de simulation repose sur l'élaboration d'une relation qui fournit la puissance requise à l'évaporation et qui a été trouvée dans des conditions d'opération données.

Le contenu de ce mémoire se divise en trois grandes sections. La première décrit brièvement une bouilloire à électrodes immergées et son importance dans le procédé SÉCAL. Une partie plus substantielle porte sur la description des essais expérimentaux ayant permis de développer l'équation de base, suivie du développement de tous les éléments composant le modèle théorique. Ainsi le lecteur sera amené à prendre connaissance d'une définition géométrique de la bouilloire, des essais expérimentaux, des hypothèses simplificatrices du modèle, du développement des équations et de la méthode de résolution. Finalement, la partie "Simulations et discussion" présente les résultats des simulations effectuées. L'étude portera sur les variations brusques (échelon) des quatre (4) principaux paramètres de contrôle des bouilloires électriques lesquels ont permis de conclure que le contrôle du débit d'eau d'alimentation (donc du niveau d'immersion des électrodes) serait la meilleure façon de contrôler la production de vapeur de la bouilloire.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce travail est rendue possible par l'apport d'un certain nombre de personnes. Je tiens à remercier mon directeur, M. A. Charette de même que mon co-directeur M. R. T. Bui pour leurs suggestions ainsi que pour toute l'attention qu'ils ont portée à ce travail.

Je tiens à remercier MM Maurice Lapointe, Conrad Tremblay et Alain Simard de SÉCAL, usine de production d'eau, d'air et de vapeur qui m'ont beaucoup aidé lors de la recherche des données d'opération et de la documentation des manufacturiers et par leurs judicieuses suggestions.

TABLE DES MATIÈRES

	PAGE
Résumé .....	ii
Remerciements .....	iii
Table des matières .....	iv
Liste des tableaux et photographie .....	vii
Liste des figures .....	viii
Liste des annexes .....	x
Nomenclature .....	xi
Localisation physique des principales variables .....	xvii
Introduction .....	1
1. Travaux antérieurs .....	3
2. Description d'une bouilloire à électrodes immergées .....	4
3. Le modèle .....	8
3.1 Hypothèses simplificatrices .....	8
3.2 Les équations .....	9
3.2.1 Équations de la puissance: essais expérimentaux ...	10
3.2.2 Équation du bilan de masse .....	16
3.2.3 Équation du bilan d'énergie .....	19
3.2.4 Autres équations .....	26

TABLES DES MATIÈRES (suite)

	PAGE
3.3 Méthode de résolution .....	29
3.3.1 Procédure générale .....	29
3.3.2 Procédure de calcul de l'équilibre thermodynamique pour une tranche de temps .....	33
4. Simulations et discussion .....	36
4.1 Détermination du pas de temps .....	37
4.2 Simulation du cas de base .....	37
4.3 Simulation de variations brusques des trois principaux paramètres de contrôle de l'état de la bouilloire .....	42
4.3.1 Simulation de la variation brusque du débit de l'eau d'alimentation .....	42
4.3.2 Simulation de la variation brusque de la conducti- vité de l'eau d'alimentation .....	45
4.3.3 Essai de la variation brusque de la pression d'o- pération du réseau .....	47
4.3.4 Essai d'une chambre de compensation .....	49

TABLES DES MATIÈRES (suite)

	PAGE
Conclusions	
A. Sur les essais .....	50
B. Sur la modélisation .....	51
Bibliographie .....	53
Annexes .....	56

LISTE DES TABLEAUX ET PHOTOGRAPHIE

	PAGE
TABLEAU 1 : Données typiques utilisées pour les essais de simulation du modèle mathématique de la bouilloire.....	40
TABLEAU 2 : Formulations mathématiques des tables de vapeur .....	62
TABLEAU 3 : Données recueillies à l'usine .....	97
TABLEAU 4 : Données typiques de l'opération de bouilloires électriques .....	100
PHOTO 1 : Modèle 1:32 d'un ensemble électrode-cathode simple utilisé pour les essais 1, 3 et 4 .....	84



LISTE DES FIGURES

	PAGE
FIGURE 1: Localisation physique des principales variables...	xvii
FIGURE 2: Chaudière à électrodes immergées.....	6
FIGURE 3: Principe d'opération de la bouilloire à électrodes immergées.....	7
FIGURE 4: Élément dans l'équation de la puissance.....	10
FIGURE 5: Volume de contrôle pour le bilan de masse autour du réservoir de la bouilloire.....	16
FIGURE 6: Schéma de principe du bilan massique.....	18
FIGURE 7: Volume de contrôle pour le bilan d'énergie autour du réservoir de la bouilloire.....	19
FIGURE 8: Vue des trois (3) blocs principaux de programma- tion.....	31
FIGURE 9: Algorithme pour la sous-routine de calculs thermo- dynamiques pour la bouilloire.....	35
FIGURE 10: Validation du programme de simulation par l'essai des données typiques de fonctionnement d'une bouil- loire électrique .....	41
FIGURE 11: Variation négative du débit d'eau d'alimentation..	44
FIGURE 12: Variation positive de la conductivité de l'eau d'alimentation.....	46

LISTE DES FIGURES (suite)

	PAGE
FIGURE 13: Variation positive de la pression du réseau .....	48
FIGURE 14: Utilisation de la sous-routine de calcul des variables de contrôle dans le programme principal..	59
FIGURE 15: Logigramme de la sous-routine VACON de calcul des variables de contrôle .....	60
FIGURE 16: Logigramme de la sous-routine TVAP de calcul de la vapeur saturée .....	64
FIGURE 17: Logigramme de la sous-routine de calcul de l'eau comprimée .....	65
FIGURE 18: Logigramme de la sous-routine de modélisation d'une bouilloire électrique .....	68
FIGURE 19: Programme complet (dynamique) .....	73
FIGURE 20: Programme de traçage graphique des résultats .....	79
FIGURE 21: Montage expérimental du modèle réduit .....	83
FIGURE 22: Courbe de la variation du courant en fonc- tion du niveau immergé réel d'eau .....	87
FIGURE 23: Courbe de la variation du courant en fonction de la distance séparant deux électrodes planes .....	88
FIGURE 24: Courbe de la variation de la conductivité en fonc- tion du courant tiré .....	90
FIGURE 25: Courbe de la variation de la conductivité en fonc- tion de la température (sln saline) .....	91
FIGURE 26: Courbe de la variation de la conductivité en fonc- tion de la température (eau de saignée) .....	92

LISTE DES ANNEXES

	PAGE
ANNEXE 1: Sous-routine de calcul des variables de contrôle ..	56
ANNEXE 2: Sous-routine de calcul des tables de vapeur et de liquide comprimé .....	61
ANNEXE 3: Sous-routine de modélisation d'une bouilloire électrique .....	66
ANNEXE 4: Utilisation du programme .....	72
ANNEXE 5: Essais sur le modèle réduit d'une bouilloire électrique .....	82
ANNEXE 6: Données typiques d'une bouilloire électrique .....	96

NOMENCLATURE UTILISÉE

1. Caractéristiques thermodynamiques et physiques

VARIABLES	DESCRIPTION	IDENTIFICATION UTILISÉE DANS LE PROGRAMME D'ORDINATEUR	UNITÉS
A	Energie interne de la bouilloire à cette tranche de temps.	DELAT	
A/t	Energie interne de la bouilloire à la tranche de temps précédente.	DELATT	
$h_e$	Enthalpie de l'eau d'alimentation	ENTEA	BTU/lb
$h_l$	Enthalpie du liquide de la bouilloire	ENTLI	BTU/lb
$h_v$	Enthalpie de la vapeur	ENTVA	BTU/lb
$\bar{\tau}_v$	Temps moyen que prend la vapeur dans la cathode	TEMV	Heure
$u_l$	Énergie interne du liquide de la bouilloire	UL	BTU/lb
$u_v$	Énergie interne de la vapeur	UV	BTU/lb
$v_e$	Vitesse d'entrée de la vapeur	VIEA	po/s
$v_{il}$	Vitesse du liquide de la bouilloire	VIL	po/s
$v_{ivc}$	Vitesse de la vapeur dans la bouilloire	VIVC	po/s
$v_p$	Vitesse de sortie de l'eau de purge	VIPU	po/s
$v_v$	Vitesse de sortie de la vapeur	VIVA	po/s
$v_{vi}$	Vitesse de la vapeur entre les électrodes et la cathode	VIVI	po/s
$v'_e$	Volume spécifique de l'eau d'alimentation	VSPEA	pi <sup>3</sup> /lbm
$v'_l$	Volume spécifique du liquide de la bouilloire	VSPLI	po <sup>3</sup> /lb
$v'_v$	Volume spécifique de la vapeur	VSPLA	po <sup>3</sup> /lb

1. Caractéristiques thermodynamiques et physiques (suite)

VARIABLES	DESCRIPTION	IDENTIFICATION UTILISÉE DANS LE PROGRAMME D'ORDINATEUR	UNITÉS
$\rho_{CaCO_3}$	Densité du liquide de la bouilloire	CONCA	lbm/pi <sup>3</sup>
$\rho_e$	Densité de l'eau d'alimentation	DENEA	lbm/pi <sup>3</sup>
$\sigma_i$	Conductivité électrique du liquide de la bouilloire	COND	$\mu\text{mho/cm}$
$\sigma_1$	Conductivité corrigée en fonction de la température et de la vapeur	CONDI	$\mu\text{mho/cm}$

2. Caractéristiques de la bouilloire

VARIABLES	DESCRIPTION	IDENTIFICATION UTILISÉE DANS LE PROGRAMME D'ORDINATEUR	UNITÉS
$A_e$	Aire du tuyau d'entrée d'eau	AE	po <sup>2</sup>
$A_p$	Aire de l'intérieur du tuyau de sortie de purge	AP	po <sup>2</sup>
$A_v$	Aire de l'intérieur du tuyau de sortie de vapeur	AV	po <sup>2</sup>
$A_{1v}$	Aire moyenne du haut de la bouilloire (où il y a de la vapeur)	AIV	po <sup>2</sup>
H	Niveau de liquide dans la bouilloire	H	po
$H_{tot}$	Hauteur totale de la bouilloire	HTOT	po
$\phi_c$	Diamètre de la cathode	DIC	po
$\phi_e$	Diamètre de l'électrode	DIA	po

3. Tranche de temps

VARIABLES	DESCRIPTION	IDENTIFICATION UTILISÉE DANS LE PROGRAMME D'ORDINATEUR	UNITÉS
$C_i/t$	Concentration de liquide dans la bouilloire de la tranche de temps précédente	CIT	mg/l
$H/t$	Hauteur visible de liquide de la tranche de temps précédente.	HT	po
$m_{ie}/t$	Quantité de liquide contenu dans la bouilloire à la tranche de temps précédente	MILT	lbm
$\dot{m}_p/t$	Débit de purge de la tranche de temps précédente.	DEBPUT	lbm/hr
$\dot{m}_e/t$	Débit d'eau d'alimentation de la tranche de temps précédente.	DEBEAT	lbm/hr
$\dot{m}_v/t$	Débit de vapeur de la tranche de temps précédente.	DEVAT	lbm/hr
$t$	Temps actuel	TEMP	°F
$\Delta t$	Durée d'une tranche de temps	DELT	
$\sigma_i/t$	Conductivité du liquide dans la bouilloire à la tranche de temps précédente	CONT	$\mu\text{moh/cm}$

4. Variables de contrôle

VARIABLES	DESCRIPTION	IDENTIFICATION UTILISÉE DANS LE PROGRAMME D'ORDINATEUR	UNITÉS
$C_e$	Concentration de l'eau d'alimentation	CONCE	mg/l
$m_e$	Quantité d'eau d'alimentation entrant pour une tranche de temps.	ME	l <sub>m</sub>
$\dot{m}_e$	Débit d'eau d'alimentation	DEBEA	l <sub>m</sub> /hr
$\dot{m}_p$	Débit d'eau de purge	DEBPU	l <sub>m</sub> /hr
$P_r$	Pression du réseau	PRESR	psig
$\sigma_e$	Conductivité électrique de l'eau d'alimentation	CONEA	$\mu$ mho/cm

5. Variables d'état

VARIABLES	DESCRIPTION	IDENTIFICATION UTILISÉE DANS LE PROGRAMME D'ORDINATEUR	UNITÉS
$C_i$	Concentration du liquide dans la bouilloire	CONC1	mg/l
$m_{il}$	Quantité de liquide contenu dans la bouilloire	MIL	lbm
$\dot{m}_{il}$	Variation de la quantité de liquide dans la bouilloire	DEBIL	lbm/hr
$m_{itr}$	Quantité de liquide contenu dans la cathode	MITR	lbm
$m_{iv}$	Quantité de vapeur contenue dans le haut de la bouilloire	MIV	lbm
$m_v$	Quantité de vapeur évacuée durant une tranche de temps	MV	lbm
$\dot{m}_v$	Débit de vapeur	DEBVA	lbm/hr
$P_e$	Pression de l'eau d'alimentation	PE	psig
$T$	Température de la vapeur	T	°F (°C)
$T_e$	Température de l'eau d'alimentation	TE	°F



6. Autres

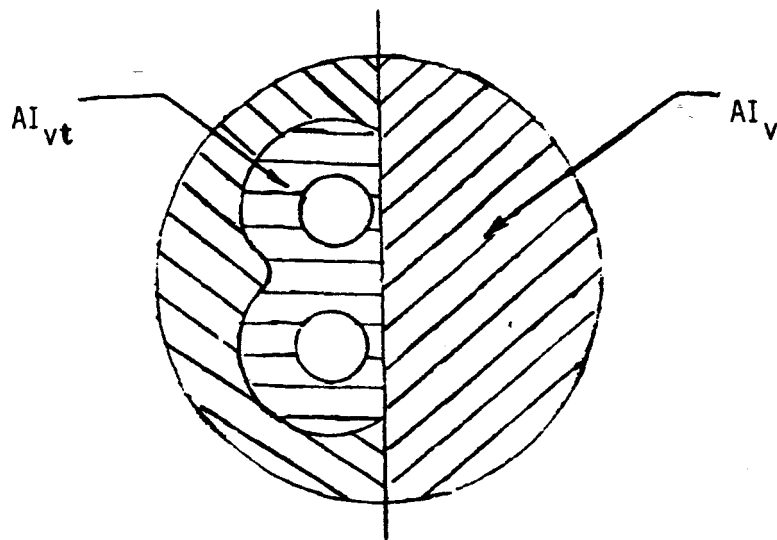
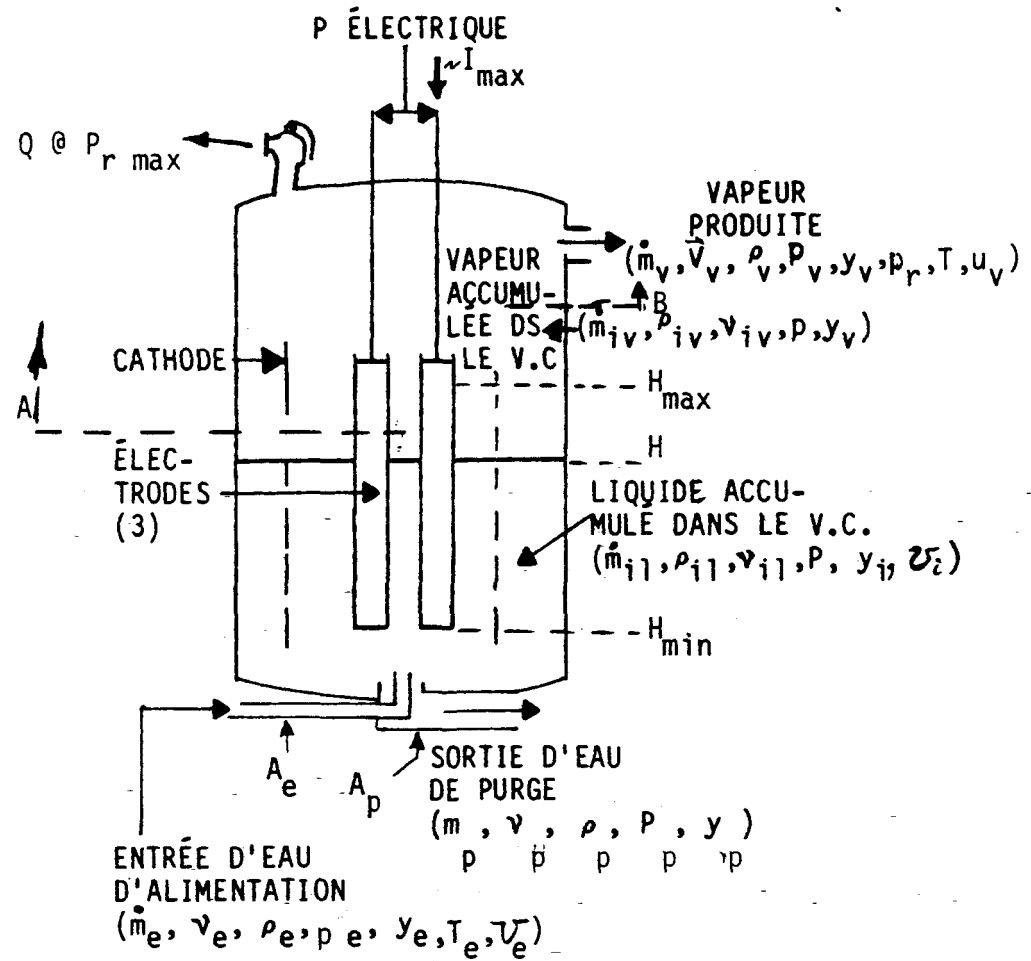
VARIABLES	DESCRIPTION	IDENTIFICATION UTILISÉE DANS LE PROGRAMME D'ORDINATEUR	UNITÉS
$H_{max}$	Hauteur maximum d'eau aux électrodes avant débordement	HMAX	po
$H_{min}$	Hauteur minimum sécuritaire d'eau aux électrodes	HMIN	po
$I_{max}$	Courant maximum de surcharge	IMAX	Amp.
K	Volume du dôme du haut de la bouilloire	K	po <sup>3</sup>
$K_1$	Volume du dôme du bas de la bouilloire	KL	po <sup>3</sup>
$M_{max}$	Nombre maximum d'itérations désirées pour évaluer $M_v(P)$	ML	
$m_{v1}$	Valeur de transition	MVL	lbm
$N_{max}$	Nombre maximum d'itérations désirées par tranche de temps.	NL	
P	Puissance électrique	P	Watts
$P_1, P_2$	Valeurs de transition de P	P1, P2	Watts
$P_{rmax}$	Pression maximale à laquelle la soupape de sûreté ouvre	PRMAX	psig
$PROP_v$	Proportion de vapeur dans l'eau	PROPV	
Q	Débit passant par une soupape de sûreté idéal ouvrant d'un coup	DEBSUR	lbm/hr
$\epsilon$	Précision désirée du modèle (évaluation $M_v(P_2)$ )	EPSI	
$v_{etr}$	Volume d'eau dans l'espace entre la cathode et l'électrode	VETR	po <sup>3</sup>
$v_{vtr}$	Volume de vapeur dans l'espace entre la cathode et l'électrode	VVATR	po <sup>3</sup>
$\zeta$	Précision désirée du modèle (évaluation $M_v$ )	ZETA	

## Localisation physique des principales variables

### Note sur les unités utilisées

Puisque ce travail concerne une installation industrielle, nous avons convenu d'adopter les unités couramment utilisées en pratique, même si un tel choix conduit à des unités hétérogènes.

FIGURE 1 : LOCALISATION PHYSIQUE DES PRINCIPALES VARIABLES



VUE A

VUE B

COUPE AB

## INTRODUCTION

L'usine SÉCAL à Arvida utilise près de 540,000 lbs/hre de vapeur (moyenne annuelle) pour ses procédés. Cette vapeur est produite soit par des chaudières à l'huile ou des bouilloires électriques.

Les bouilloires électriques, au nombre de cinq (5) sont utilisées de préférence parce que plus économiques.

Les principes fondamentaux de leur fonctionnement ne sont pas complètement compris. L'amélioration de cette compréhension permettrait un meilleur contrôle du procédé et possiblement de maintenir une efficacité optimale.

Les bouilloires électriques utilisées à l'Alcan sont à "électrodes immergées" (il existe un autre type de bouilloire: celle à jet). Celles-ci se répartissent de la façon suivante:

3 bouilloires de 37,500 KW.h

2 bouilloires de 15,000 KW.h

Bien que de dimensions différentes, elles sont toutes de construction identique. Le comportement des plus grosses sera étudié et considéré comme significatif.

Ces bouilloires sont fermées et sous pression, il est donc très difficile et dangereux d'en étudier le comportement interne. De plus, l'instrumentation d'usine ne donne que peu de valeurs instantanées. Ainsi, bien que l'inertie thermique du système soit relativement faible, il a fallu utiliser la simulation comme moyen d'expérimentation sécuritaire.

L'utilisation d'un modèle réduit a donc été d'abord nécessaire pour trouver l'équation d'état et vérifier les réactions du système à une variation brusque de conductivité dans la région avoisinant les électrodes.

Ces données ont permis par la suite de réaliser un modèle mathématique constitué d'équations non linéaires qui ont ensuite été utilisées pour simuler l'effet de certaines variations brusques de la conductivité, du niveau de liquide conducteur et de la pression d'opération.

Les résultats obtenus permettent aussi d'expliquer la cause de certains troubles survenus en usine et de suggérer certaines modifications à l'équipement.

## CHAPITRE I

### TRAVAUX ANTÉRIEURS

Les travaux portant sur les bouilloires à électrodes immergées qui ont été consultés traitent principalement des aspects économiques et décrivent qualitativement les développements qui ont été effectués sur les installations existantes.

Dominion Engineer [37] suggère la proportionnalité entre la conductivité, le niveau d'immersion des électrodes et la puissance requise pour produire la vapeur. Ceci est confirmé dans la note Bouilloires électriques [34] qu'utilise Consolidated Bathurst. Ces informations sont les seules disponibles et peu élaborées. Cette carence d'informations disponibles sur la relation entre les différentes variables du système a donc conduit à différentes recherches bibliographiques et expérimentales afin de décrire le fonctionnement du système.

Ces recherches sont demeurées pour la plupart vaines, aucune étude mentionnée ne s'appliquait au type de bouilloire considéré. Il a été néanmoins possible de retracer un article sur l'application de la loi d'hm pour le calcul de la conductivité du système [29] par Uniloc, Inc. et par Rosenthal [23]. D'autre part, l'influence de la température sur la conductivité est décrite par Truman [28] et Schwiger [24].

## CHAPITRE II

### DESCRIPTION D'UNE BOUILLLOIRE À ÉLECTRODES IMMERGÉES

On distingue deux types de bouilloires à électrodes:

- celles à "jet" où l'eau conductrice est injectée tangentielle-  
ment par le haut de l'électrode et recouvre celle-ci  
en descendant en spirale;
- celles à "électrodes immergées".

Ces dernières, objet de cette recherche, sont composées de trois (3) électrodes creuses, perforées et légèrement coniques, plongées dans de l'eau conductrice. Elles sont entourées d'une paroi en forme de trèfle régulier à trois (3) feuilles de section droite, également perforées et faites d'acier, servant de cathode. Le tout est contenu dans un réservoir cylindrique fermé et conçu afin de contenir la vapeur sous pression (Figure 2). (note 1 page suivante)

Une tension triphasée de 6,600 volts est appliquée aux électrodes, le courant passe alors par l'eau conductrice vers la cathode, communiquant ainsi l'énergie nécessaire à l'évaporation.

L'eau conductrice est injectée en dessous, au centre du groupement des électrodes et contient à l'occasion un produit permettant d'en augmenter la conductivité électrique. S'il n'y a pas d'ajout d'eau la

conductivité de l'eau contenue dans la bouilloire augmente par suite de l'accroissement de la concentration de sels minéraux dû à l'évaporation de l'eau.

Une saignée en continu (bleed) et une purge (blow-down) périodique par le bas permettent de diminuer la conductivité de la bouilloire.

Dépendant de la pression du réseau dans lequel décharge la bouilloire, des variations de la conductivité électrique et du niveau d'immersion des électrodes permettent le contrôle de la quantité de vapeur saturée produite (Figure 3).

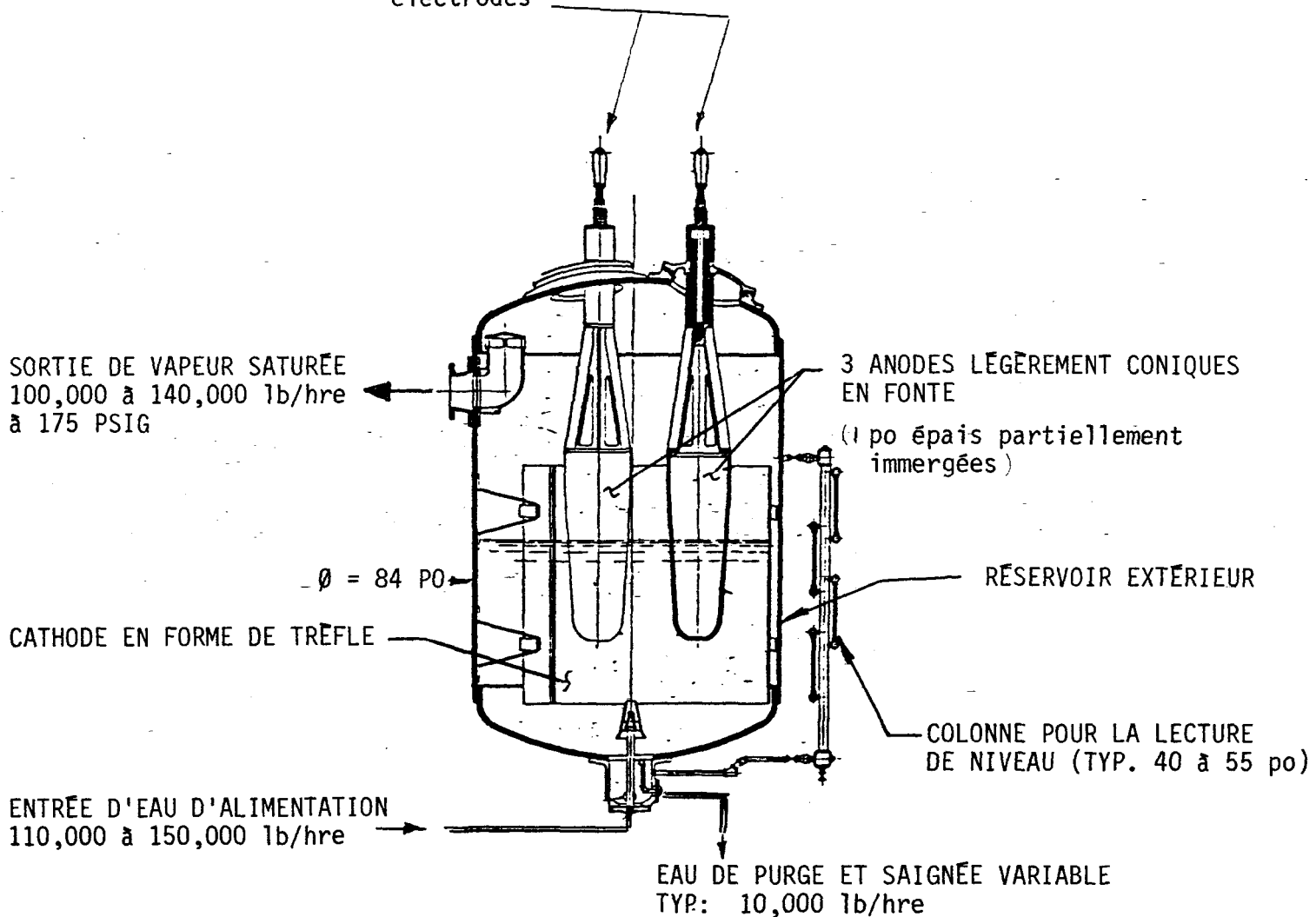
#### Note 1

Il s'agit en fait d'électrodes et d'un bouclier qui sert de contre-électrode cependant, l'utilisation des termes "anodes" et "cathode" quoique un peu abusive est la terminologie utilisée en usine et sera donc celle utilisée dans cet ouvrage.



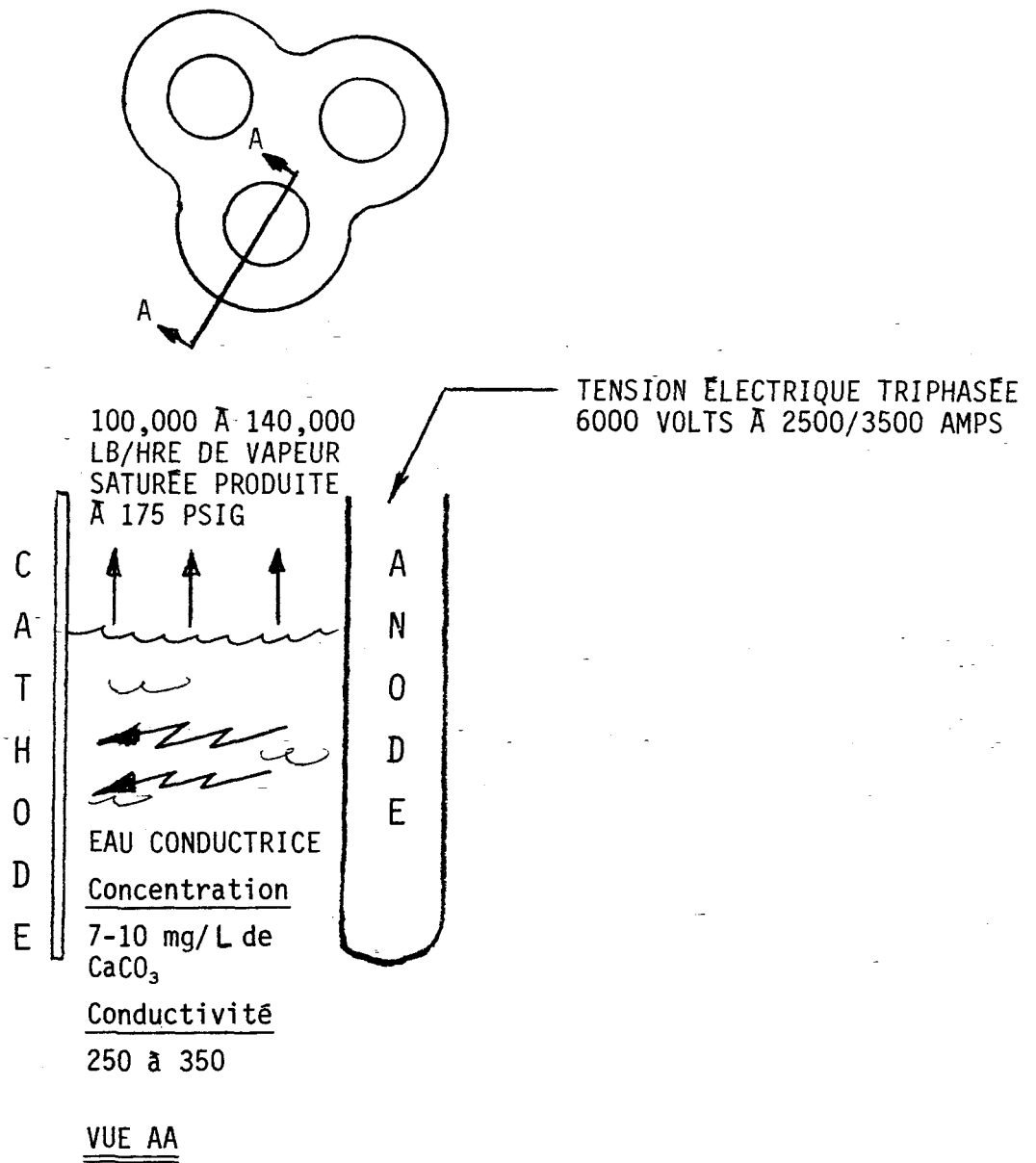
TENSION TRIPHASÉE DE 6,600 VOLTS (COMM.Y)

à Environ 2500/3500 amps aux bornes des électrodes



L'ensemble a environ 13 pieds de hauteur

**FIGURE 2 :** CHAUDIÈRE À ÉLECTRODES IMMERGÉES



**FIGURE 3 :** PRINCIPE D'OPÉRATION DE LA BOUILLOIRE  
À ÉLECTRODES IMMERGÉES (UNE(1) ÉLECTRODE)

## CHAPITRE III

### LE MODÈLE

Ce chapitre porte sur tous les éléments qui composent le modèle. Il débute par une liste des hypothèses simplificatrices qui sous-tendent l'élaboration d'un tel modèle. Par la suite, la partie théorique concernant le développement des équations est présentée. La dernière partie est consacrée à la méthode de résolution.

#### 3.1 Hypothèses simplificatrices

Un modèle mathématique se doit de refléter le plus fidèlement possible les phénomènes physiques inhérents aux procédés simulés.

Cependant, certaines hypothèses simplificatrices ont dû être posées lors de l'élaboration de ce modèle afin d'alléger la résolution:

- L'effet de la concentration sur la conductivité a été considérée en début de recherche et a été évaluée alors comme non nécessaire à l'analyse visée par cette étude. Ainsi, la variation de la conductivité de l'eau dans la bouilloire en fonction de l'évaporation est considérée équilibrée par une saignée en continu.
- Les trois électrodes ont une interaction négligeable et produisent chacune la même quantité de vapeur.

- Le liquide à l'intérieur de la bouilloire ne se déplace que verticalement et le mélange demeure uniforme et instantané.
- Les parois du réservoir extérieur sont bien isolées de sorte que le procédé est adiabatique.
- La tension aux bornes des électrodes est alternative et la densité de courant en surface est suffisamment basse pour qu'il n'y ait pas d'électrolyse de l'eau.
- L'effet de bout et la résistance électrique des électrodes et cathodes sont considérés négligeables.
- L'accumulation de vapeur dans le réservoir de la bouilloire n'est pas considérée dans le bilan de masse parce que les variations en sont négligeables.

### 3.2 Les équations

La relation qui permet le calcul de la puissance à fournir et les équations de bilan de masse et d'énergie servent de point de départ au modèle.

Ces équations seront d'abord développées puis discrétisées pour être présentées telles qu'elles apparaissent dans les divers sous-programmes.

### 3.2.1 Equation de la puissance: essais expérimentaux

Une équation donnant la puissance requise pour l'évaporation sous différentes conditions d'opération n'était pas disponible dans les documents de référence consultés. Il a donc été nécessaire de la développer empiriquement.

Une bouilloire électrique à électrodes immergées est un appareil sous pression se prêtant mal à des essais et dont le comportement physique interne est invisible.

L'utilisation d'un modèle réduit ouvert a rendu possible la vérification de la relation qui lie les différents paramètres, en les fixant tous, sauf un (Annexe 6) ce qui a permis de vérifier que la loi d'Ohm s'applique. Une compensation est cependant nécessaire en diminuant le volume de liquide conducteur du volume occupé par la vapeur (considérée isolante)

#### 3.2.1.1 Calcul de la puissance pour un cas de deux (2) cylindres

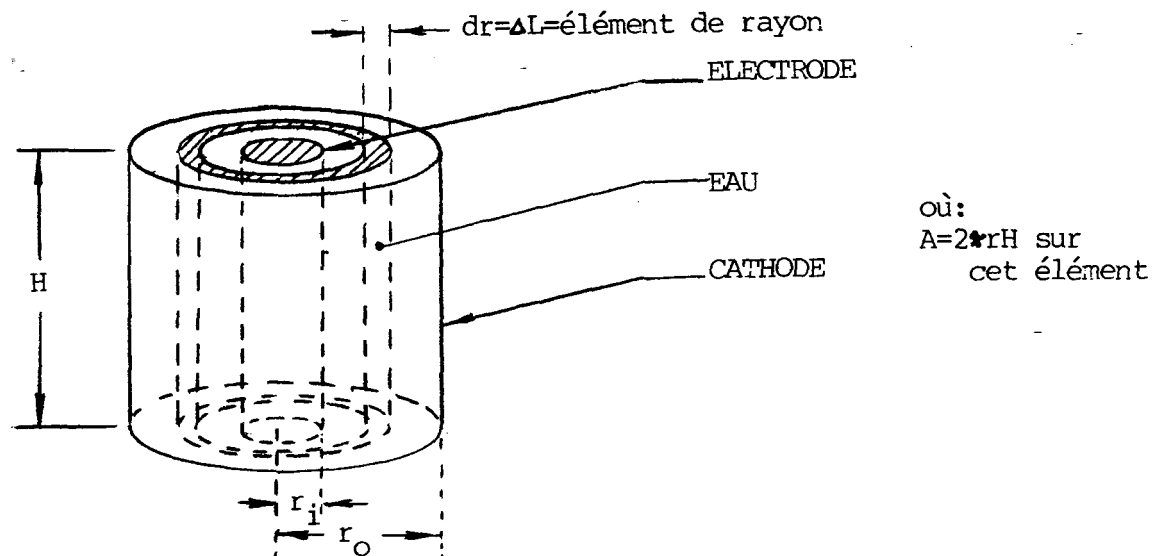


FIGURE 4: Schéma de principe de l'arrangement électrode/cathode.

La conductivité électrique totale de l'eau est donnée par:

$$\sigma = \frac{A}{l} \cdot \sigma_T \quad \text{EQUATION 1}$$

(à température constante)

où:  $\sigma$  = conductivité électrique totale de l'eau contenue

$\sigma_T$  = conductivité électrique unitaire ( $\mu\text{mho/cm}$ ) à une température T

l = distance moyenne entre les 2 plaques (à calculer)

A = surface immergée extérieure de l'électrode.

r = rayon à partir du centre de l'électrode

Pour le cas des deux (2) cylindres concentriques:

$$\frac{1}{A} = \int_{r_i}^{r_e} \frac{dr}{2\pi rH} = \frac{1}{2\pi H} \cdot \ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right) \quad \text{EQUATION 2}$$

où:  $r_i$  = rayon extérieur de l'électrode

$r_e$  = rayon intérieur de la cathode

D'où pour une tension monophasée:

$$P \cong E^2 \cdot \sigma = E^2 \cdot \sigma_T \cdot \frac{A}{l} = \frac{E^2 \cdot \sigma_T \cdot 2\pi H}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad \text{EQUATION 3}$$

(Température constante)

où: P = Puissance électrique [Watts]

E = Tension électrique [Volts]

Et pour un arrangement triphasé en "Y":  $P_{ph} = \frac{P}{3}$

$$P_{ph} = \frac{E^2}{3} \cdot \vartheta_T \cdot \frac{2\pi H}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \quad \text{EQUATION 4}$$

où:  $P_{ph}$  = Puissance électrique par "Phase" [watts]

La production de vapeur sous pression est à haute température et la conductivité doit être corrigée en conséquence.

La conductivité est proportionnelle à la température selon:

$$\vartheta_T = \vartheta_{25^\circ C} (1 + C.T. (T - 25)) \quad \text{EQUATION 5}$$

où:  $T$  = Température du liquide [ $^\circ C$ ]

C.T. = Coefficient de proportionnalité (évalué expérimentalement),  
variation de la conductivité selon la température.

### 3.2.1.2 Présence de la vapeur dans le liquide

L'eau entre la cathode et l'électrode est remplie de bulles de vapeur. Celles-ci sont considérées isolantes et elles prennent la place d'une partie du liquide conducteur dans cet espace diminuant ainsi la puissance tirée.

De plus, la puissance réelle peut être réduite probablement par deux autres facteurs négligés pour cette étude:

- i) le facteur  $\cos \theta$ , si le circuit électrique n'est pas purement résistif.
- ii) la densité du courant n'est pas constante autour de l'électrode.

Donc, pour le modèle d'une bouilloire:

$$P_{\text{ph réel}} = \frac{E^2}{3} \cdot \frac{2 \pi H}{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)} \cdot \psi_T \cdot (1 - \text{PROPV}) \quad \text{EQUATION 6}$$

où:  $P_{\text{ph réel}}$  = Puissance tirée en tenant compte de l'effet isolant de la vapeur [watts]

H = Niveau d'immersion de l'ensemble électrode-cathode

PROPV = Proportion de vapeur contenue dans l'eau conductrice et isolant partiellement.

La validité de l'équation ainsi développée est vérifiée à l'annexe 5 à partir du modèle réduit et de données pratiques provenant d'équipements en opération.

### 3.2.1.3 Introduction des constantes et ajustements des unités de mesure

Les dimensions de la bouilloire de 37,500 kw.h sont constantes et connues:

DIC =  $r_e$  = rayon interne de la cathode = 49.5 cm

DIA =  $r_i$  = rayon externe de l'électrode = 29.2 cm

C.T. = coefficient de proportionnalité évalué expérimentalement.

≈ 0.0223 pour l'échantillon d'eau de bouilloire ayant servi aux essais.

E = Tension électrique = 6 600 volts AC (crête à crête)



En ajustant les unités, on obtient finalement l'équation suivante (telle que programmée):

$$P = E^2 \frac{(\psi_T (1 - \text{PROPV}))}{10^6} \cdot 2 \pi H \cdot \frac{1}{\ln \left( \frac{\text{DIC}}{\text{DIA}} \right)}$$

EQUATION 7

(Voir page suivante pour les détails sur les constantes.)

Explication des constantes:

-E totale pour 3 phases =  $3 \times E_{ph}$

où  $E_{ph}$  = tension pour une phase.

-Conductivité est mesurée en micromho/cm (divisée par  $10^6$ )

### 3.2.2 Équation du bilan de masse

Le réservoir de la bouilloire électrique est considéré comme un volume de contrôle (ligne discontinue) sur lequel on fera un bilan de masse.

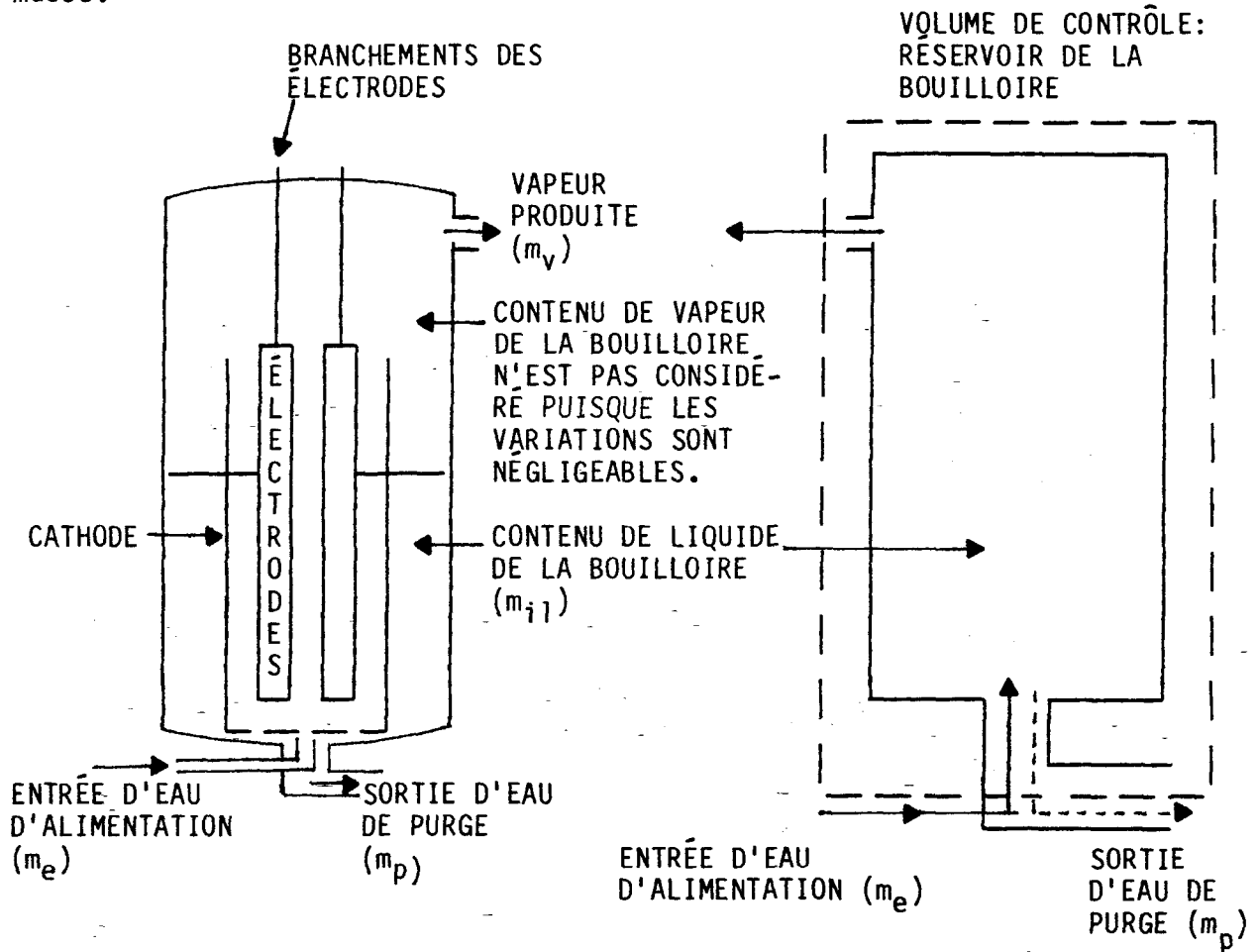


FIGURE 5 Volume de contrôle pour le bilan de masse autour du réservoir de la bouilloire

(Dessin schématique de la bouilloire à gauche, volume de contrôle simplifié à droite).

i) Équation d'équilibre instantané des débits massiques:

MASSE ENTRE - MASSE SORT = MASSE ACCUMULÉE

$$\dot{m}_e - (\dot{m}_v + \dot{m}_p) = \frac{d m_{ij}}{dt} \quad \begin{matrix} [lbm/hr] \\ \text{ou} \\ [kg/hr] \end{matrix} \quad \text{EQUATION 8}$$

où  $\dot{m}_e$  = Débit massique d'eau d'alimentation

$\dot{m}_v$  = Débit massique de sortie de vapeur

$\dot{m}_p$  = Débit massique de sortie d'eau de purge

$\frac{d m_{ij}}{dt}$  = variation de la masse de liquide conducteur contenue dans le réservoir en fonction du temps.

Cette équation sera discrétisée sur un écart de temps  $\Delta t$ .

ii) Utilisation dans le modèle

L'équation d'équilibre massique est utilisée dans le modèle pour évaluer la masse de liquide contenue dans le réservoir.

On utilisera ici une formulation explicite, c'est-à-dire que la valeur cherchée d'une variable à un temps  $t + \Delta t$  sera fonction des tendances observées au temps  $t$ . De plus, on posera que les entrées et les sorties ne varient pas dans l'écart de temps  $\Delta t$  considéré.

La somme des variations de masses survenues pendant l'intervalle  $\Delta t$  par la masse initiale de liquide contenue dans le réservoir donne la nouvelle masse après  $\Delta t$ .

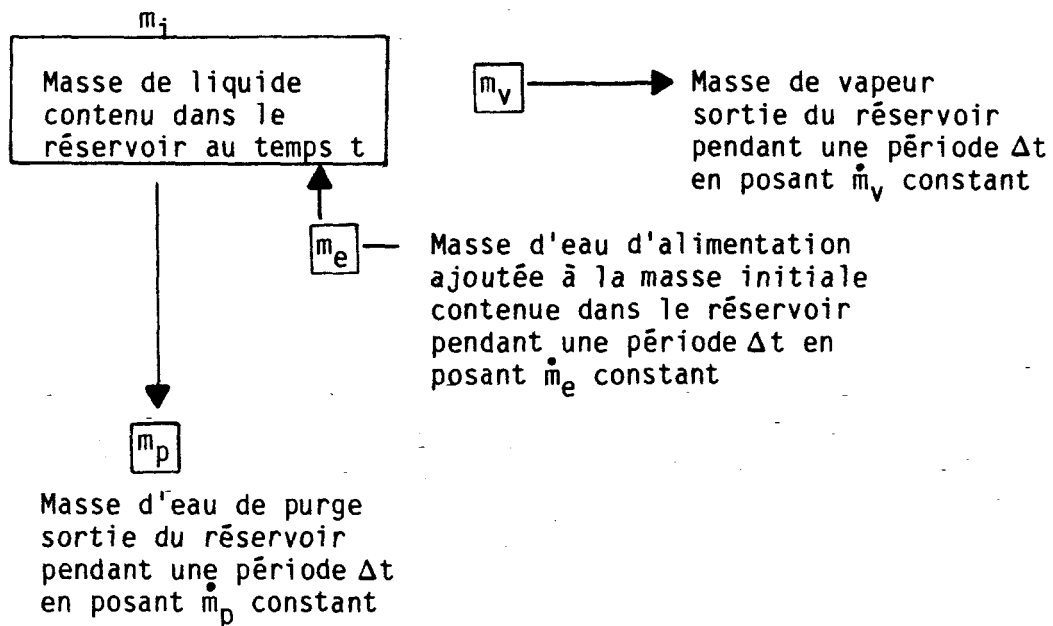


FIGURE 6 : Schéma de principe du bilan massique.

La masse contenue dans le réservoir après un intervalle  $\Delta t$  est obtenue par l'équation discrétisée suivante:

$$m_{i1} = m_{il/t} + (\dot{m}_{e/t} \cdot \Delta t) - (\dot{m}_{v/t} + \dot{m}_{p/t}) \cdot \Delta t \quad \text{EQUATION 9}$$

où  $m_{i1}$  = Masse de liquide conducteur contenu par le réservoir après l'intervalle  $\Delta t$  [lbm ou kg]

$m_{il/t}$  = Masse de liquide conducteur contenu par le réservoir avant l'intervalle  $\Delta t$  [lbm ou kg]

$\dot{m}_{e/t}, \dot{m}_{p/t}, \dot{m}_{v/t}$  = Débits massiques d'eau d'alimentation, de purge et de vapeur produite avant l'intervalle  $\Delta t$  [lbm ou kg]

$\Delta t$  = Durée de temps de l'intervalle discrétisé étudié [hr]

### 3.2.3 Équation du bilan d'énergie

On peut établir aussi un bilan d'énergie autour du même volume de contrôle qu'à la section précédente.

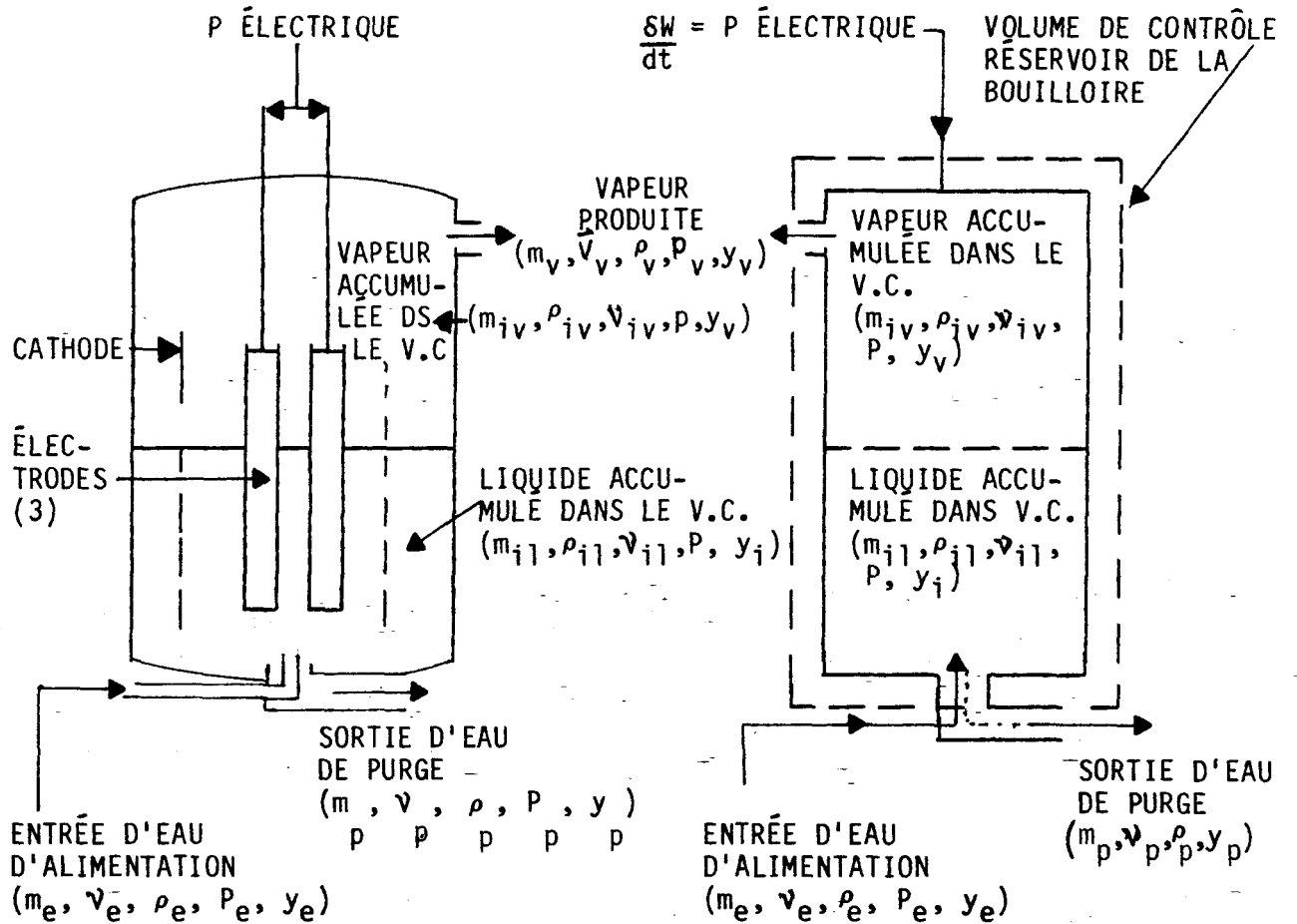


FIGURE 7 : Volume de contrôle pour le bilan d'énergie autour du réservoir de la bouilloire.  
(Dessin schématique de la bouilloire à gauche, volume de contrôle autour du réservoir à droite).

3.2.3.1 Équation d'équilibre d'énergie: (Réf. no.32)

$$\text{ÉNERGIE ENTRE} - \text{ÉNERGIE SORT} = \text{ÉNERGIE ACCUMULÉE}$$

$$\text{où: } \cancel{\frac{\delta Q}{dt}} - \frac{\delta W_s}{dt} - \iint_s \left( e + \frac{p}{\rho} \right) \cdot \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \frac{\delta}{\delta t} \iiint_{v.c.} e \cdot \rho dv + \cancel{\frac{\delta W_f}{dt}} \quad \text{EQUATION 10}$$

(adiabatique)

(friction négligeable)

où:  $\frac{\delta Q}{dt}$  = Valeur instantanée de la variation de chaleur

$\frac{\delta W_s}{dt}$  = Puissance instantanée

$\frac{\delta W_f}{dt}$  = Valeur instantanée de la perte de puissance par friction

$e$  = Énergie massique totale du fluide.

$p$  = Pression du fluide

$\rho$  = Densité du fluide

$\vec{v}$  = Vecteur vitesse du fluide

$\vec{n}$  = Vecteur unitaire dirigé vers l'extérieur du volume de contrôle

$A$  = Surface par laquelle passe le fluide

$v.c.$  = Volume de contrôle

$s$  = Surface du volume de contrôle

### 3.2.3.2 Évaluation de chacun des membres de l'équation

i) Hypothèses simplificatrices:

Aucun travail mécanique n'est fourni et la friction est négligée d'où:

$$\frac{\delta W_f}{dt} = 0$$

On considère qu'il n'y a pas de pertes de chaleur, de formation de gaz ni oxydation des électrodes, ceci grâce à une bonne isolation et à l'emploi de tension alternative; ainsi on estime que l'échange de chaleur avec l'environnement est négligeable.

$$\frac{\delta Q}{dt} = \text{Pertes} = 0$$

On considère que la puissance  $P$  alimentée est un "travail" électrique fourni au système de sorte que:

$$-\frac{\delta W_s}{dt} = P \quad (+) \quad \text{puisque} \quad \frac{\delta W_s}{dt} \equiv (-) \quad (\text{par convention de signe})$$



ii) Énergie provenant des entrées/sorties de fluide

Il est possible de discrétiser les entrées et sorties de fluide puisque les débits ne s'effectuent qu'aux surfaces d'entrée d'eau et sortie de purge et vapeur. De plus, ils sont normaux à celles-ci.

On obtient:

$$\iint_S \left( e + \frac{p}{\rho} \right) (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \left( \frac{v_v^2}{2} + gy_v + u_v + \frac{p_v}{\rho_v} \right) (\rho_v V_v A_v) + \dots$$

$$\dots + \left( \frac{v_p^2}{2} + gy_p + u_p + \frac{p_p}{\rho_p} \right) (\rho_p V_p A_p) - \left( \frac{v_e^2}{2} + gy_e + u_e + \frac{p_e}{\rho_e} \right) (\rho_e V_e A_e)$$

EQUATION 11

où:  $u$  = énergie interne

Sachant que:  $h = u + p v$ ;  $h = u + \frac{p}{\rho}$

et  $\dot{m} = \rho V A$ ; il s'ensuit que:

$$\iint_S \rho \left( e + \frac{p}{\rho} \right) (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA = \left( \frac{v_v^2}{2} + gy_v + h_v \right) \dot{m}_v + \left( \frac{v_p^2}{2} + gy_p + h_p \right) \dot{m}_p \dots$$

$$\dots - \left( \frac{v_e^2}{2} + gy_e + h_e \right) \dot{m}_e$$

EQUATION 12

iii) Variations à l'intérieur du volume de contrôle

L'accumulation à l'intérieur du volume de contrôle se traduit par:

$$\frac{\delta}{\delta t} \iiint_{V.C.} e \cdot \rho \cdot dv = \frac{\delta}{\delta t} \iiint_{V.C.} \left( gy_i + \frac{v_i^2}{2} + u_i \right) \cdot \rho \cdot dv \quad \text{EQUATION 13}$$

où:  $u_i = h_i - P_i \nu_i$

Note 1. Dans la bouilloire électrique, il y a 2 phases en présence: solution et vapeur.

Note 2. Les volumes de liquide et de vapeur ne se déplacent pas

d'où:  $gy_i = \frac{v_i^2}{2} = 0$

(même si ces termes n'étaient pas tout à fait nuls, leurs valeurs seraient très faibles comparées à l'énergie interne u).

L'équation d'équilibre d'énergie devient:

$$P_e = \left( \frac{v_v^2}{2} + gy_v + h_v \right) \dot{m}_v + \left( \frac{v_p^2}{2} + gy_p + h_p \right) \dot{m}_p - \left( \frac{v_e^2}{2} + gy_e + h_e \right) \dot{m}_e + \dots$$

$$\dots + \frac{\delta}{\delta t} \iiint_{V.C.} u_i \cdot \rho \cdot dv$$

EQUATION 14

Note 3.  $\iiint_{V.C.} = \int_0^H \left| \begin{array}{l} \text{solution} \\ \text{dessus B.E.} \\ \text{H} \end{array} \right| + \int_H^{\text{dessus B.E.}} \left| \begin{array}{l} \text{vapeur} \end{array} \right|$

Note 4. L'équation sera discrétisée sur un écart de temps  $\Delta t$  comme à la section précédente.

Note 5. Dans le terme d'accumulation,  $u_i$ ,  $h_i$ ,  $v_i$  sont uniformes selon le rayon.

Suite à ces considérations, le terme d'accumulation peut être ainsi reformulé:

EQUATION 15

$$\frac{\delta}{\delta t} \iiint_{v.c.} u_i \cdot \rho_i \, dv = \frac{\delta}{\delta t} \cdot A_i \left[ \int_0^H u_{il} \cdot \rho_{il} \, dy + \int_H^{H_{tot}} u_{iv} \cdot \rho_{iv} \cdot dy \right]$$

Si on considère le mélange liquide et la vapeur brassés et homogènes, on obtient:

EQUATION 16

$$\frac{\delta}{\delta t} \iiint_{v.c.} u_i \cdot \rho_i \, dv = \frac{\delta}{\delta t} \rho_{il} (A_{il} \cdot H) u_{il} + \frac{\delta}{\delta t} \rho_{iv} (A_{iv} (H_{tot} - H)) \cdot u_{iv}$$

où:  $\rho \cdot A \cdot H = m$

L'équation de bilan d'énergie ainsi résultante est solutionnée de façon explicite:

$$\frac{\delta}{\delta t} \iiint_{v.c.} u_i \cdot \rho_i \, dv = \frac{\Delta}{\Delta t} (m_{il} u_{il} + m_{iv} u_{iv}) \quad \text{EQUATION 17}$$

Ce terme discrétisé est représenté par:

$A = \dot{m}_{i1} u_{i1} + \dot{m}_{iv} u_{iv}$ : pour l'intervalle de temps actuel et,

$A/t$  = terme évalué à l'intervalle de temps précédent.

### 3.2.3.3 Équation d'équilibre d'énergie programmée

Le bilan d'énergie sert à évaluer la puissance requise par le système et est programmé à partir des équations développées dans cette section:

$$P = [\dot{m}_v \left( \frac{v_v^2}{2} + gh_{tot} + 25056 h_v \right) + \dot{m}_p \left( \frac{v_p^2}{2} + 25056 h_p \right) + \dots$$

$$\dots \dot{m}_e \left( \frac{v_e^2}{2} + 25056 h_e \right) + \frac{A - A/t}{\Delta t} \div 85197 \quad (1) \quad \text{EQUATION 18}$$

(Pour la description des termes, référer à la nomenclature au début du présent ouvrage).

---

#### (1) REMARQUE

Les facteurs de conversion suivants ont été utilisés:

$$\frac{\text{BTU}}{\text{lb}_m} \times 25056 = \frac{\text{pi}^2}{\text{s}^2}$$

$$\frac{\text{lb}_m}{\text{h}} \times \frac{\text{pi}^2}{\text{s}^2} \times \frac{1}{85197} = \text{W}$$

### 3.2.4 Autres équations

Lors de la programmation, plusieurs équations principales ont été décomposées afin d'en faciliter l'utilisation.

De plus, il a été nécessaire de formuler différentes équations selon certains besoins spécifiques à la résolution.

#### 3.2.4.1 Calculs relatifs à la quantité de liquide dans la bouilloire

##### i) Niveau de liquide

Le niveau de liquide est calculé suivant un raisonnement analogue à celui utilisé à la section 3.2.2 ii) pour évaluer la masse actuelle de liquide dans le réservoir.

On suppose encore ici que les entrées et les sorties ne varient pas dans l'écart de temps  $\Delta t$  considéré.

Le niveau de liquide dans le réservoir après un intervalle de temps  $\Delta t$  peut donc être calculé en additionnant le niveau à l'intervalle de temps précédent avec l'entrée de liquide durant l'intervalle considéré. Cette entrée d'eau est approximée en utilisant le débit massique d'entrée d'eau à ce moment.

$$H = H/t + \frac{(\dot{m}_i \cdot \Delta t)}{\rho_i \cdot A I_v}$$

EQUATION 19

où:  $H$  = Niveau de liquide [cm] après l'intervalle  $t$ .

$H/t$  = Niveau de liquide [cm] avant l'intervalle  $t$ .

$\dot{m}_{il}$  = Variation de masse du liquide à l'intérieur du réservoir (débit massique) [kg/hr]

$\Delta t$  = Intervalle de temps.

$\rho_i$  = Densité du liquide dans le réservoir  $\left[ \frac{\text{kg}}{\text{hr}} \right]$

$AI_v$  = Section horizontale du réservoir [cm<sup>2</sup>]

### ii) Vitesse des fluides entrant et sortant

À partir du débit massique, en utilisant la densité du fluide et la surface du conduit par lequel il s'écoule, on déduit la vitesse à laquelle il se déplace.

$$v = 0.04 \frac{\dot{m}}{\rho \cdot A}$$

EQUATION 20

où:  $0.04 = \text{conversion} = \frac{144 \text{ po}^2}{3600 \text{ min}^2}$

### 3.2.4.2 Calculs relatifs aux propriétés de l'eau et de la vapeur

Les différents calculs du modèle de la bouilloire nécessitent l'évaluation fréquente des caractéristiques thermodynamiques de l'eau (liquide et vapeur).

Il a été nécessaire de sélectionner des équations permettant de programmer la partie utilisée des tables de la vapeur saturée et du liquide comprimé (tableau 2 , annexe 2 ).

Les équations retenues sont celles proposées par Stoa [25], pour la température de saturation ( $T$ ), l'enthalpie de la vapeur ( $h_v$ ) et le volume massique de l'eau comprimée ( $V_e$ ) en fonction de la pression ( $P$ ). Leur fiabilité est supérieure à 99%.

De plus, il a été nécessaire de développer deux (2) relations par lissage de courbe pour le calcul de l'enthalpie de l'eau contenue dans le réservoir ( $h_e$ ) et l'enthalpie de l'eau comprimée d'alimentation ( $h_{ea}$ ). Ces équations ont une fiabilité de 94% et 97% respectivement dans la zone étudiée.

### 3.3 MÉTHODE DE RÉOLUTION

#### 3.3.1 Procédure générale

Les équations développées dans la section précédente sont résolues par un programme FORTRAN de façon à reproduire le plus fidèlement possible l'opération réelle d'une bouilloire électrique.

L'utilité principale du modèle est d'évaluer la production de vapeur de la bouilloire en fonction des différentes entrées et sorties déterminant l'état de l'intérieur du réservoir.

Ces variables d'entrées et sorties sont au nombre de quatre (4):

- P : Puissance électrique d'entrée;
- $\dot{m}_e$  : Entrée d'eau d'alimentation;
- $\dot{m}_p$  : Sortie d'eau de purge et de saignée;
- $\dot{m}_v$  : Sortie de vapeur (variable étudiée)

Dans la section précédente, on a défini trois (3) équations dont deux d'équilibre pour décrire le système:

- Équation de calcul de la puissance (selon l'état des paramètres de la bouilloire) (Cette équation, originale, a été proposée suite à une recherche en laboratoire qui est décrite en ANNEXE 5)
- Équation d'équilibre d'énergie;
- Équation d'équilibre des masses.



De plus, l'ensemble des équations est non-linéaire et difficilement linéarisable.

Les débits d'eau d'alimentation et de sortie de purge sont utilisés dans le procédé pratique pour le "contrôle" de l'état des fluides dans la bouilloire. Ces variables seront donc fixées au début de chaque calcul et utilisées pour varier le comportement du modèle en utilisant l'équation d'équilibre de masse modifiée (équation 9 ).

La puissance consommée par le système ainsi que le débit de vapeur sont des conséquences des conditions existantes dans le réservoir. Ces variables sont donc directement dépendantes des autres et ne peuvent donc être fixées au départ.

Le problème sera résolu en supposant un débit de vapeur ( $\dot{m}_v$ ) qui permettra de déterminer la puissance consommée par l'équation de la puissance et par l'équation d'équilibre d'énergie.

En comparant ces deux réponses, il est ensuite possible de procéder par itérations pour déterminer, à l'intérieur d'une précision désirée, la puissance consommée et le débit de vapeur pour les conditions fixées.

Un effet dynamique (variation des paramètres dans le temps) est de plus réalisé par la simulation du modèle par tranches discrétisées de temps.

Pour chacune de ces tranches de temps, les variables de sortie (puissance et vapeur) sont calculées.

### 3.3.1.1 Description de l'ensemble du programme

L'évolution dans le temps par tranches finies a été obtenue par une programmation comportant trois (3) blocs principaux.

- a) Initialisation de la première tranche de temps et calcul de certaines caractéristiques physiques.
- b) Calculs thermodynamiques pour une tranche.
- c) Intégration numérique dans le temps.

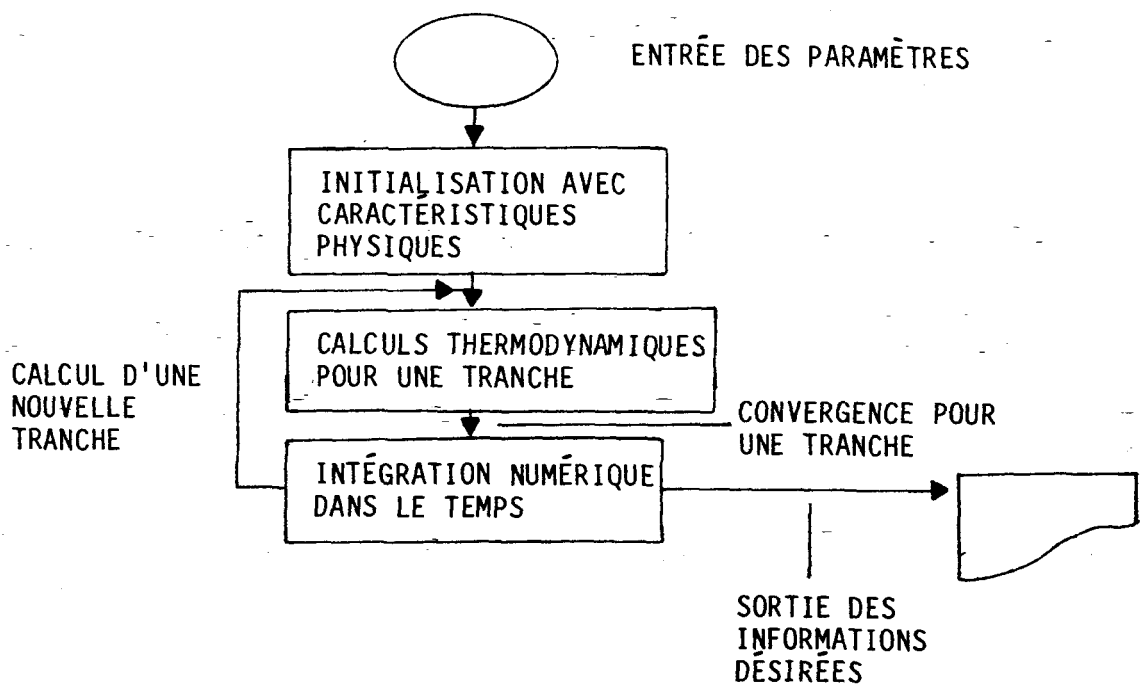


FIGURE 8 : Vue des trois (3) blocs principaux de programmation.

### 3.3.1.2 Description des trois (3) blocs de programmation

#### i) Initialisation de la première tranche de temps

En tenant compte des caractéristiques physiques de la bouilloire et des entrées et sorties, le programme initialise les variables nécessaires aux calculs de la première tranche de temps (données physiques, ANNEXE 6)

#### ii) Calculs thermodynamiques pour une tranche

(Voir logigramme décrit en ANNEXE 3)

Le modèle suppose un débit de vapeur qui donne, à partir des équations d'équilibre et de l'équation de calcul de la puissance, deux (2) valeurs de puissance consommée.

Les résultats ainsi obtenus sont utilisés par une méthode de convergence, pour obtenir par itérations successives, le débit de vapeur et la puissance pour les conditions données du réservoir.

Deux (2) sous-routines sont utilisées pour calculer respectivement les caractéristiques physiques de l'eau comprimée (EEA) et de la vapeur (TVAP) (ANNEXE 2).

#### iii) Intégration numérique des tranches

Le programme principal réinitialise les variables, utilise une sous-routine déterminant l'état des variables de contrôle (VACON)(ANNEXE 1), écrit les résultats, vérifie que le système ne sort pas des limites physiques possibles (messages d'erreur) et fait avancer la simulation d'un intervalle de temps jusqu'à la fin de la simulation ( $t_{max}$ ).

### 3.3.2 Procédure de calcul de l'équilibre thermodynamique pour une tranche de temps

Le modèle produit un effet dynamique en faisant évoluer l'état des variables calculées statiquement sur des "tranches" finies de temps.

Le programme provoque cet effet en appelant répétitivement une sous-routine qui évalue l'état du système pour les conditions de la tranche de temps en cours.

La sous-routine de calcul de l'équilibre du système constitue donc le coeur de tout le programme.

La méthode développée consiste d'abord à supposer un débit de vapeur (le résultat de la tranche de temps précédente est utilisé pour initialiser le calcul) qui permet de calculer la masse de liquide contenue dans le réservoir et d'en déduire le niveau d'immersion des électrodes et la conductivité de l'ensemble. Ces résultats servent ensuite à calculer la puissance dissipée pour l'ensemble électrode-liquide conducteur-cathode.

L'équation d'équilibre des énergies est une équation indépendante de la précédente et elle permet de réévaluer le débit de vapeur requis pour obtenir la puissance calculée précédemment. (Note: Cette équation est non - linéaire et l'utilisation d'une méthode de résolution numérique est nécessaire).

La convergence des calculs de débits de vapeur est vérifiée dans le programme principal qui resoumet au besoin un débit de vapeur. Lorsque la convergence est atteinte, les résultats sont imprimés puis la simulation avance d'un pas. (Une copie du programme se retrouve en ANNEXE 4).

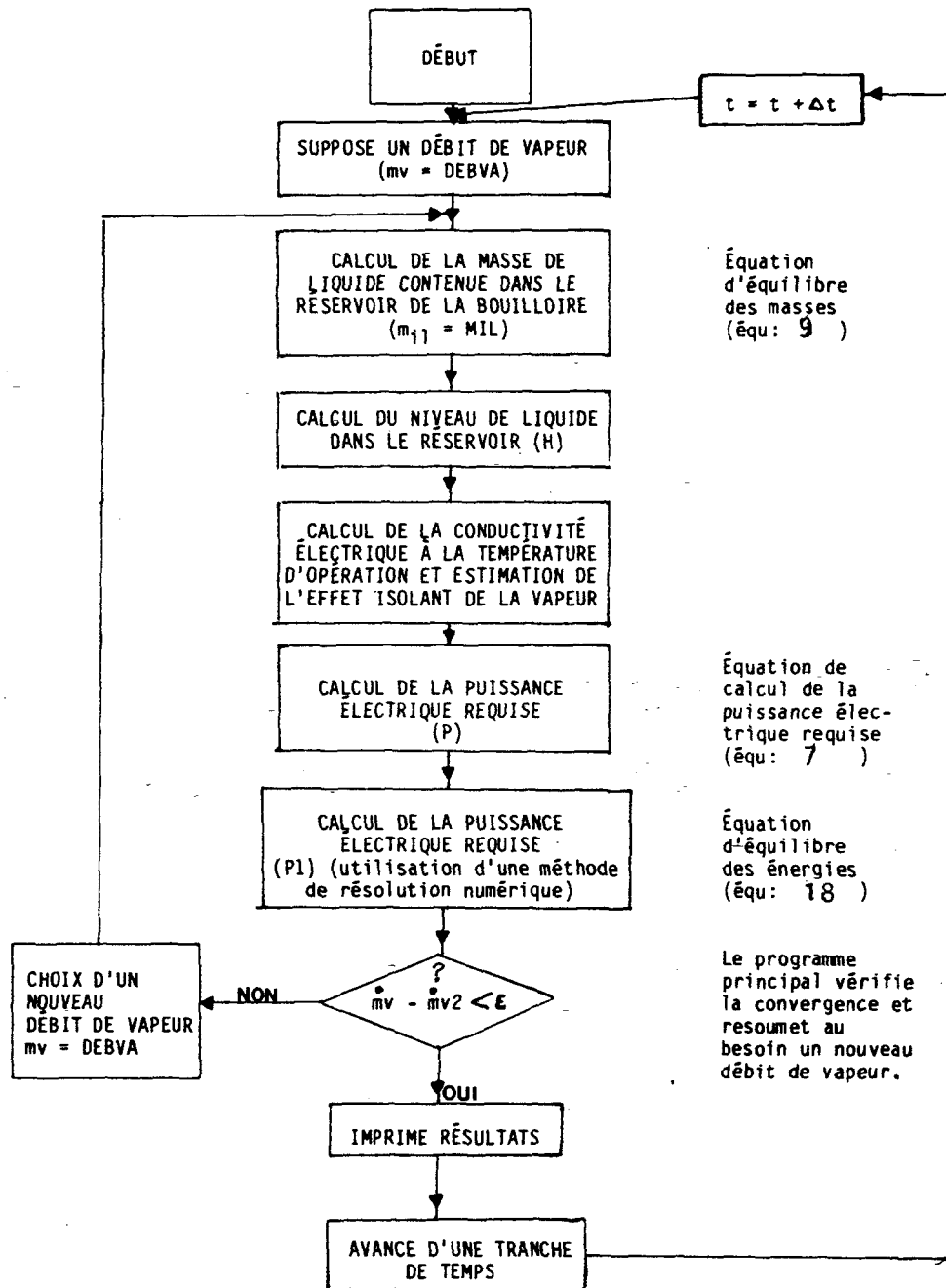


FIGURE 9: Algorithme pour la sous-routine de calculs thermodynamiques pour la bouilloire.

## CHAPITRE IV

### SIMULATIONS ET DISCUSSION

En plus des paramètres géométriques propres à la bouilloire réelle, un modèle théorique doit tenir compte des différents paramètres mathématiques. En particulier, le pas de temps doit être déterminé afin d'assurer une précision suffisante et une optimisation du temps de calcul. La première section de ce chapitre est consacrée à la détermination de ce paramètre.

Par la suite, un exemple de simulation à partir de données typiques moyennes servira à montrer que le modèle peut simuler le comportement dynamique de la bouilloire qui cherche à trouver un régime établi après une perturbation quelconque. Un tel exercice est d'autant plus intéressant qu'il permet d'évaluer, dans les limites des multiples simplifications du modèle, la constante de temps du système-bouilloire.

Le modèle a permis ensuite de prédire le comportement de la bouilloire face à des modes opératoires différents, ce qui a permis de mieux comprendre le fonctionnement interne du système.

Finalement, nous ajoutons quelques remarques sur l'essai d'un amortisseur hydro-statique.

#### 4.1 Détermination du pas de temps

L'observation d'une bouilloire électrique réelle a permis de déterminer que son temps de réaction à des variations de paramètres est habituellement de l'ordre de la minute. De plus, les hypothèses simplificatrices nécessaires au développement du modèle ne permettent pas l'étude significative des phénomènes à la seconde près. Un essai a d'ailleurs été fait avec un pas d'une (1) seconde et il en a résulté une difficulté à obtenir la convergence des différentes méthodes de calcul.

Finalement, une variation avec un pas de temps beaucoup plus élevé que la minute résulte en des calculs non significatifs.

L'intervalle de temps choisi pour tous les essais de simulation est donc la minute.

#### 4.2 Simulation du cas de base

Tous les essais de simulation ont été réalisés à partir de données typiques obtenues sur des bouilloires utilisées à SÉCAL (ANNEXE 6).

Les instruments utilisés à l'usine procurent soit une lecture directe (ex.: la pression d'opération PRESR) ou une valeur cumulative

Dans ce dernier cas, on doit faire la différence pour une période de temps donnée (ex.: un appareil accumule la masse de vapeur produite, le débit est obtenu en divisant la différence de masse obtenue pendant un intervalle de temps par la valeur de cet intervalle).



Les données obtenues par deux bouilloires de même grosseur sont ensuite comparées afin d'obtenir des valeurs typiques significatives. Il est à noter qu'il ne s'agit pas de valeurs instantanées. (Annexe 6)

Ces données (Tableau 1) ont été testées en les gardant constantes dans le modèle programmé afin d'en vérifier le comportement dynamique (Voir remarque (1) à la page suivante)

Ceci a d'abord permis de constater que les valeurs obtenues dans leur ensemble, bien que typiques (42.7 MW calculé par le modèle comparé à 42 MW nominal de l'annexe 6), ne donnaient pas un état d'équilibre. Ce qui est normal puisqu'elles proviennent de sources diverses et n'ont pas toutes été prises en même temps et que certaines représentent des moyennes. Le modèle a bien réagi en calculant puis en ajustant l'état d'équilibre du système (Figure 10) à environ 34 MW. L'équilibre du système pour les autres essais a donc été choisi à  $t=0.2$  hrs environ puisque l'écart avec l'état d'équilibre  $y$  est négligeable pour les essais effectués.

Le taux de variation ainsi que le temps de réponse obtenu ne sont pas significatifs puisqu'ils proviennent du déséquilibre non désiré de l'état des variables entre elles. L'état du modèle devient d'ailleurs par la suite stable.

Ces valeurs à l'équilibre ont servi à fixer les changements qui seront imposés aux variables de contrôle lors des essais suivants.

(1) REMARQUE:

- i) Pour tous les essais,  $\dot{m}_p = \text{constant} = 13\ 600 \text{ (lbm/hr)}$
- ii) En pratique, la conductivité de l'eau dans la bouilloire reste constante par suite de l'effet combiné évaporation/entrée d'eau fraîche. Ce phénomène a été simulé en alimentant à la bouilloire une eau conductrice.
- iii) Une oscillation naturelle du système apparaît lors de variations brusques de niveau. Ceci semble causé par une instabilité du calcul du modèle (ex: figure 10, instabilité au début des courbes de réponse)

Symboles  
utilisés ds

	<u>Variables</u>	<u>le programme</u>	<u>Description</u>	<u>Min-Max</u>	<u>Unités</u>
a. <u>Géométriques:</u> (Réf: dessins de compagnie)	$A_{ivt}$	AIVT	Aire du liqu. ds cath. 972/phase		[po <sup>2</sup> ]
	$A_{iv}$	AIV	Aire du liqu. ds réserv.	5281	[po <sup>2</sup> ]
	$A_e$	AE	Aire tuyau entrée eau	3.1	[po <sup>2</sup> ]
	$A_p$	AP	Aire tuyau sortie purge	3.1	[po <sup>2</sup> ]
	$A_v$	AV	Aire tuyau sortie vapeur	50.3	[po <sup>2</sup> ]
	$\phi_e$	DIA	Diamètre de l'électrode	11.5	[po <sup>2</sup> ]
	$\phi_c$	DIC	Diamètre de la cathode	19.5	[po <sup>2</sup> ]
	$H_{tot}$	HTOT	Hauteur totale de bouil.	12.2	[po <sup>2</sup> ]
	K	K	Volume dôme du réserv.	112662	[po <sup>2</sup> ]
b. <u>Physiques:</u>	E	E	Tension électrique	6500	[Volts]
	$P_e$	PE	Pression eau d'aliment.	200	[PSIG]
	$\dot{m}_e$	DEBEA	Débit eau d'aliment.	140000 - 160000	- [lbm/hr]
	$\dot{m}_p$	DEBPU	Débit eau de purge	13 601	[lbm/hr]
	$\dot{m}_v$	DEBVA	Débit de vapeur	142000	[lbm/hr]
	$P_r$	PRESR	Pression d'opération	150-190	[PSIG]
	$T_e$	TE	Température eau d'alim.	200	[°F]
	$\Omega$	COND	Conductivité à 25°C	250-350	[μmho]
c. <u>Autres:</u> (Limitatifs: ont été déterminés expérimentalement)	$\eta_1$	N1	Max. d'itérations (P)	50	[adim]
	m	M	Max. d'itérations ( $\dot{m}_v$ )	5	[adim]
	$\epsilon$	EPSI	Précision désirée ( $\dot{m}_v$ )	200	[adim]
	$\zeta$	ZETA	Précision désirée (P <sub>2</sub> )	0.1	[adim]

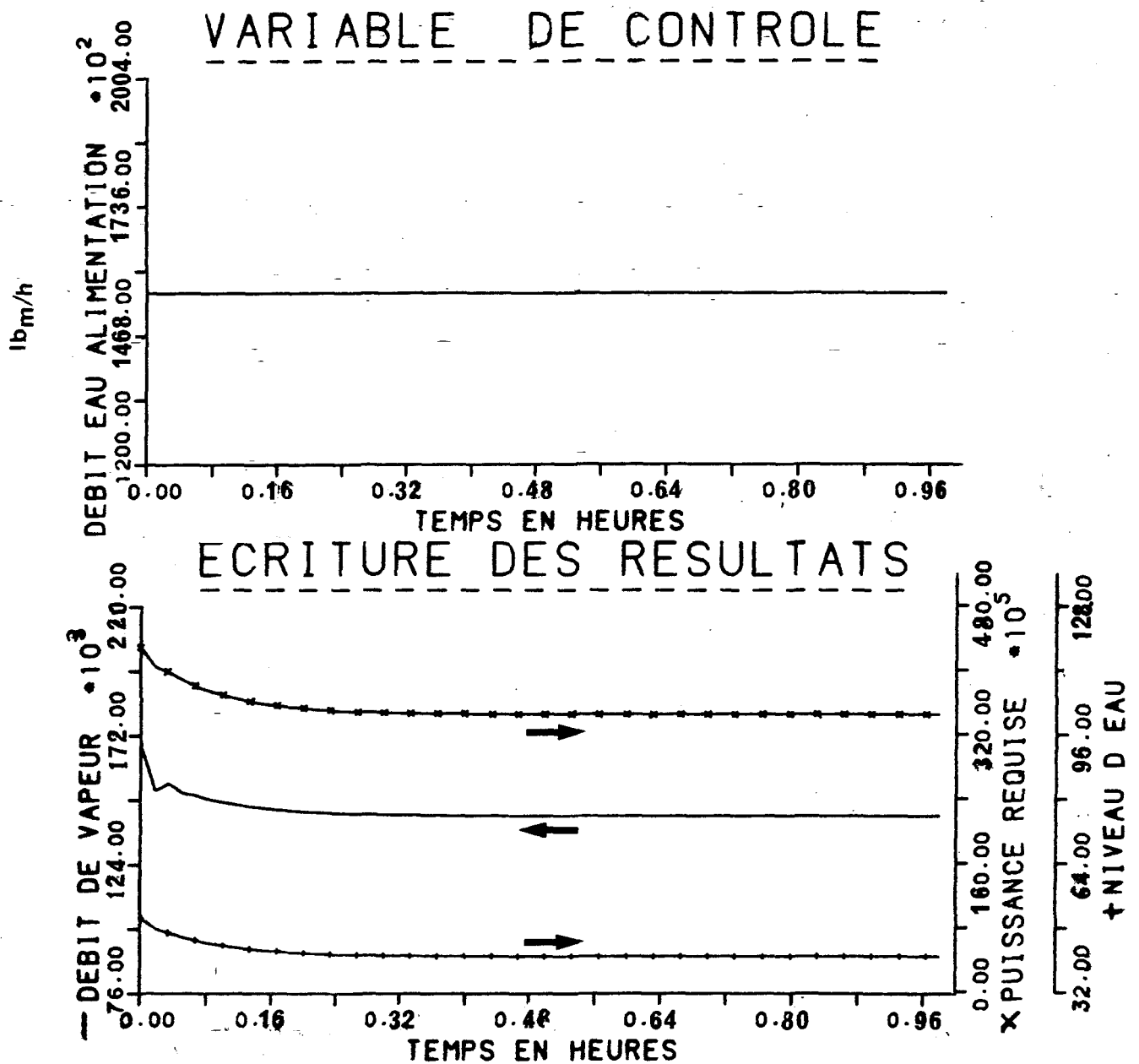
TABLEAU 1: Données typiques utilisées pour les essais de simulation du modèle mathématique de la bouilloire.

FIGURE 10 : Validation du programme de simulation par l'essai des données typiques du fonctionnement d'une bouilloire électrique.

VARIABLES DE CONTRÔLE

(note: pour tous les essais de simulation,  $\dot{m}_p = \text{constant} = 13600 \text{ lbm/hr}$ )

	<u>MIN.</u>	<u>MAX.</u>	<u>UNITÉS</u>
$P_r$ = Pression du réseau	175	----	PSIG
$\sigma_e$ = Conduct. eau alimentation	300	----	$\mu\text{mhos}$
$\dot{m}_e$ = Débit d'eau alimentation	155670	----	lb/hre



### 4.3 Simulation de variations brusques de paramètres de contrôle de l'état de

eaux

L'opération des bouilloires suggère des essais sur le modèle programmé. Les premières stratégies de contrôle de la production de vapeur des électrodes ou la variation de conductivité posent une explication aux instabilités observées lors de variations brusques de pression.

deux types d'essais : comparer deux stratégies de niveau d'immersion. La deuxième vise à produire une instabilité lors de variations brusques de pression.

Rappelons que les bouilloires sont des systèmes à retard. De telles simulations sont rendues nécessaires pour valider les mesures.

pression et que de telles simulations sont rendues nécessaires pour valider les mesures.

Les essais avec le modèle réduits ont permis de confirmer certaines des conclusions.

permis de confirmer certaines des conclusions.

#### 4.3.1 Simulation de la variation brusque de l'eau d'alimentation

On utilise d'abord le modèle pour simuler une forte variation du débit d'eau d'alimentation au système, en gardant les autres paramètres constants. La figure no 11 illustre cet essai.

cas de base. Une forte variation du débit d'eau d'alimentation au système, en gardant les autres paramètres constants. La figure no 11 illustre cet essai.

La constante de temps du système est d'environ 8 minutes. (Variation de 100% du débit d'eau d'alimentation)

à l'équilibre est d'environ 8 minutes. (Variation de 100% du débit d'eau d'alimentation)

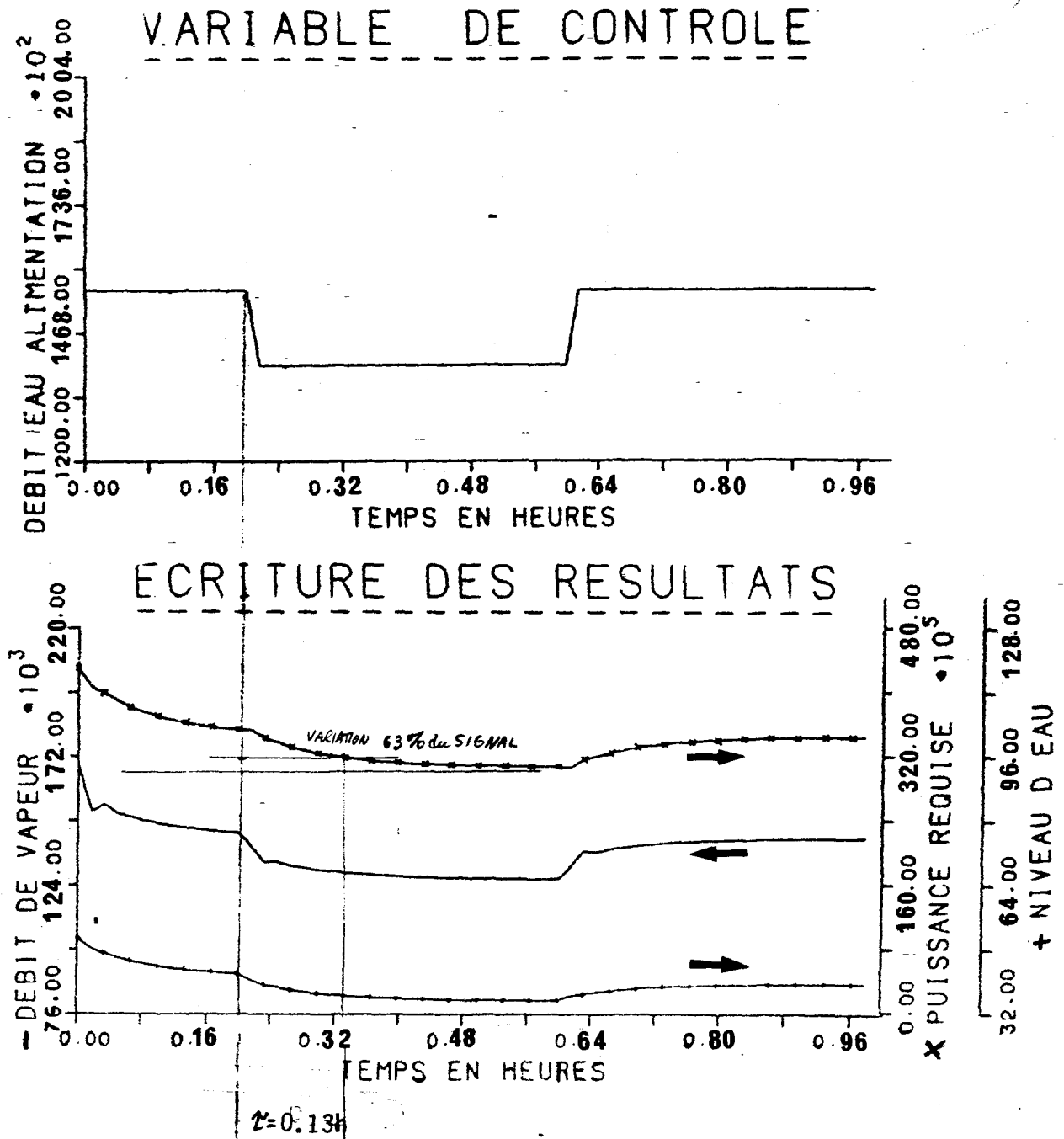
La variation de production de vapeur est proportionnelle puisqu'elle est fonction du niveau d'immersion et varie graduellement de près de 10% pour un écart de niveau brusque d'environ 10 pouces qui constitue la conséquence d'un changement important de débit (ceci étant susceptible d'arriver dans un contrôle réel). Le contrôle de la production de la vapeur ainsi obtenu est donc plus stable et n'a pas tendance à être en déséquilibre.

Le contrôle de la production de la bouilloire peut donc se faire de façon efficace par le contrôle du débit de l'eau d'alimentation (donc du niveau de liquide à l'intérieur de la bouilloire) et demeure en elle-même sécuritaire par son temps de réponse.

FIGURE 11 : Variation négative du débit d'eau d'alimentation

VARIABLES DE CONTRÔLE

	<u>MIN.</u>	<u>MAX.</u>	<u>UNITÉS</u>
$P_r$ = Pression du réseau	175	----	PSIG
$U_e$ = Conduct. eau alimentation	300	----	$\mu$ mhos
$m_e$ = Débit d'eau alimentation	130 000	155670	lb/hre



#### 4.3.2 Simulation de la variation brusque de la conductivité de l'eau d'alimentation

Comme pour l'essai précédent, le modèle reproduit au début le cas de base. Une forte variation de la concentration de l'eau d'alimentation (de 300  $\mu\text{mho}$  à 350  $\mu\text{mho}$ ) est imposée ensuite instantanément au système en gardant les autres paramètres inchangés. La figure no12 illustre cet essai.

La constante de temps du système pour revenir à l'équilibre est encore d'environ 8 minutes.

On remarque que suite à la variation brusque de la conductivité, le débit de vapeur varie, puis revient graduellement près de son niveau initial de production. La variation de la conductivité semble donc avoir peu d'influence sur la production de vapeur à l'équilibre.

Ceci peut s'expliquer par le réajustement du niveau d'eau qui augmente ou diminue inversement aux variations de conductivité en compensant l'effet de celle-ci.

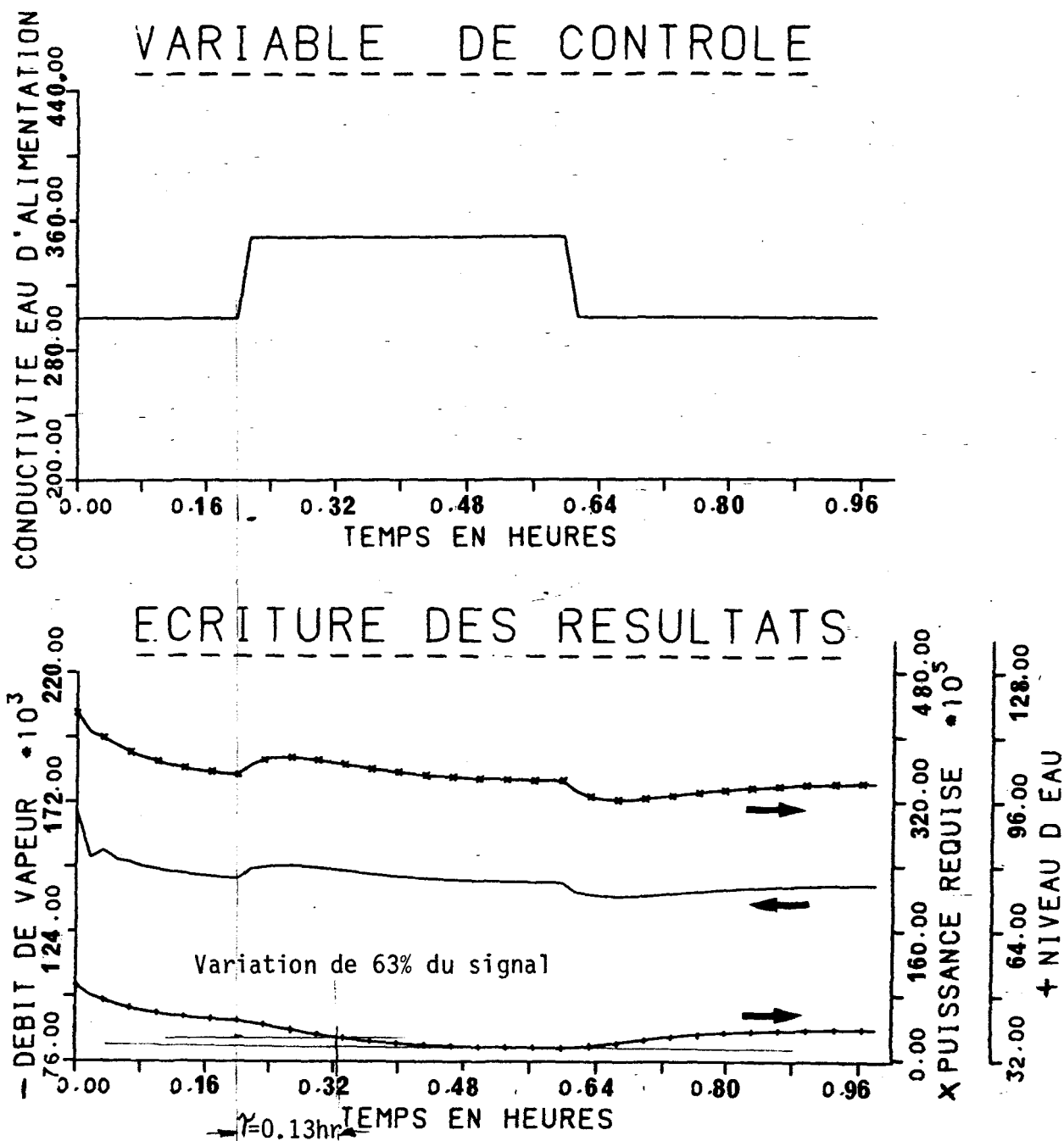
De plus, les essais sur modèle réduit ont permis de constater que l'injection de liquide hautement conducteur localement au centre des électrodes produit une réaction violente instantanée causée par une baisse rapide du point d'ébullition et en même temps d'une forte augmentation de la conductivité. Ceci ne peut être perçu par le modèle mathématique qui suppose un mélange uniforme instantané. Il est à remarquer que le modèle réduit a servi à des expériences à pression atmosphérique mais que les conclusions sont suffisamment significatives pour être extrapolées à la pression d'opération de la bouilloire (environ 195 psig).



FIGURE 12 : Variation positive de la conductivité de l'eau d'alimentation

VARIABLES DE CONTROLE

	<u>MIN.</u>	<u>MAX.</u>	<u>UNITES</u>
$P_r$ = Pression du réseau	175	---	PSIG
$v_e$ = Conduct. eau alimentation	300	350	$\mu\text{hos}$
$M_e$ = Débit d'eau alimentation	155670	---	lb/hre



#### 4.3.3 Essai de variation brusque de la pression d'opération du réseau

Les fermetures et ouvertures rapides des valves de contrôle du réseau causent des instabilités aux bouilloires.

Le modèle mathématique a été amené à l'équilibre puis une variation brusque de la pression de vapeur (conséquence d'une fermeture brusque de valve de contrôle en aval de la bouilloire) a été imposée (FIGURE 13).

Il est proposé comme explication que la pression, en augmentant, cause une diminution du volume (isolant) occupé par la vapeur dans le liquide, augmentant de ce fait la puissance tirée donc la production de vapeur.

En même temps, cette augmentation de production de vapeur modifie l'équilibre en masse du système et cause une baisse de niveau, diminuant ainsi la puissance tirée et, partant, le débit de vapeur, ce qui cause des fluctuations.

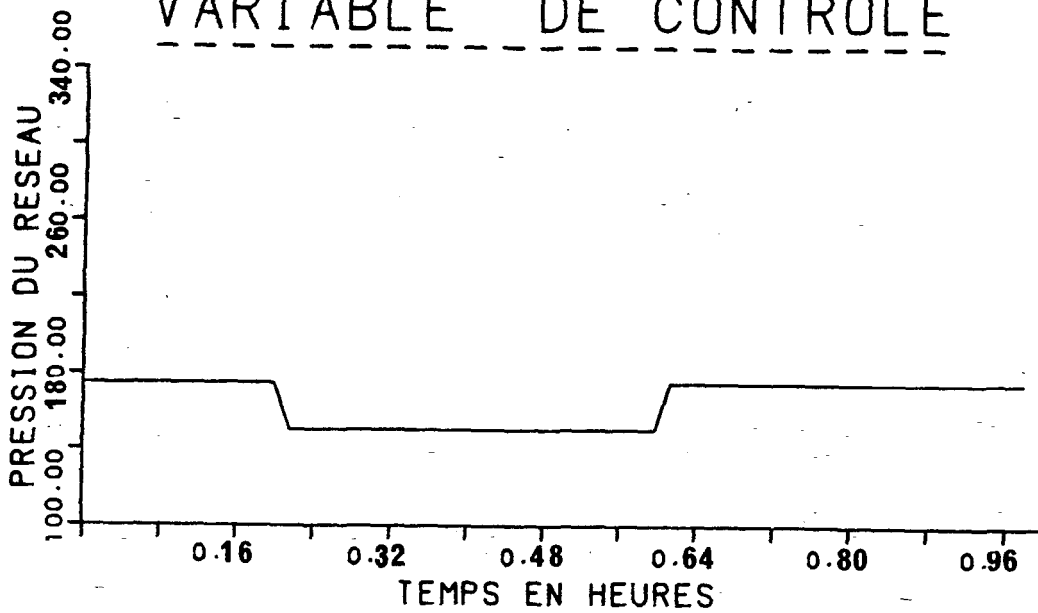
On peut donc supposer que ce problème est inhérent au fonctionnement des bouilloires.

FIGURE 13: Variation négative de la pression du réseau

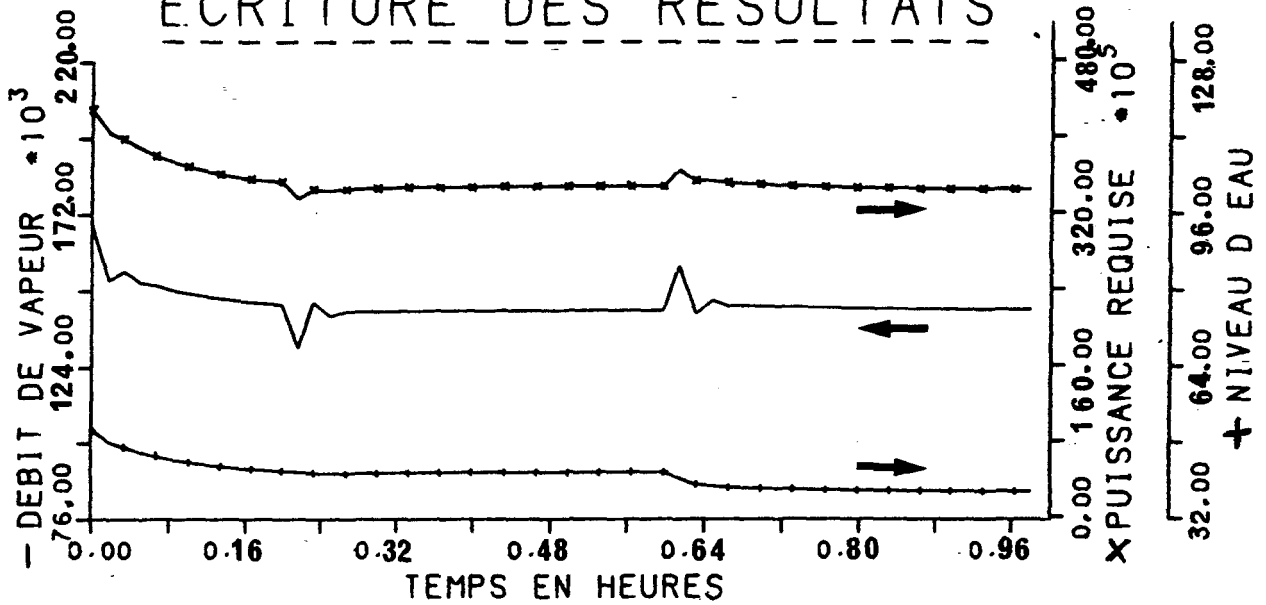
VARIABLES DE CONTROLE

	<u>MIN.</u>	<u>MAX.</u>	<u>UNITES</u>
$P_r$ = Pression du réseau	140	175	PSIG
$v_e$ = Conduct. eau alimentation	300	---	$\mu$ mhos
$M_e$ = Débit d'eau alimentation	155670	---	lb/hre

VARIABLE DE CONTROLE



ECRITURE DES RESULTATS



#### 4.3.4 Essai d'une chambre de compensation

Les oscillations causées par la variation brusque de la pression du réseau est un problème sérieux lors de l'opération de ces bouilloires (essai précédent).

L'utilisation d'un amortisseur statique constitué d'une chambre de compensation fermée reliée au bas de la bouilloire a été simulée sur le modèle programmé.

Le comportement de la bouilloire s'est avérée davantage instable qu'au départ: la variation de la température et de la pression de l'eau de la bouilloire ferait soit déborder celle-ci ou la vider dépendant des conditions de départ de l'amortisseur.

Cette solution n'est donc pas à recommander sans modification majeure.

## CONCLUSION

### A. CONCLUSIONS SUR LES ESSAIS:

L'utilisation des modèles réduits et mathématiques pour réaliser des essais de modes opératoires permet de conclure que le contrôle du débit d'eau d'alimentation (donc du niveau d'immersion des électrodes) serait la meilleure façon de contrôler la production de vapeur de la bouilloire.

Cependant, la possibilité de variations brusques de pression, et partant d'instabilités, limite la flexibilité requise pour un tel contrôle. Par exemple, si le niveau est élevé, une baisse brusque de pression pourrait faire déborder la bouilloire.

L'utilisation d'une chambre de compensation statique en parallèle avec le réservoir ne semble pas pratique mais il serait peut-être pensable d'essayer un amortisseur pneumatique en série entre la bouilloire et le réseau pour absorber les variations.

De plus, l'injection directe de produit conducteur par l'arrivée d'eau au centre des trois électrodes constitue une cause d'instabilité pouvant être dangereuse. L'admission d'eau doit demeurer à cet emplacement afin de s'assurer du refroidissement des électrodes et de la circulation (donc du mélange) du liquide contenu dans le réservoir. Cependant, l'injection de liquide conducteur pourrait se faire sur la circonférence du réservoir afin de permettre un mélange plus graduel du liquide avant

qu'il n'arrive entre les électrodes et la cathode. Le niveau à l'intérieur s'ajusterait et devrait donc être aussi contrôlé.

## B. CONCLUSIONS SUR LA MODÉLISATION

Les deux simulations reflètent de façon adéquate, pour les besoins de l'étude, la réalité.

Celles-ci ont permis d'avancer des explications sur certains phénomènes rencontrés en usine.

Les deux modèles aident conjointement à mieux comprendre ce qui se passe dans les bouilloires électriques à électrodes immergées.

Le modèle mathématique permet d'estimer l'effet de modifications à l'équipement à peu de frais et sécuritairement.

## RECOMMANDATIONS SUR LE MODÈLE:

En général, il est recommandé de:

1. Perfectionner la simulation afin de considérer:
  - des états transitoires pour tenir compte des gradients de température causés par la recirculation du mélange et/ou à la variation de conductivité;
  - de la variation de la conductivité interne de l'eau en fonction de l'évaporation;
  - de l'interaction des trois (3) électrodes;
  - de la production de vapeur aléatoire inégale des trois (3) électrodes et de l'usure de celles-ci.
  - de la circulation et du mélange de l'eau dans la bouilloire.
  
2. Utiliser la simulation telle quelle ou améliorée pour trouver une solution aux instabilités causées par les variations brusques des paramètres de contrôle (en particulier la pression d'opération).

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] ANDRIEUX, A., Une chaudière électrique fait marcher une papeterie à toute vapeur, 3e utilisation. no 515, 29 octobre 1984, pp. 19-20.
- [2] BURGHARDT, D.M., Engineering thermodynamics with applications, ED. Harper & Row, 1978, N.Y., U.S.A.' pp. 70-101.
- [3] DOBIE, W.C., Economic case for electric boilers systems applied to industrial processes, 30 May 1984, University of Aston in Birmingham.
- [4] ELLIS, R.S., Mains frequency induction steam generators, ibidem. 1982.
- [5] GISHKARIANY, G., The role of electric steam generation for commerce and industry in the present day energy climate, Electric energy conference, Sydney, 13-17 October 1980, pp. 224-228.
- [6] GRAHAM, F.D., Audel Power plant engineer guide, Ed. Audel, pp. 28-29. 1945.
- [7] HAVLICEK,  
JAROSLAW,  
MISKOWSKY, Versuche des ....., Helvetica Physica, Acta, 9, 161, 1936.
- [8] HEIL, T.J.  
LEATHAM, C.H., Electric boilers up to 175,000 pounds per hour: available designs and current application, Proceeding of the American Power Conference, Volume 39, 1977.
- [9] HORSLEY, M.E., Electrode steam and hot water boilers, ibidem [3] DOBIE.
- [10] KEENAN, J.-H., Thermodynamic properties of steam, 1st Ed., John Wiley & Sons Inc. USA 1948.
- [11] LAMBERT, P.T., Installation engineering topics of high voltage electrode type boilers, 70th annual meeting of the technical section of the Canadian Pulp & Paper Association, 1984.
- [12] LANGE, Handbook of chemistry, 11th Edition, 1973.
- [13] LANGEVIN, J.R., High-voltage electric boilers ibidem [11] LAMBERT
- [14] LORENZI, O., Electric steam generators, Combustion Engineering, N-Tork, 1947, pp. 17-1 to 17-10.
- [15] MALKIN, B.A., Electric steam generators in Canada, Paper for ASME, January 12, 1932, Dominion Engineering Works Ltd.
- [16] NATH, R.,  
HOLLIDAY, J.F., Optimising a process plant utility system, mechanical Engineering, February 1985, pp. 44-50.



- [17] OSBORNE, N.S., STIMSON, H.F., GINNINGS, D.C. Steam research at the bureau of standards, National Bureau of Standard, Washington, D.C., March 1935.
- [18] PARSON, Conductance in dilute aqueous solutions, from Handbook of electrotechnical constants, Academic press/butterworths, 1959.
- [19] PERETZ, R., Project chance, 5e journée internationale de calcul analogique, pp. 834-848. 1967.
- [20] PERRY, R.H., CHILTON, C.H. Chemical's engineers handbook, 5th Ed., McGraw Hill Book Co., N.Y.
- [21] REASON, J., How electrode boilers can cut the cost of steam generation, Power, May 1984, pp. 87-89.
- [22] ROHSENOW, W.M., Handbook of heat transfer, McGraw Hill, N.Y. 1973.
- [23] ROSENTHAL, S., Electrical conductivity measurement, pp. 6-116.
- [24] SCHWIEGER, B., A special report - Industrial boilers: What's happening today Part II, Power, February 1978, vol. 122, no 2.
- [25] STOA, T.A., Formulas estimate data for the dry saturated steam, Chemical engineering, December 10, 1984, p. 97.
- [26] STUCHELI, A., Economic application of electric boilers for steam and hot water supplies, Sultzer technical review 2/1975, pp. 103-111.
- [27] TAFT, C.W., Microprocessor based boiler controls - a user's perspective, Southern Co. Services Inc., Birmingham, Al.
- [28] TRUMAN, S.L., Temperature dependance and measurement of resistivity of pure water, Corp. Res. Center, Foxboro, Mass 02035, Am. Chem. Soc. 1984.
- [29] UNILOC INC. Conductance measurement theory & application, Publication, Irvine California, 1970-1976.
- [30] VAN VLACK, L.H., Materials science for engineers, Addison-Wesley Publishing Company, 1970, Canada, p. 1-3.
- [31] WALLACE, W.D., Field performance of steam and hot water electric boilers, IEEE transaction of industry applications, vol. IA-10, no 6, Nov-Dec. 1974, pp. 761-769.
- [32] WELTY, J.R., Fundamentals of momentum, Heat and Mass transfer, 2nd ed., J. Wiley & Sons, N.Y., 1969, pp. 77-83.

- [33] WEAST, R.C.      CRC Handbook of Chemistry and Physics, 65e Ed., CRC Press, USA. 1984.
- [34] Anonyme      Bouilloires électriques, Consolidated Bathurst.
- [35] Anonyme      Conditioning water for boilers, Nalco Chemical Co., 1962, USA, p. 8.
- [36] Anonyme      Drum level transmitter calibration constant pressure, Foxboro, WS-DLT, May 20, 1976.
- [37] Anonyme      Electric steam generator, Dominion Engineer, December 1946, Vol. XIII, no 12  
(Plus notes diverses documentation Alcan)
- [38] Anonyme      Steam its generation and use, The Babcock & Wilcox Co., 1955, N.Y., USA, p. 9-8.

## ANNEXE I

### SOUS-ROUTINE DE CALCUL DES VARIABLES DE CONTROLE

#### I. Choix d'une méthode de programmation

Le modèle n'a d'intérêt que si l'on peut varier la valeur des variables de contrôle dans le temps et en étudier les conséquences.

Quatre (4) formes possibles de signal de contrôle ont été définies:

CODE 0: Constante

1: Variable avec une augmentation subite (step)

2: Variable avec une augmentation rampe

3: Variable sinusoidale

Il faut déterminer au départ le comportement que devra avoir ces signaux, puis à chaque tranche de temps, une sous-routine évalue l'état de la variable.

Le transfert de données du programme principal à la sous-routine aurait pu se faire de façon matricielle, chaque ligne représentant une variable de contrôle; cependant, il aurait fallu une liste pour expliquer ce que représente chaque variable, rendant la programmation moins facile à suivre (par exemple:  $X(i,j)$  pour toutes les données). Ceci aurait cependant réduit le nombre d'utilisations nécessaires du CALL, diminuant ainsi le temps de calcul.

L'utilisation de variables représentatives a été préférée. Celles-ci, dans le programme principal "appellent" la sous-routine à tour de rôle et l'utilisent à leur tour.

Cette sous-routine se doit d'être utilisable pour toutes les variables.

Cinq (5) caractéristiques sont nécessaires pour utiliser la sous-routine:

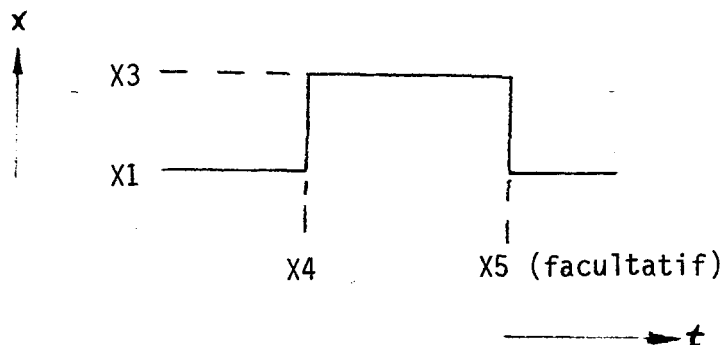
1. Condition initiale (ou valeur minimum)
2. Type de fonction (chiffre de 0 à 3 inclusivement)
3. Valeur maximale
4. Temps de départ de la fonction (facultatif)
5. Temps d'arrêt de la fonction (facultatif)

Ces cinq (5) valeurs permettent donc de produire un signal de contrôle qui sera de la forme définie par le code 2, dans les limites d'amplitude fixées par les codes 1 et 3 et de temps des codes 4 et 5.

Par exemple, on pourra simuler tout aussi bien la fermeture d'une valve du réseau de vapeur par une fonction échelon qu'une conductivité oscillatoire de l'eau d'alimentation par la sinusoïde.

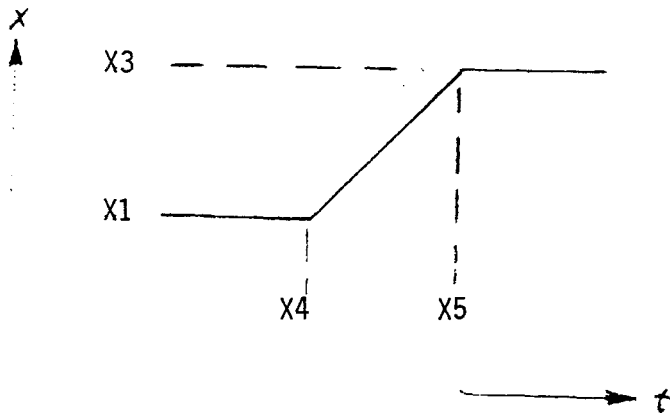
Soit  $X_1$  une des caractéristiques de la variable de contrôle  $X$ , on aura pour différents  $X_2$  (le type de fonction tel que défini au début de 0 à 3 incl.)

a. Fonction échelon:



$$\begin{aligned} \text{où: } X &= X_1 \text{ si } t < X_4 \\ X &= X_3 \text{ si } X_4 < t < X_5 \\ X &= X_1 \text{ si } X_5 < t \\ &\text{(facultatif)} \end{aligned}$$

b. Fonction linéaire:



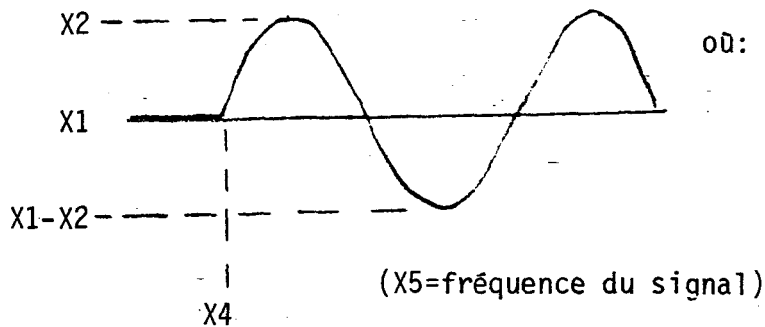
où:  $X=X1$  si  $t < X4$

$$X=X1 + \frac{(X3-X1)}{(X5-X4)} \cdot (t-X4)$$

si  $X4 < t < X5$

$X=X3$  si  $X5 < t$

c. Fonction sinusoïdale



où:  $X=X1$  si  $t < X4$   
(initialisation obligatoire)

$$X=X1 + X2 \sin((2\pi X5)(t-X4))$$

si  $X4 < t$

2. Programmation

La valeur des variables de contrôle est calculée suivant la forme choisie par la sous-routine (VACON) avant chaque calcul d'une tranche de temps (figure 14).

La sélection de conditions exclusives ainsi que de fonctions simples a permis de simplifier au maximum la programmation (figure 15).

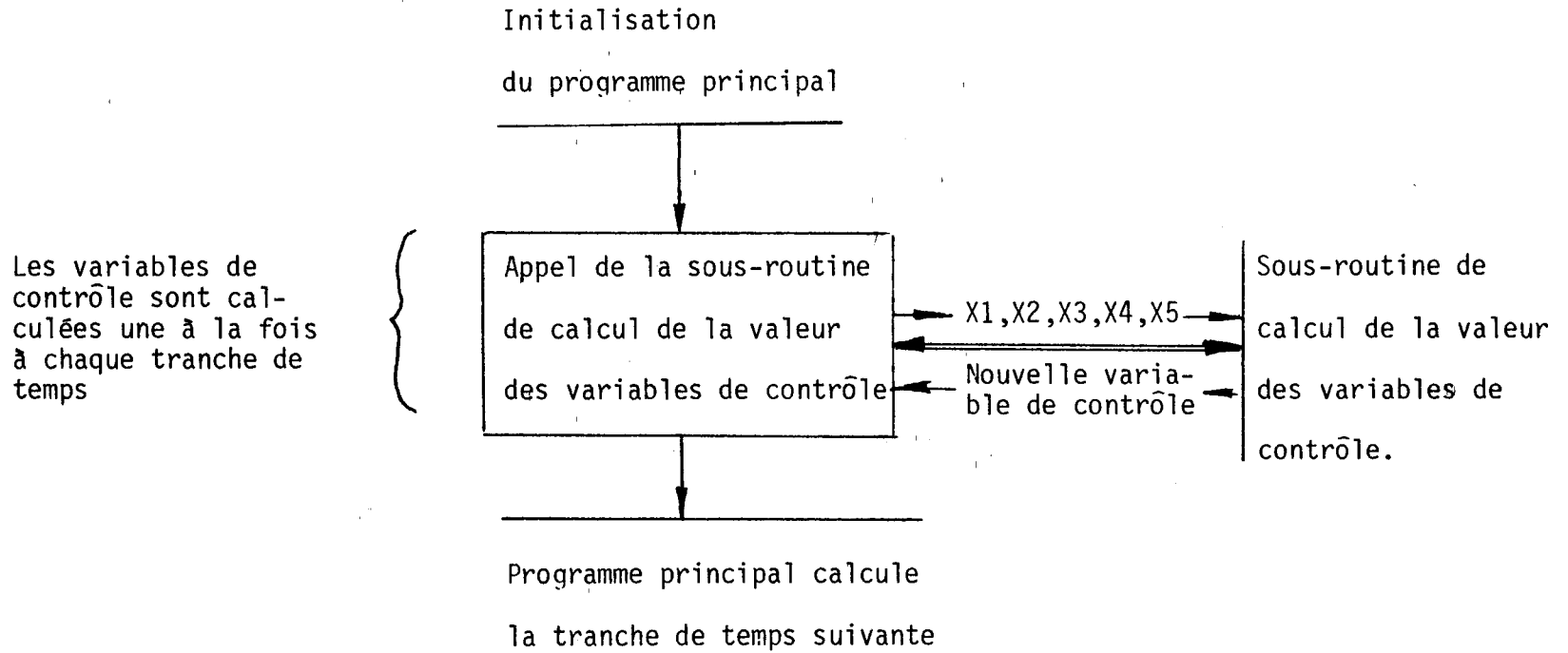
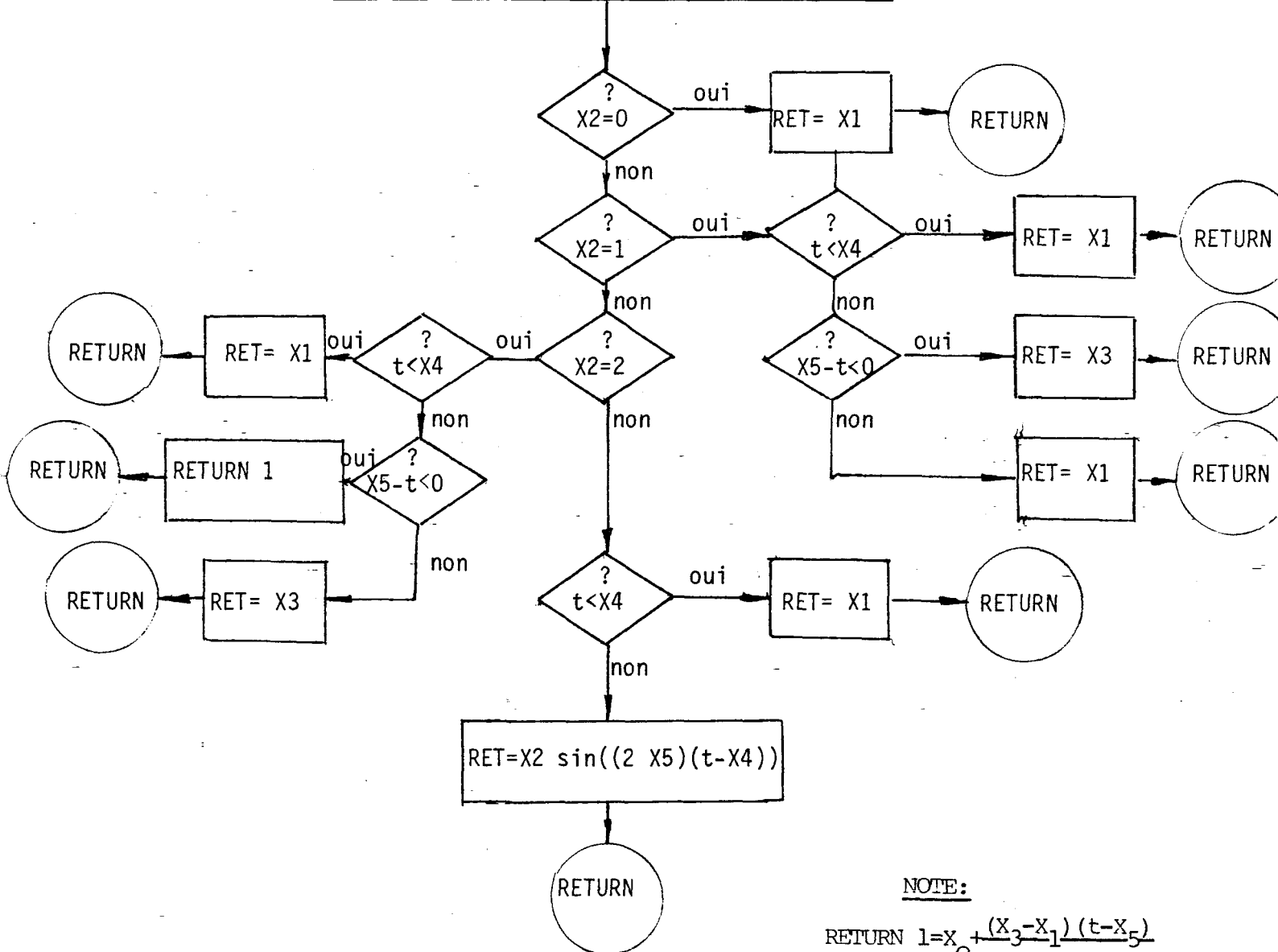


FIGURE 14: Utilisation de la sous-routine de calcul des variables de contrôle dans le programme principal.

SUBROUTINE(X1,X2,X3,X4,X5,t,RET)



NOTE:

$$\text{RETURN 1} = X_0 + \frac{(X_3 - X_1)(t - X_5)}{(X_5 - X_4)}$$

FIGURE 15: Logigramme de sous-routine de calcul de la valeur des variables de contrôle (VACON)

## ANNEXE 2

### SOUS-ROUTINES DE CALCUL DES TABLES

#### DE VAPEUR ET DE LIQUIDE COMPRIME

##### 1. Choix d'une méthode de programmation

Pour une pression donnée du réseau ( $P_r = \text{PRESR}$ ), la bouilloire produit de la vapeur saturée.

Les caractéristiques de celle-ci ainsi que du liquide à cette pression, sont utilisées pour les calculs d'équilibre de la bouilloire.

Le calcul sera effectué par une sous-routine qui sera appelée au besoin. Celle-ci peut être construite de deux (2) façons:

- a. La sous-routine procède à l'interpolation de données tirées d'un fichier à deux (2) dimensions où sont tabulées toutes les caractéristiques de la vapeur en fonction de la pression.
- b. Utiliser des équations donnant une bonne approximation des valeurs (tableau 2).

##### 2. Sélection des équations et précision

Les équations retenues pour la programmation sont celles proposées par Stoa (25,1984) pour  $T$ ,  $v_v$ ,  $h_v$  (fiabilité supérieure à 99%) ainsi que deux (2) relations développées par lissage de courbe pour  $h_l$  et  $h_{\text{eau comprimée}} (h_{ea})$ , qui ont respectivement une fiabilité de l'ordre de 94% et 97%.



TABLEAU 2 : Equations disponibles pour les tables de vapeur.

VARIABLE	EQUATION REF. KEENAN	EQUATION REF. STOA	EQUATION REF. BURGHART	AUTRE
T=f(P)		14 ≤ P ≤ 1000; R=0.9999 T=exp(0.22187ln(P)+4.7692)		
P=f(T)	(X=T-TC) (°C) (valide 50<T<374.11) $\log\left(\frac{Pe}{P}\right) = \frac{X}{T} \left( \frac{a+bX+cX^2+eX^4}{1+dX} \right)$			
v <sub>l</sub> (ou v <sub>lSAT</sub> )	$v_{lSAT} = \frac{v_l + ax^{1/3} + bx + cx^2}{1 + dx^{1/3} + ex}$			
v <sub>v</sub>		14 ≤ P ≤ 1000; R=0.9998 v <sub>v</sub> = exp(-0.96534ln(P)+5.92414)		(ref:Havlicek,p.198) $v_v = \frac{RT}{P} \left[ a + b\left(\frac{P}{10^6}\right) + c\left(\frac{P}{10^6}\right)^4 \right]$
h <sub>l</sub> (ou h <sub>lSAT</sub> )	(δ = à déterminer) $h_l = m - \frac{n}{P} + \frac{1000 \cdot \delta}{P} + \delta$			(1)(R=0.9994) h <sub>l</sub> = -21.4+104.86ln(P)-... ...16.5(ln(P)) <sup>2</sup> +1.91(ln(P)) <sup>3</sup>
h <sub>v</sub> (ou h <sub>v</sub> l)		14 ≤ P ≤ 200; R=0.9901 h = exp(-0.05527ln(P)+7.04047) P ≤ 1000; R=0.9903 h = exp(-0.16159ln(P)+7.61522)		
C <sub>p</sub> (T)	(P=cte=1 atm) C <sub>po</sub> =1.4720+7.5560*10 <sup>-4</sup> T + ...47.8365 T		(P=cte=1 atm) C <sub>po</sub> =19.86- $\frac{597}{\sqrt{Te}}$ + $\frac{7500}{Te}$	(ref:Havlicek,p.201) C <sub>po</sub> =0.4402+0.0095(T/100)+... ...0.00072(T/100) <sup>2</sup>
h <sub>ea</sub>				(valide pour l'eau comprimée de 20 psia à 900 psia, 32°F à 300°F)(1) h <sub>ea</sub> = ((m.P)-(n.P+0.0005)(T-32))+h <sub>lSAT</sub>

(1): Ces équations ont été développées par lissage de courbe lors de la présente recherche.

### 3. Programmation

La vapeur saturée et l'eau comprimée réfèrent à deux (2) états de l'eau et sont programmés dans deux (2) sous-routines distinctes:

1. TVAP: calcul des variables décrivant l'état de la vapeur saturée (figure 16).
2. EEA: calcul des variables décrivant l'état de l'eau comprimée (figure 17).

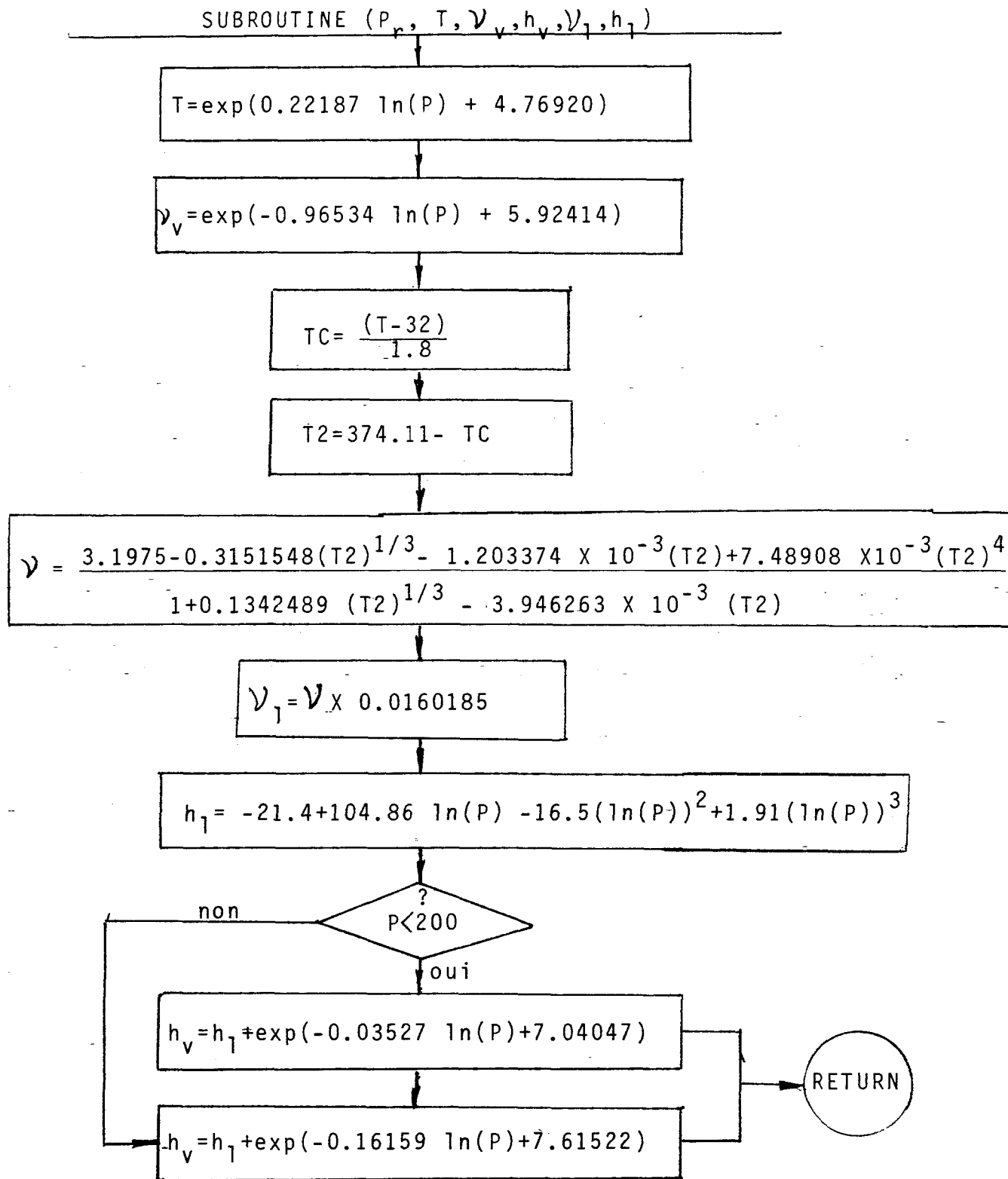


FIGURE 16: Logigramme de la sous-routine TVAP de la vapeur saturée

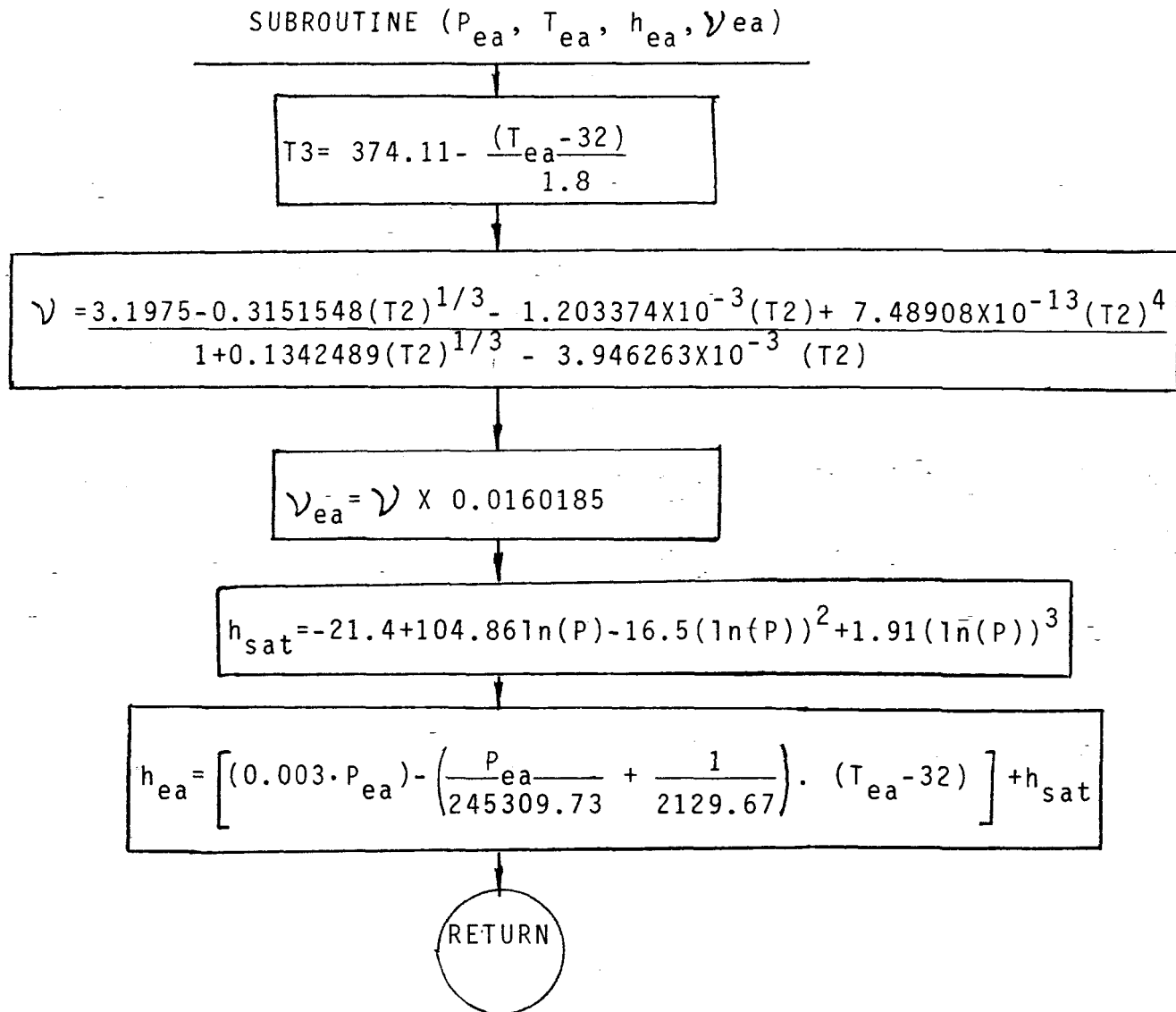


FIGURE 17: Logigramme de la sous-routine EEA de l'eau d'alimentation

### ANNEXE 3

#### SOUS-ROUTINE DE MODELISATION

#### D'UNE BOUILLOIRE ELECTRIQUE (CATR)

##### 1. Relations théoriques

Trois (3) équations d'équilibre sont requises pour décrire le système:

- a. Equation d'équilibre de masse
- b. Equation d'équilibre d'énergie
- c. Equation d'état du système (détermine la puissance tirée)

Ces trois équations ont été développées à la section 3.2 :

##### a. Equilibre de masse

$$m_{il} = m_{il/t} + (\dot{m}_e/t \cdot \Delta t) - (\dot{m}_v/t + \dot{m}_p/t) \cdot \Delta t \quad \text{EQUATION 9}$$

##### b. Equation d'équilibre d'énergie

$$P_e = \left[ m_v \left( \frac{v^2}{2} + gh_{tot} + 25056 h_v \right) + m_p \left( \frac{v_p^2}{2} + 25056 h_p \right) + \dots \right]$$

$$\dots m_e \left( \frac{v_e^2}{2} + 25056 h_e \right) + \frac{A - A/t}{\Delta t} \div 85197 \quad \text{EQUATION 18}$$

##### c. puissance requise par le système

$$P = E^2 \left( \frac{w_t (1 - \text{PROPV})}{10^6} \right) \times 2 \times \pi \times H \cdot \frac{1}{\ln \left( \frac{D/C}{D/A} \right)} \quad \text{EQUATION 7}$$

## 2. Choix d'une méthode de programmation

L'approche utilisée pour la programmation (section 1.1.2) implique trois (3) étapes:

- a. Supposition d'un débit de vapeur ( $\dot{m}_v$ ) produit.
- b. Calcul à partir de cette donnée de la puissance tirée.
- c. Déduction à partir de l'équation (18) d'équilibre d'énergie, du débit de vapeur.

Le débit ainsi obtenu est comparé à celui supposé au départ, modifié et le processus est recommencé jusqu'à ce qu'il y ait convergence.

Une seconde boucle de convergence apparaît de façon accessoire dans l'évaluation de l'équation d'équilibre d'énergie (18).

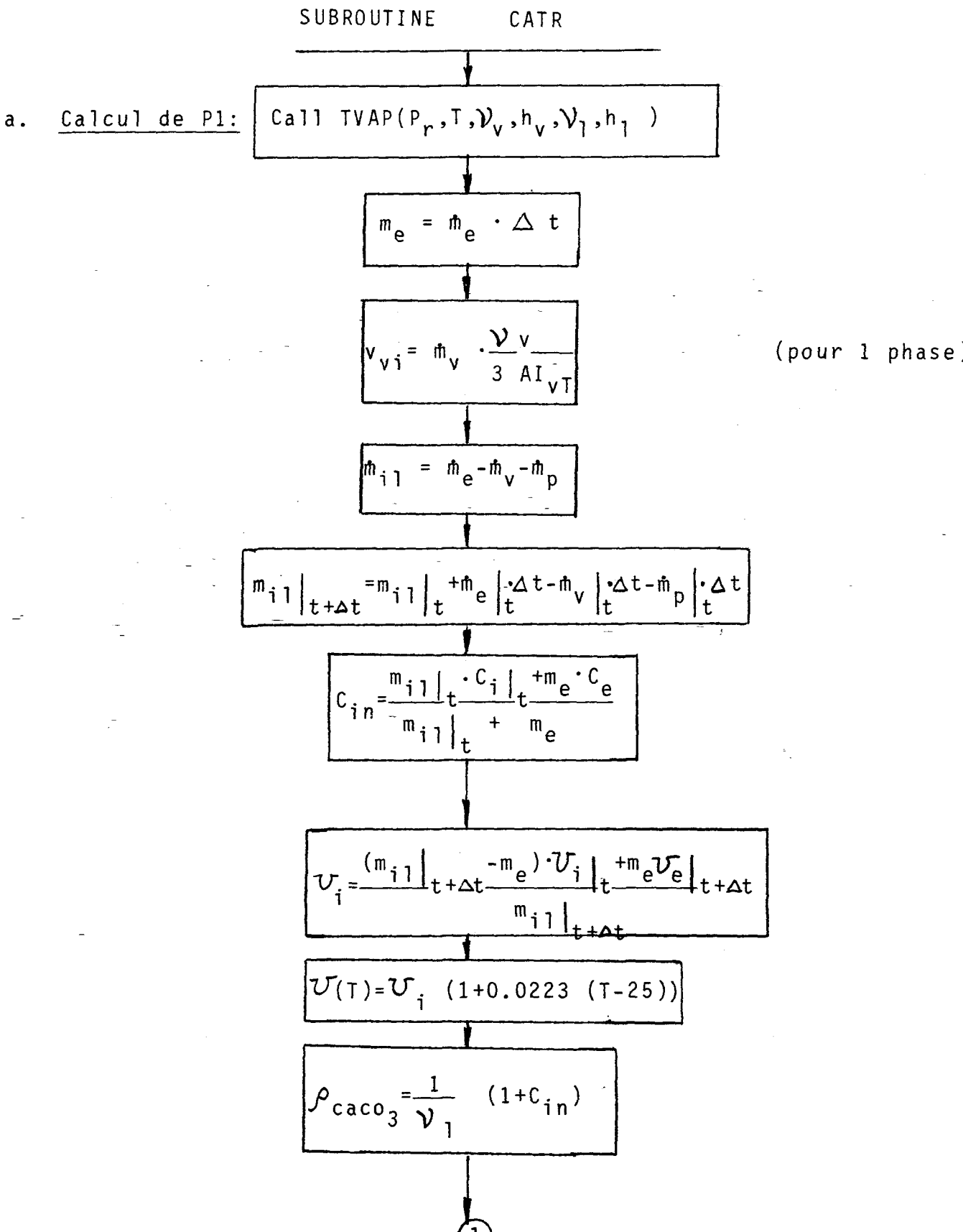
## 3. Programmation

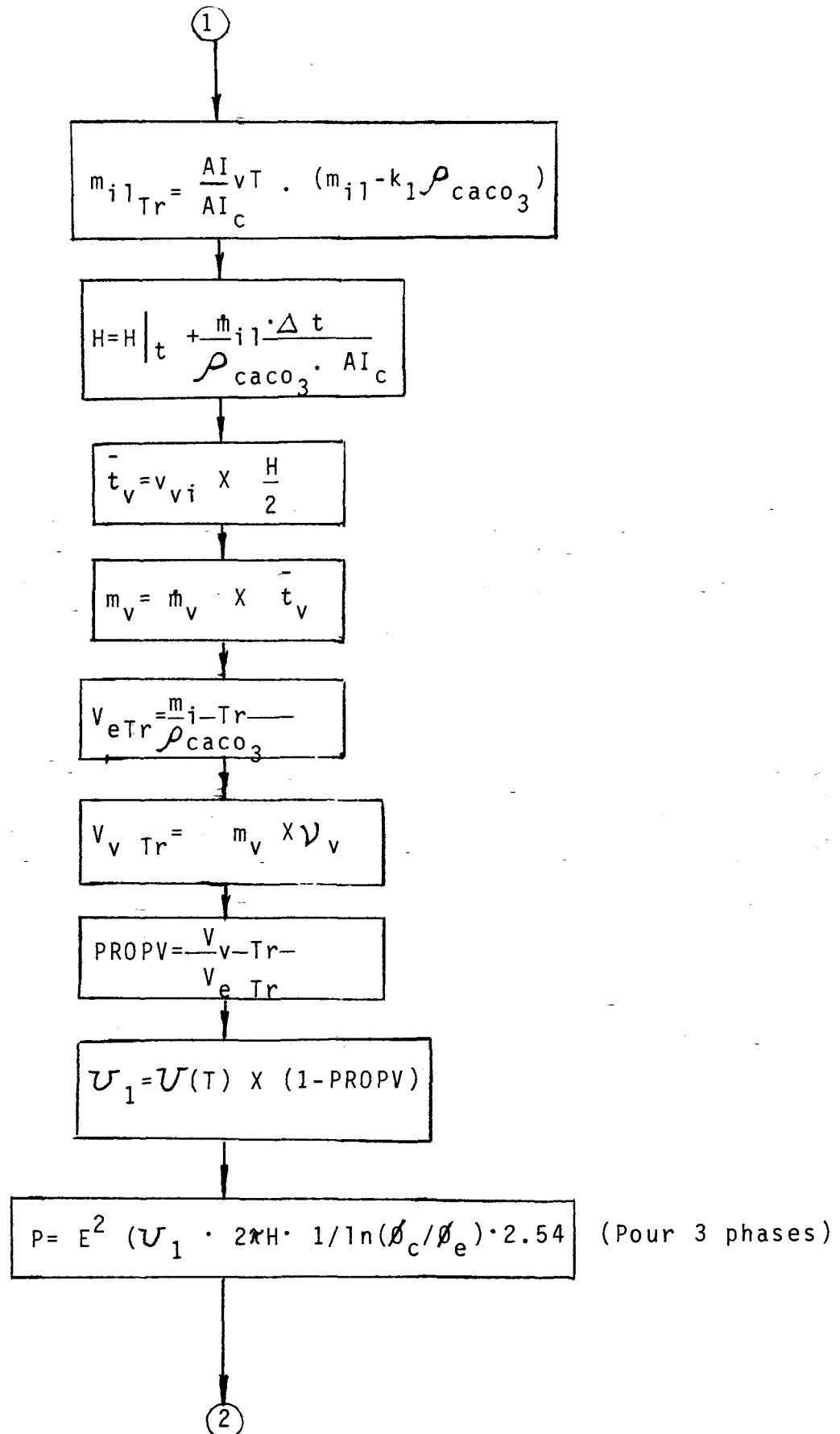
Le programme principal assure le contrôle des itérations nécessaires du débit de vapeur produit.

La sous-routine comporte deux (2) parties (figure 18):

- a. Calcul de la puissance tirée (P1)
- b. Déduction du débit de vapeur pour ce P1 et des conditions d'opération.

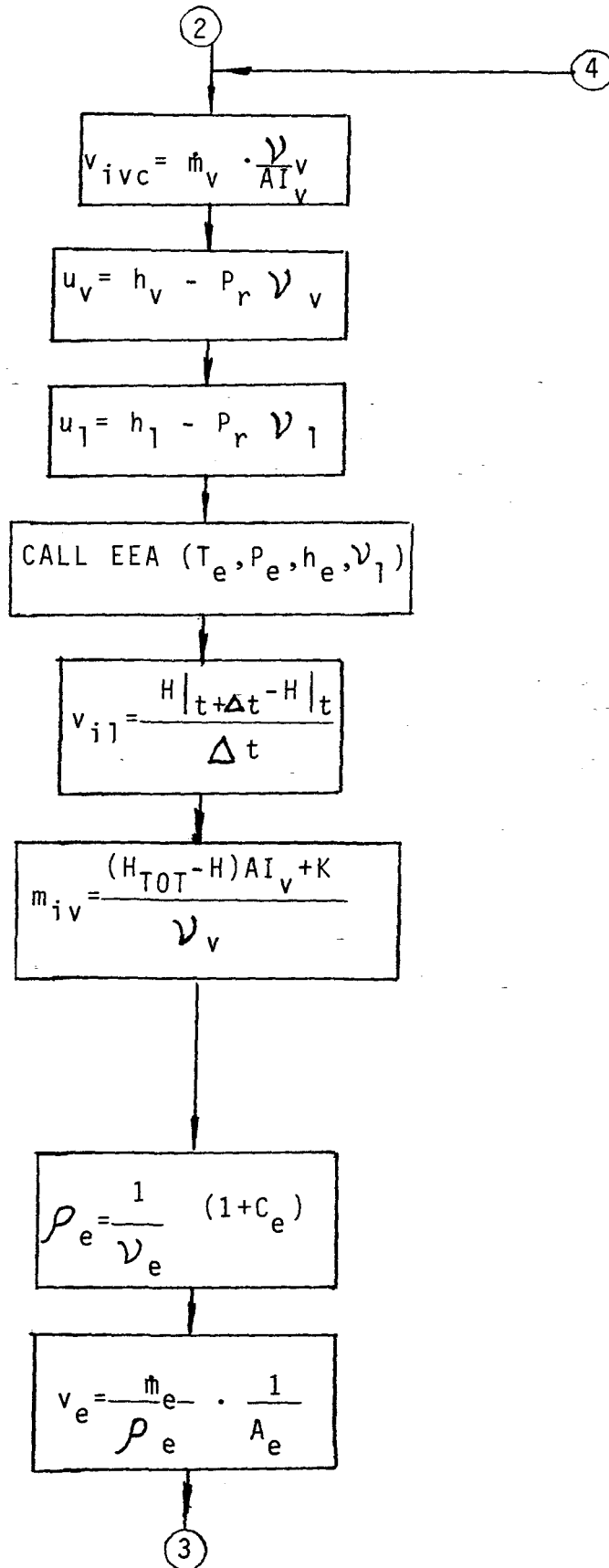
FIGURE 18: Logigramme de la sous-routine de modélisation d'une bouilloire électrique (CATR)

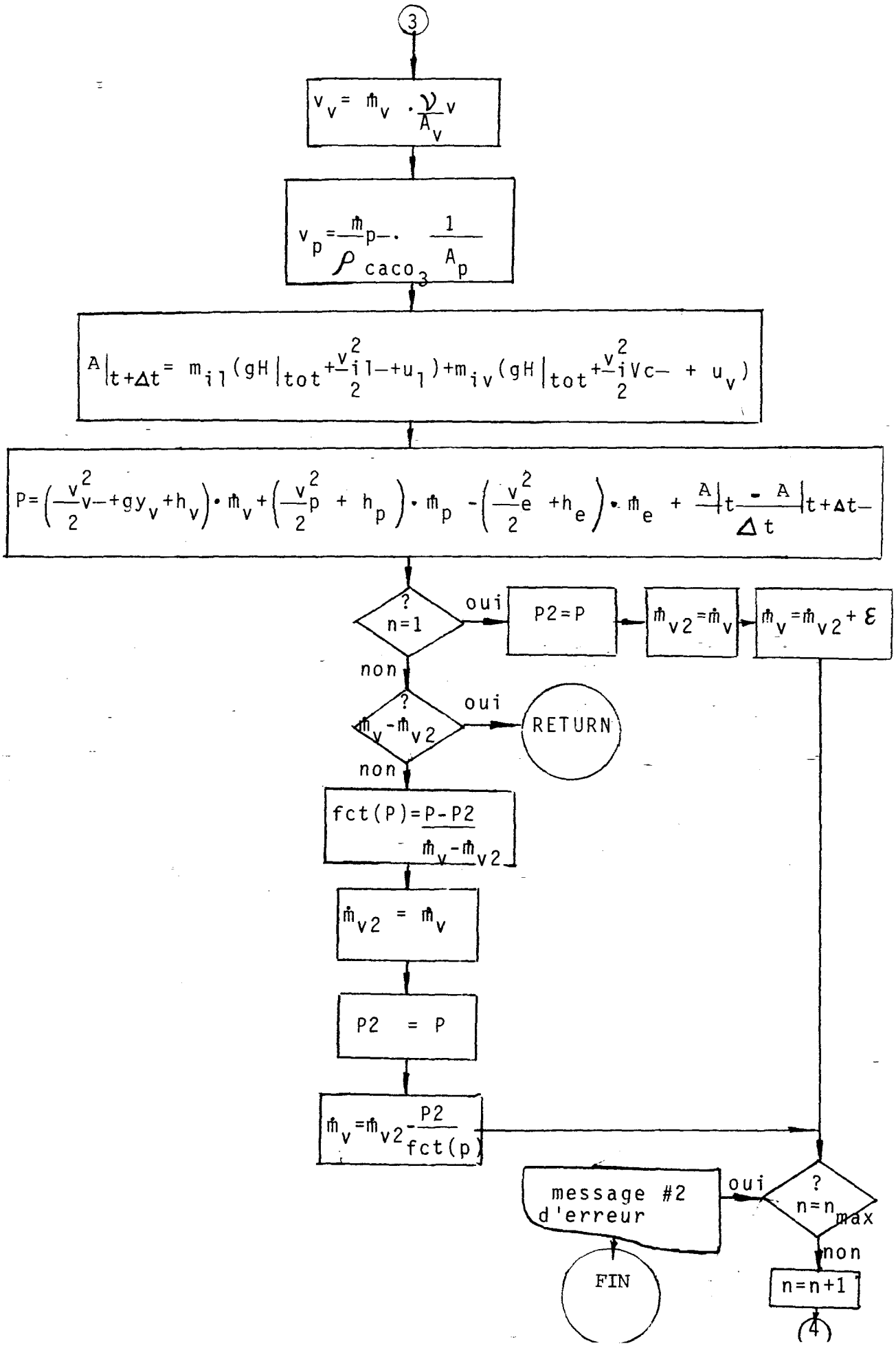






b. Calcul de  $\dot{M}_v = fct(P1)$ :



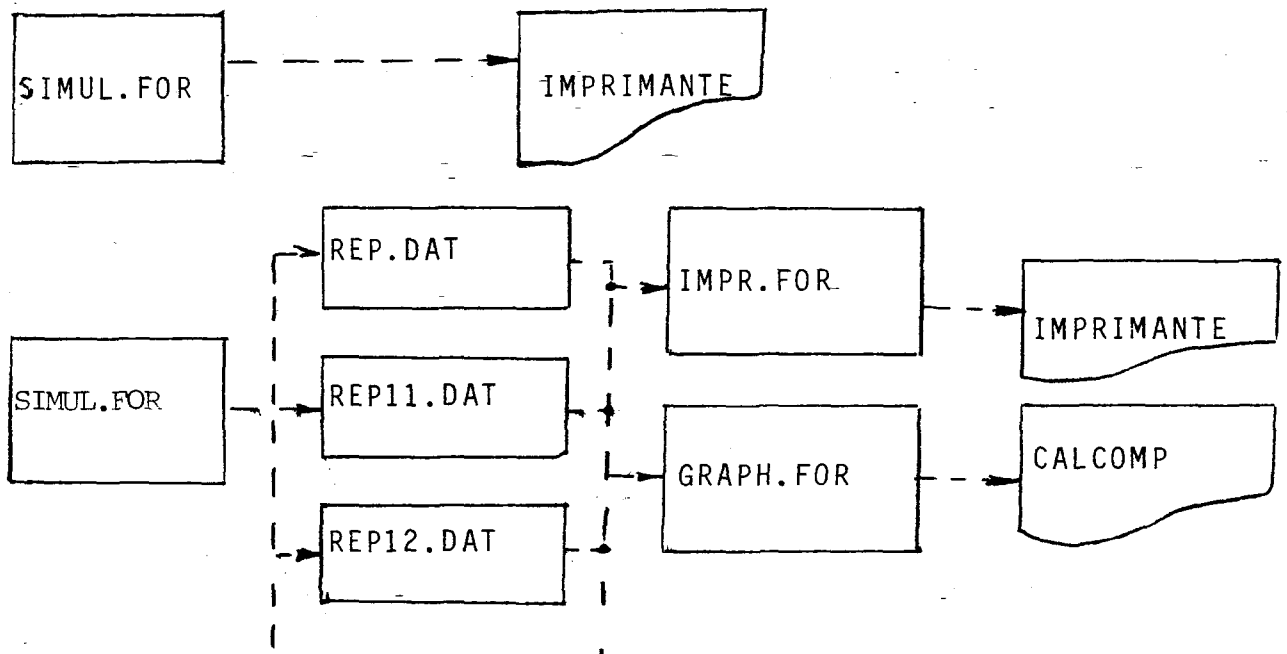


## ANNEXE 4

### UTILISATION DU PROGRAMME

#### 1. Réseau d'exploitation

- a. Si on utilise la version originale "SIMUL.FOR" (figure 18) le programme inscrit directement les résultats sur le terminal.
- b. Afin d'éviter de procéder à la simulation à chaque fois que les résultats sont à traiter (imprimer une copie ou tracer un graphique), ceux-ci sont introduits dans différents fichiers de données (numérotés selon l'essai) qui sont ensuite utilisés comme base de données pour l'impression ou le traçage graphique (figure 19); une version modifiée du programme original (SIMUL1.FOR) permet cette conversion directe.



UN FICHER DE COMMANDE AIDE L'UTILISATION DES DIFFERENTS FICHERS

- c. Une version permettant l'essai de l'utilisation d'un réservoir amortisseur a été finalement produit (SIMUL2.FOR).

PROGRAMME COMPLET (DYNAMIQUE)

Version 1: SIMUL. FOR

(Calcul d'une bouilloire telle qu'actuelle)

```
C
C  ENONCES DE DEPART
C
  REAL K,MILT,MV1,ME,MIL,MIV,IMAX,K1
  COMMON AE,AP,AV,AIV,AIVT,DELT,DIA,DIC,E,EPSI,HT,HTOT,K,K1,N1,
  1ZETA
  TEMP=0.0
C
C  LECTURE DES DONNEES
C
  READ(11,10)DELT,TMAX
  10  FORMAT(2F12.4)
C
  READ(11,20)IMAX
  20  FORMAT(F12.4)
  READ(11,23)M1,N1
  23  FORMAT(2I4)
  READ(11,25)EPSI,ZETA,PRMAX,HMAX,HMIN,DEBSUR
  25  FORMAT(6F12.4)
C
  READ(11,30)CONEA1,DEBEA1,CONCE1,DEBPU1,PRESR1
  READ(11,30)CONEA2,DEBEA2,CONCE2,DEBPU2,PRESR2
  READ(11,30)CONEA3,DEBEA3,CONCE3,DEBPU3,PRESR3
  READ(11,30)CONEA4,DEBEA4,CONCE4,DEBPU4,PRESR4
  READ(11,30)CONEA5,DEBEA5,CONCE5,DEBPU5,PRESR5
  30  FORMAT(5F12.4)
C
  READ(11,40)HT,CONT,CONCIT,CIT,DEBVAT,DEBPUT
  40  FORMAT(6F12.4)
C
  READ(11,50)PE,TE
  50  FORMAT(2F12.4)
C
  READ(11,60)K,K1,AIVT,HTOT
  READ(11,60)AIV,DIC,DIA,E
  READ(11,60)AP,AV,AE,G
  60  FORMAT(4F12.4)
C
C  ESSAI DE LECTURE DES DONNEES
C
  WRITE(10,10)DELT,TMAX
  WRITE(10,20)IMAX
  WRITE(10,23)M1,N1
```

FIGURE 19

```

WRITE(*,25)EPSI,ZETA,PRMAX,HMAX,HMIN,DEBSUR
WRITE(*,30)CONEA1,DEBEA1,CONCE1,DEBPU1,PRESR1
WRITE(*,30)CONEA2,DEBEA2,CONCE2,DEBPU2,PRESR2
WRITE(*,30)CONEA3,DEBEA3,CONCE3,DEBPU3,PRESR3
WRITE(*,30)CONEA4,DEBEA4,CONCE4,DEBPU4,PRESR4

```

```

WRITE(*,30)CONEA5,DEBEA5,CONCE5,DEBPU5,PRESR5
WRITE(*,40)HT,CONT,CONCIT,CIT,DEBVAT,DEBPUT
WRITE(*,50)PE,TE
WRITE(*,60)K,K1,AIVT,HTCT
WRITE(*,60)AIV,DIC,DIA,E
WRITE(*,60)AP,AV,AE,G

```

C  
C  
C  
C  
C

INITIALISATION DU PROGRAMME

```

CALL TVAP(PRESR1,T,VSPVA,ENTVA,VSPLI,ENTLI)
UV=ENTVA-PRESR1*VSPVA
UL=ENTLI-PRESR1*VSPLI
VIVC=DEBVAT*VSPVA*144/AIV*3.
CONCA=(1.+CONCIT)/VSPLI
MILT=(HT*AIV+K1)*CONCA/1728.
MIV=(AIV*(HTCT-HT)+K)/(VSPVA*1728.)
DELAT=(MILT*((G*HT/12)+(UL*25056.8)))+(MIV*((G*HTDI/12)+
1((VIVC/3600)**2./2.)+(UV*25056.8)))
DEBEAT=DEBEA1
DEBVA=DEBVAT

```

C  
C  
C  
C  
C

PROGRAMME PRINCIPAL

```

WRITE(*,96)
70 IF(TEMP.GE.TMAX)STOP
M=0.
CALL VACON(DEBEA1,DEBEA2,DEBEA3,DEBEA4,DEBEA5,TEMP,DEBEA)
CALL VACON(CONCE1,CONCE2,CONCE3,CONCE4,CONCE5,TEMP,CONCE)
CALL VACON(CONEA1,CONEA2,CONEA3,CONEA4,CONEA5,TEMP,CONEA)
CALL VACON(DEBPU1,DEBPU2,DEBPU3,DEBPU4,DEBPU5,TEMP,DEBPU)
CALL VACON(PRESR1,PRESR2,PRESR3,PRESR4,PRESR5,TEMP,PRESR)

```

C

```

80 MV1=DEBVA
WRITE(*,*)DEBEA,CONCE,CONEA,DEBPU,PRESR

```

C

```

CALL CATR(CIT,CONCE,CONEA,CONCI,COND1,CONT,DEBEA,DEBEAT,
10DEBPU,DEBVA,DEBVAT,DELAT,DELATT,DEBPUT,H,M,MIL,MILT,MV1,
2P,PE,PRESR,TE)

```

C  
C

```

DELTA=DEBVA-MV1
IF(DELTA.LE.ZETA)GO TO 85
M=M+1.
IF(M.EQ.M1)GO TO 90

```

```

      GO TO 80
90  WRITE(*,91)M,N,DEBVA,MV1
91  FORMAT(///,'MESSAGE D ERREUR NO 1',//,5X,2      ///)
C
C  CALCUL DU COURANT POUR UNE PHASE
C
85  AI=P/(E*3.)
    IF(AI.GE.IMAX)GO TO 86
    IF(H.GE.HMAX)GO TO 87
    IF(H.LE.HMIN)GO TO 89
    IF(PRESR.GE.PRMAX)GO TO 88
C
C  IMPRESSION DES RESULTATS
C
92  WRITE(*,95)DEBVA,H,P
96  FORMAT(///,5X,'LES RESULTATS SONT:',//,5X,/,
17X,'TEMP',7X,'DEBVA',7X,'H',13X,'P',/,7X,'
2'-----',7X,'-',13X,'-',//)
95  FORMAT(2F10.3,E12.3)
C
C  REINITIALISATION POUR UNE AUTRE TRANCHE
C
    DELAT=DELATT
    DEBVAT=DEBVA
    DEBPUT=DEBPU
    MILT=MIL
    DEBEAT=DEBEA
    HT=H
    CIT=CONCI
    CONT=CONDI
C
    TEMP=TEMP+DELT
C
    WRITE(*,*)TEMP
    WRITE(*,*)DELAT,DEBVAT,DEBPUT,MILT,DEBILT,
C
    GO TO 70
C
86  WRITE(*,97)
97  FORMAT(///,5X,'SURCHARGE')
    GO TO 99
87  WRITE(*,98)
98  FORMAT(///,5X,'DEBORDE')
    GO TO 99
89  WRITE(*,94)
94  FORMAT(///,5X,'PORCELAINE BRISEE')
99  STOP
88  DEBVA=DEBVA-DEBSUR

    WRITE(*,93)
93  FORMAT(///,5X,'SOUPAPE EST OUVERTE')
    GO TO 92
    END

```

C  
C  
C  
C  
C  
C

SOUS ROUTINE POUR LE CALCUL D'UNE TRANCHE

PARTIE 1: CALCUL DE LA PUISSANCE

SUBROUTINE CATR(CIT,CONCE,CONEA,CONCI,COND1,CONT,DEBEA,  
1DEBEAT,DEBPU,DEBVA,DEBVAT,DELAT,DELATT,DEBPUT,H,M,MIL,  
2MILT,MV1,P,PE,PRESR,TE)  
REAL K,MILT,MV1,ME,MIL,MITR,MV,MIV,K1  
COMMON AE,AP,AV,AIV,AIVT,DELT,DIA,DIC,E,EPSI,HT,HTDT,K,K1,N1,  
1ZETA

WRITE(\*,100) DEBEA,DELT,AIVT,DEBVA,PRESR  
WRITE(\*,100) DEBPU,MILT,DEBVAT,DEBPUT,CIT  
WRITE(\*,400) CONT,CONCE,MV1  
WRITE(\*,100) E,AIV,PE,TE,DEBILT  
WRITE(\*,100) DIC,DIA,HTDT,K,AE  
WRITE(\*,100) AP,AV,HT,EPSI,ZETA  
WRITE(\*,500) DELAT  
WRITE(\*,200) N1,M

C  
C

N=1.0  
G=32.2  
CALL TVAP(PRESR,T,VSPVA,ENTVA,VSPLI,ENTLI)

C  
C  
C

WRITE(\*,\*)T,VSPVA,ENTVA,VSPLI,ENTLI,K1

C  
C  
C

ME=DEBEA\*DELT

CALCULS POUR UNE PHASE

VIVI=DEBVA\*VSPVA\*1728./(AIVT\*3.)  
DEBIL=DEBEA-(DEBVA+DEBPU)  
MIL=MILT+(DEBEAT\*DELT)-(DEVAT\*DELT)-(DEBPUT\*DELT)  
CONCI=((MIL\*CIT)+(ME\*CONCE))/(MIL+ME)  
COND1=((MIL-ME)\*CCNT)+(ME\*CONEA)/MIL  
TM=(T-32.)/1.8  
COND=COND1\*(1.0+0.0223\*(TM-25.))  
CONCA=(1.+CONCI)/VSPLI  
MITR=AIVT\*(MIL-(K1\*CONCA/1728.))/AIV  
VETR=MITR\*(12.\*\*3.)/CONCA  
H=HT+((DEBIL\*DELT)\*144.)/(CONCA\*AIV)  
TEMV=H/(2.\*VIVI)

C

MV=DEBVA\*TEMV/3.  
VVATR=MV\*VSPVA\*(12.\*\*3.)  
PROPV=VVATR/VETR  
CON3=COND\*(1.-PROPV)  
C1=ALOG(DIC/DIA)

C  
C  
C

WRITE(\*,\*)ME,VIVI,DEBIL,MIL,CONCI,COND1  
WRITE(\*,\*)COND,CONCA,MITR,VETR,H,TEMV  
WRITE(\*,\*)MV,VVATR,PROPV,CON3,C1

C

CALCUL POUR 3 PHASES

P2=E\*\*2.\*(CON3\*0.00001\*2\*\*3.1416\*H\*(1./C1)\*\*2.54)

WRITE(\*,\*)P2

## PARTIE 2: CALCUL DE DEBVA

```

165 VIVC=DEBVA*VSPVA*144./AIV
    UV=ENTVA-PRESR*VSPVA/12.
    UL=ENTLI-PRESP*VSPLI/12.
    CALL EEA(TE,PE,ENTEA,VSPEA)

```

```

WRITE(*,*)VIVC,UV,UL,ENTEA,VSPEA

```

```

VIL=(H-HT)/(DELTA*12.)
MIV=(AIV*(HTOT-H)+K)/(VSPVA*1728.)
DENEAE=(1.+CONCE)/VSPEA
VIEAE=DEBEAE*144./(DENEAE*AE*3600.)
VIVAE=DEBVA*VSPVA*144./(AV*3600.)
VIPUE=DEBPU*144./(CONCA*AP*3600.)
DELATT=(MIL*((G*H/12)+((VIL/3600)**2)/2.+UL*25056.8))+
1(MIV*((G*HTOT/12)+(((VIVC/3600)**2.)/2.)+UV*25056.8))
P1=(((VIVAE**2.)/2.+G*HTOT)+ENTVA*25056.8)*DEBVA)+
1(((VIPUE**2.)/2.+ENTLI*25056.8)*DEBPU)-(((VIEAE**2.)/2.)+
2ENTEA*25056.8)*DEBEAE)+(DELAT-
2DELATT)/DELTA)/(778.16*3.413*32.2)
IF(N.EQ.1.) GO TO 150
Z1=DEBVA-DEBVA2
Z=ABS(Z1)
IF(Z.LE.ZETA) GO TO 155
DEBVA2=DEBVA
DEBVA=DEBVA2*P2/P1

```

```

WRITE(*,700)
700 FORMAT(' ITERATION NO: ')
WRITE(*,*)N
WRITE(*,*)VIL,MIV,GENEAE,VIEAE,VIVAE,VIPUE
WRITE(*,*)DELATT,P1,Z,DEBVA2,DEBVA

```

```

170 IF(N.EQ.N1)- GO TO 160
    N=N+1.
    GO TO 165
160 WRITE(*,300)M,N,DEBVA,MV1,P1
    STOP
150 DEBVA2=DEBVA+EPSI
    GO TO 170
155 P=P1
    RETURN
300 FORMAT(///,10X,'MESSAGE D ERREUR NO:2',//,
110X,I2,2X,I2,2X,E8.2,2X,E8.2,2X,E8.1,////)
100 FORMAT(5F12.4)
200 FORMAT(2I4)
400 FORMAT(3F10.3)
500 FORMAT(E12.3)
    END

```

## SOUS-ROUTINE DE CALCUL DE L'ENTHALPIE DE L'EAU D'ALIMENTATION

```

SUBROUTINE EEA(TE,PE,ENTEA,VSPEA)
T2=374.11-(TE-32.)/1.8
VSP=(3.1975-(0.3151548*T2**(1./3.))-
11.203374E-03*T2+7.48908E-13*T2**4.)/
2(1.+0.1342489*T2**(1./3.)-3.946263E-03*T2)
VSPEA=VSP*0.0160185
ENTSAT=-21.4+104.86*ALOG(PE)-16.5*(ALOG(PE))**2.+

```



```

    ENTEA=((0.003*PE)-((PE/245309.73)+
1(1./2129.67)))*(TE-32.))+ENTSAT
    RETURN
    END

```

C  
C  
C

SOUS-ROUTINE DE CALCUL DES TABLES DE VAPEUR

```

SUBROUTINE TVAP(P,T,VSPVA,ENTVA,VSPLI,ENTLI)
T=EXP(0.22187*ALOG(P)+4.76920)
VSPVA=EXP(-0.96534*ALOG(P)+5.92414)
TC=(T-32)/1.8
T2=374.11-TC
VSP=(3.1975-(0.3151548*T2**(1./3.))-1.203374E-03*T2+
17.48908E-13*T2**4.)/(1.+0.1342489*T2**(1./3.))-
23.946263E-03*T2)
VSPLI=VSP*0.0160185
ENTLI=-21.4+104.86*ALOG(P)-16.5*ALOG(P)**2.+1.91*ALOG(P)**3.
IF(P.LT.200) GO TO 10
ENTVA=ENTLI+EXP(-0.05527*ALOG(P)+7.04047)
GO TO 20
10 ENTVA=ENTLI+EXP(-0.16159*ALOG(P)+7.61522)
20 RETURN
    END

```

C  
C  
C

SOUS-ROUTINE DE CALCUL DES VARIABLES DE CONTROLE

```

SUBROUTINE VACON(X1,X2,X3,X4,X5,TEMP,RET)
IF(X2.NE.0.)GO TO 10
25 RET=X1
GO TO 777
10 IF(X2.NE.1.)GO TO 20
IF(TEMP.LT.X4)GO TO 25
TR=TEMP-X5
IF(TR.LT.0.)GO TO 26
GO TO 25
26 RET=X3
GO TO 777
20 IF(X2.NE.2.)GO TO 30
IF(TEMP.LT.X4)GO TO 25
TR2=TEMP-X5
IF(TR2.GE.0.)GO TO 26
RET=((X3-X1)*(TEMP-X4)/(X5-X4))+X1
GO TO 777
30 IF(TEMP.LT.X4)GO TO 25
RET=X3*SIN((2*3.1416*X5)*(TEMP-X4))+X1
777 RETURN
    END

```

PROGRAMME DE TRACAGE GRAPHIQUE DES RESULTATS

```
C
C
C   PROGRAMME D ECRITURE GRAPHIQUE DES RESULTATS
C
C   DIMENSION CCNEA(62),DEBEA(62),CONCE(62),DEBPUC(62),
1 PRESR(62),DEBVA(62),H(62),P(62),TEMP(62)
C   CHARACTER*7 NOM
C   NCM='CLAVEAU'
C   CALL PLCTSC(0,0,5)
C   CALL TITRE(NOM)
C   CALL NFAPIER(0)
C   CALL LIMITE(300.0,27.9)
C   CALL FACTGR(0.5)
C   DO 20 I=1,60
C     REAC(8,100)CONEA(I),DEBEA(I),CONCE(I),DEBPUC(I),PRESR(I)
C     REAC(8,200)TEMP(I),DEBVA(I),H(I),P(I)
20  CONTINUE
100  FORMAT(5F12.4)
200  FORMAT(3F10.3,E12.3)
C
C   TRACAGE DES VARIABLES DE CONTROLE
C
C   1.GRAPHIQUE DE LA CONDUCTIVITE DE L'EAU D'ALIMENTATION
C
C   TEMP(61)=0.0
C   TEMP(62)=0.04
C   CCNEA(61)=200.0
C   CCNEA(62)=20.0
C   CALL PLCT(2.0,2.0,-3)
C   CALL AXIS(0.0,0.0,15HTEMPS EN HEURES,-15,25.0,0.0,
1 TEMP(61),TEMP(62))
C   CALL AXIS(0.0,0.0,31HCONDUCTIVITE EAU D ALIMENTATION,
131,12.0,90.0,CONEA(61),CONEA(62))
C   CALL LINE(TEMP,CONEA,60,1,0,0)
C   CALL SYMBCL(3.0,12.0,0.5,21HVARIABLES DE CONTROLE,
10.0,21)
C
C   2.GRAPHIQUE DE DEBIT D EAU D ALIMENTATION
C
C   CALL PLOT(25.,0.0,-3)
C   DEBEA(61)=120000.
C   DEBEA(62)=6700.
C   CALL AXIS(0.0,0.0,15HTEMPS EN HEURES,-15,25.0,0.0,
1 TEMP(61),TEMP(62))
C   CALL AXIS(0.0,0.0,26HDEBIT D EAU D ALIMENTATION,
126,12.0,90.0,DEBEA(61),DEBEA(62))
C   CALL LINE(TEMP,DEBEA,60,1,0,0)
```

FIGURE 20

C  
C  
C

3. GRAPHIQUE DE CONCENTRATION DE L EAU D ALIMENTATION

```

CALL PLCT(35.,0.0,-3)
CONCE(61)=0.05
CONCE(62)=0.005
CALL AXIS(0.0,0.0,15HTEMPS EN HEURES,-15,25.0,0.0,
1TEMP(61),TEMP(62))
CALL AXIS(0.0,0.0,34HCONCENTRATION D EAU D ALIMENTATION,
134,12.0,90.0,CONCE(61),CONCE(62))
CALL LINE(TEMP,CONCE,60,1,0,0)

```

C  
C  
C

4. GRAPHIQUE DU DEBIT D EAU DE PURGE

```

CALL PLCT(35.,0.0,-3)
DEBPU(61)=12000.
DEBPU(62)=300.
CALL AXIS(0.0,0.0,15HTEMPS EN HEURES,-15,25.0,0.0,
1TEMP(61),TEMP(62))
CALL AXIS(0.0,0.0,14HDEBIT DE PURGE,14,12.0,90.0,
1DEBPU(61),DEBPU(62))
CALL LINE(TEMP,DEBPU,60,1,0,0)

```

C  
C  
C

5. GRAPHIQUE DE LA PRESSION DU RESEAU

```

CALL PLCT(35.,0.0,-3)
PRESR(61)=100.
PRESR(62)=20.
CALL AXIS(0.0,0.0,15HTEMPS EN HEURES,-15,25.0,0.0,
1TEMP(61),TEMP(62))
CALL AXIS(0.0,0.0,18HPRESSIGN DU RESEAU,18,12.0,90.0,
1PRESR(61),PRESR(62))
CALL LINE(TEMP,PRESR,60,1,0,0)

```

C  
C  
C  
C  
C  
C

ECRITURE DES RESULTATS

1. GRAPHIQUE DU DEBIT DE VAPEUR

```

CALL PLCT(50.0,0.0,-3)
DEBVA(61)=100000.
DEBVA(62)=12000.
CALL AXIS(0.0,0.0,15HTEMPS EN HEURES,-15,25.0,0.0,
1TEMP(61),TEMP(62))
CALL AXIS(0.0,0.0,15HDEBIT DE VAPEUR,15,12.0,90.0,
1DEBVA(61),DEBVA(62))
CALL LINE(TEMP,DEBVA,60,1,0,0)
CALL SYMCL(8.5,12.0,0.5,22HECRITURE DES RESULTATS,
10.0,22)
CALL SYMCL(8.5,11.5,0.5,22H-----,

```

C  
C  
C

10.0,22)

2. GRAPHIQUE DU NIVEAU D EAU

```

H(61)=30.0
H(62)=2.5
CALL AXIS(0.0,0.0,12HNIVEAU D EAU,-12,12.0,90.0,H(61),
1H(62))

```

C  
C  
C

E.GRAPHIQUE DE LA PUISSANCE

F(61)=C.0

F(62)=C.4E7

CALL AXIS(25.0,C.0,17,PUISSANCE REQUISE,-17,12.0,90.0,  
1F(61),F(62))

CALL LINE(TEMP,F,60,1,2,4)

CALL PLOT(40.0,C.0,599)

STOP

END

## ANNEXE 5

### ESSAIS SUR LE MODELE REDUIT D'UNE BOUILLLOIRE ELECTRIQUE

#### 1. But des essais

Une bouilloire électrique à électrodes immergées est un appareil sous-pression fermé ne permettant que peu d'essais opérationnels et dont le comportement physique interne est invisible.

L'utilisation d'un modèle réduit ouvert nous a permis de cerner l'effet de la variation de certains paramètres.

La dépendance du courant tiré en fonction des paramètres d'état a été le sujet des quatre (4) premiers essais:

<u>Essai no.</u>	<u>Relation vérifiée</u>
1	$I \propto H$
2	$I \propto \frac{1}{d}$
3	$I \propto \mathbf{V}$
4	$I \propto T$

où: I: courant tiré

H: Niveau immergé

**V**: Conductivité (réf. 25°C) de l'eau

T: Température de l'eau

d: Distance entre deux électrodes planes

Un dernier essai à l'aide d'une cathode modifiée a permis de visualiser l'évaporation le long de l'électrode et de vérifier si la présence de vapeur

au-dessus de l'eau influençait le courant.

## 2. Montage expérimental

Une maquette à l'échelle a été fabriquée et est constituée de deux (2) cylindres concentriques en acier immergés dans un bassin d'eau à conductivité contrôlée (figure 20) soit:

- par ajout de sel (NaCl)
- par utilisation d'eau provenant de l'intérieur d'une bouilloire.

Le cylindre extérieur est percé de petits orifices comme dans l'équipement existant afin de permettre la circulation de l'eau dans la bouilloire.

Une tension de 110 volts AC est appliquée entre les deux (2) cylindres (une tension d'environ 400 volts AC aurait été nécessaire pour respecter le rapport d'échelle mais ceci était non nécessaire et dangereux).

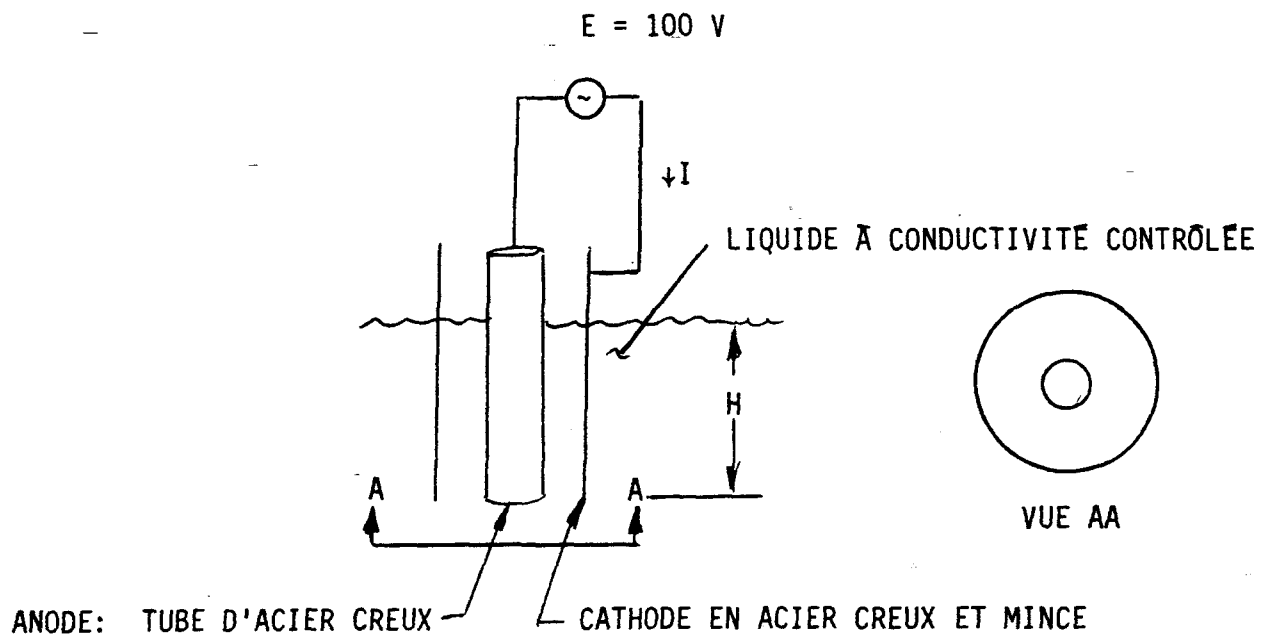


FIGURE 21: Montage expérimental du modèle réduit

### 3. Description des équipements utilisés

#### Instruments utilisés

<u>NOM</u>	<u>MARQUE</u>	<u>NO.</u>
1. Electrolytic conductivity measuring set.	Electronic Switchgear	Modèle MC-1
2. Electrolytic conductivity cell (	Electronic Switchgear	Modèle EBA/10 K 1.0
3. Modèle 1:32 d'un ensemble électrode - cathode.	Fait main	Photo no. 1

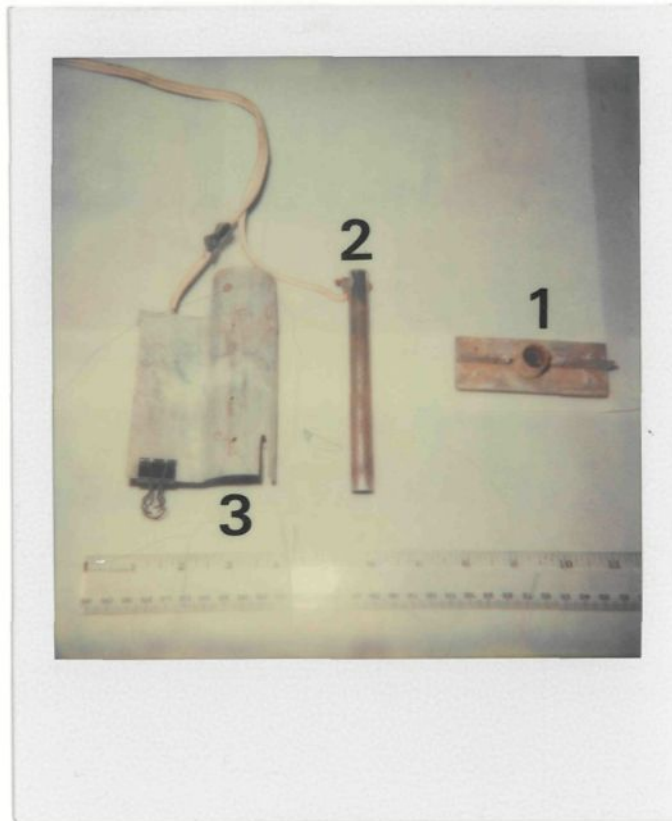


PHOTO 1

MODELE 1:32 D'UN ENSEMBLE ELECTRODE - CATHODE

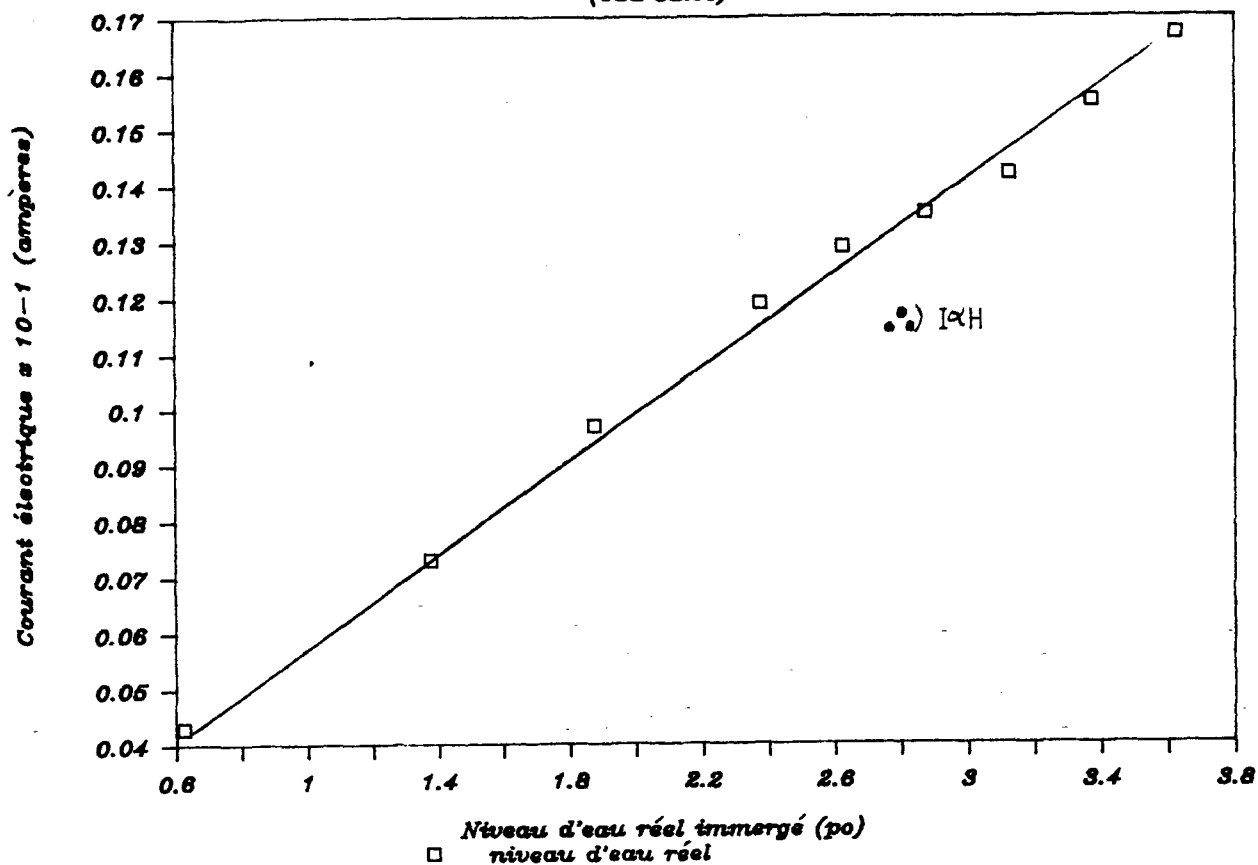
SIMPLE UTILISE POUR LES ESSAIS 1, 3 ET 4





sur l'essai no. 1 à la figure **21**) et inversement proportionnel à la distance entre celles-ci (figure **22**).

FIGURE 22: **COURANT vs NIVEAU IMMERGE REEL**  
(eau salée)



ESSAI 1: Courbe de la variation du courant en fonction du niveau immergé réel d'eau

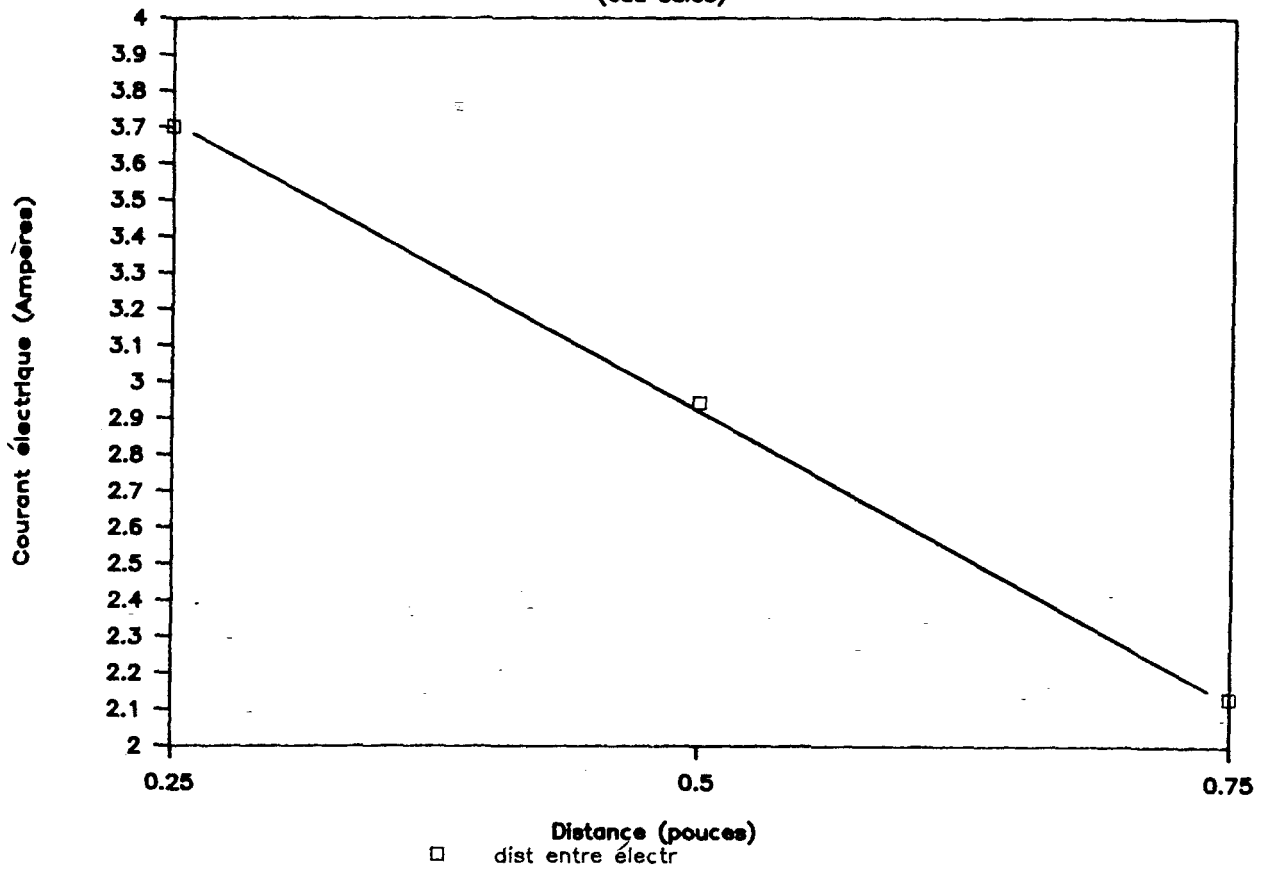
DONNEES RECUEILLIES  
(EAU SALEE)

Niveau immergé (po)	Courant x 10-1 (ampères)	Niveau immergé (po)	Courant x 10-1 (ampères)
0.625	0.043	2.875	0.135
1.375	0.073	3.125	0.142
1.875	0.097	3.375	0.155
2.375	0.119	3.625	0.167
2.625	0.129		

FIGURE 23:

*COURANT vs DISTANCE*

(eau salée)



ESSAI 2: Courbe de la variation du courant en fonction de la distance séparant deux électrodes rectangulaires plates.

DONNEES RECUEILLIES  
(EAU SALÉE)

-----  
Distance      Courant  
(po)          (ampères)  
-----

0.25	3.7	(eau bout entre les électrodes)
0.5	2.94	(eau bout entre les électrodes)
0.75	2.13	(eau ne bout pas)

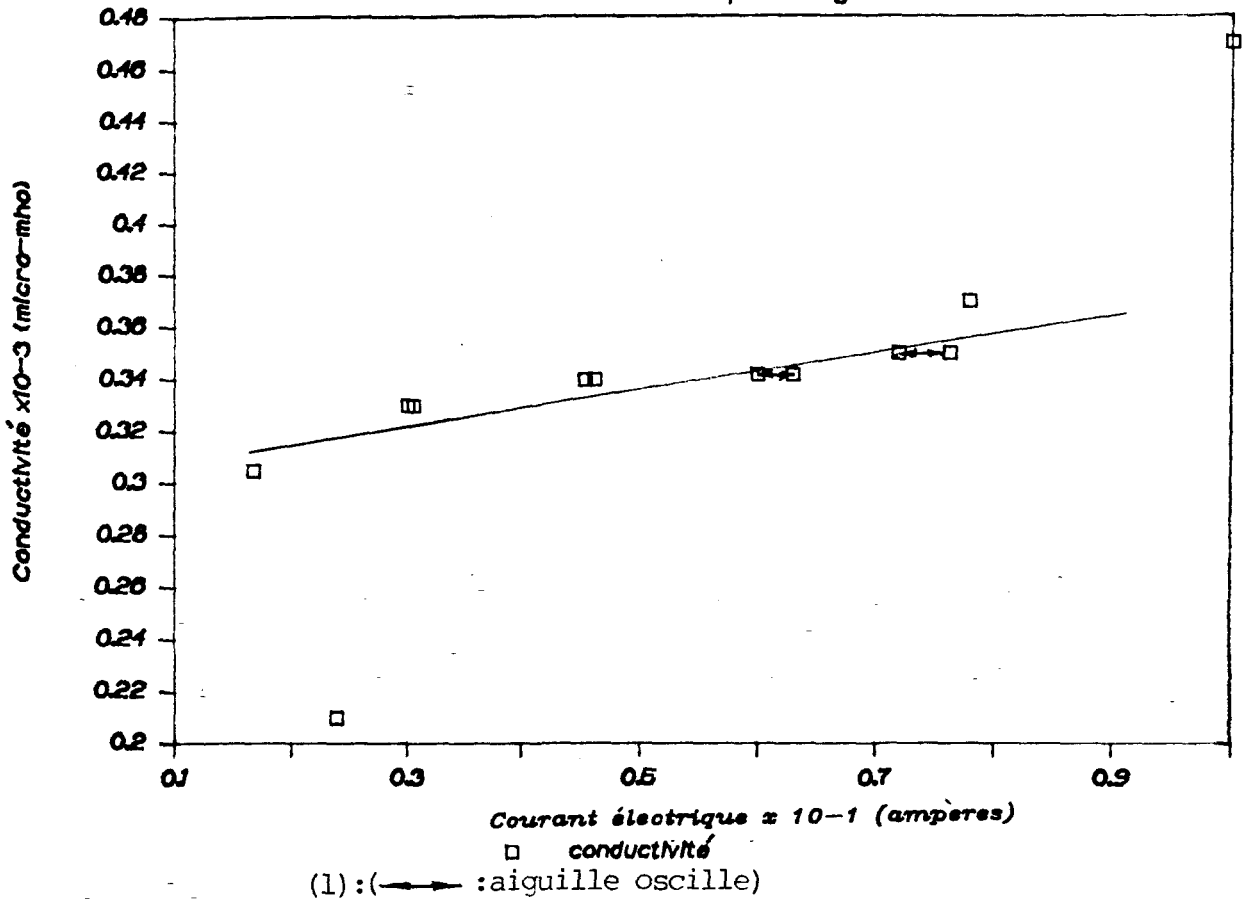
#### 4.2 Relations entre la conductivité et le courant

Il a été nécessaire de mener deux (2) séries d'essais qui ont permis de vérifier que le courant tiré est:

- a. proportionnel à la conductivité de l'eau en solution (figure 23)
- b. proportionnel à la température. (figures 24 & 25)

Le coefficient de proportionnalité (C.T.) entre la conductivité et la température a été estimé. De plus, une source externe a confirmé que cette linéarité se poursuit à de plus hautes températures, sous pression.

FIGURE 24: **CONDUCTIVITE vs COURANT**  
(niveau constant à 3-7/8 po. Immersée)



ESSAI 3: Courbe de la conductivité en fonction du courant tiré.

DONNEES RECUEILLIES  
(EAU SALEE)  
(niveau constant à 3-7/8 po. immergée)

Conductivité x 10 <sup>-3</sup> (micro-mho)	Courant x 10 <sup>-1</sup> (ampères)	Conductivité x 10 <sup>-3</sup> (micro-mho)	Courant x 10 <sup>-1</sup> (ampères)
0.21	0.239	0.342	(1) 0.6
0.305	0.167	0.342	(1) 0.63
0.33	0.3 (1)	0.35	(1) 0.72
0.33	0.305 (1)	0.35	(1) 0.763
0.34	0.453 (1)	0.37	0.78
0.34	0.461 (1)	0.47	1

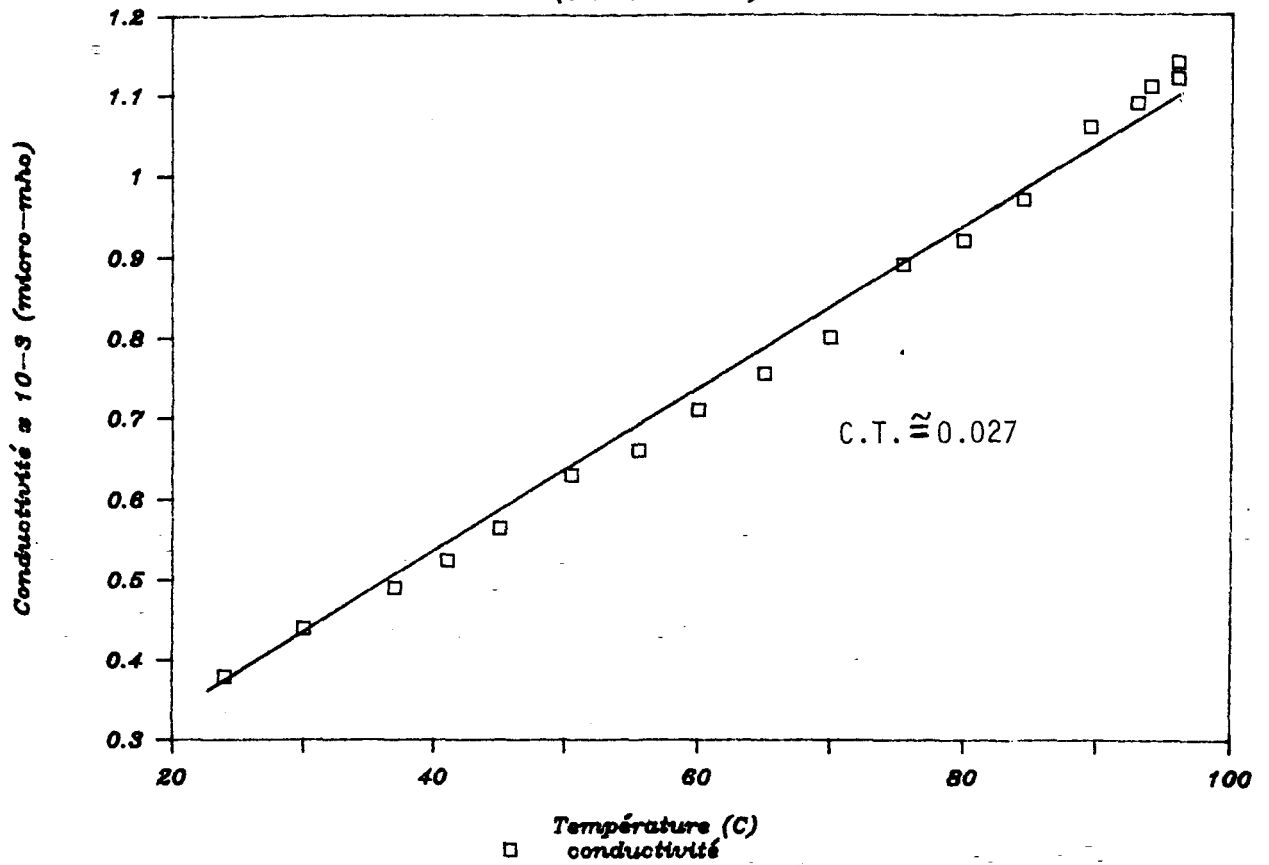
REMARQUE

(1): A partir de 0.3 ampères en montant, le liquide bouillait.

FIGURE 25:

# CONDUCTIVITE vs TEMPERATURE

(solution saline)

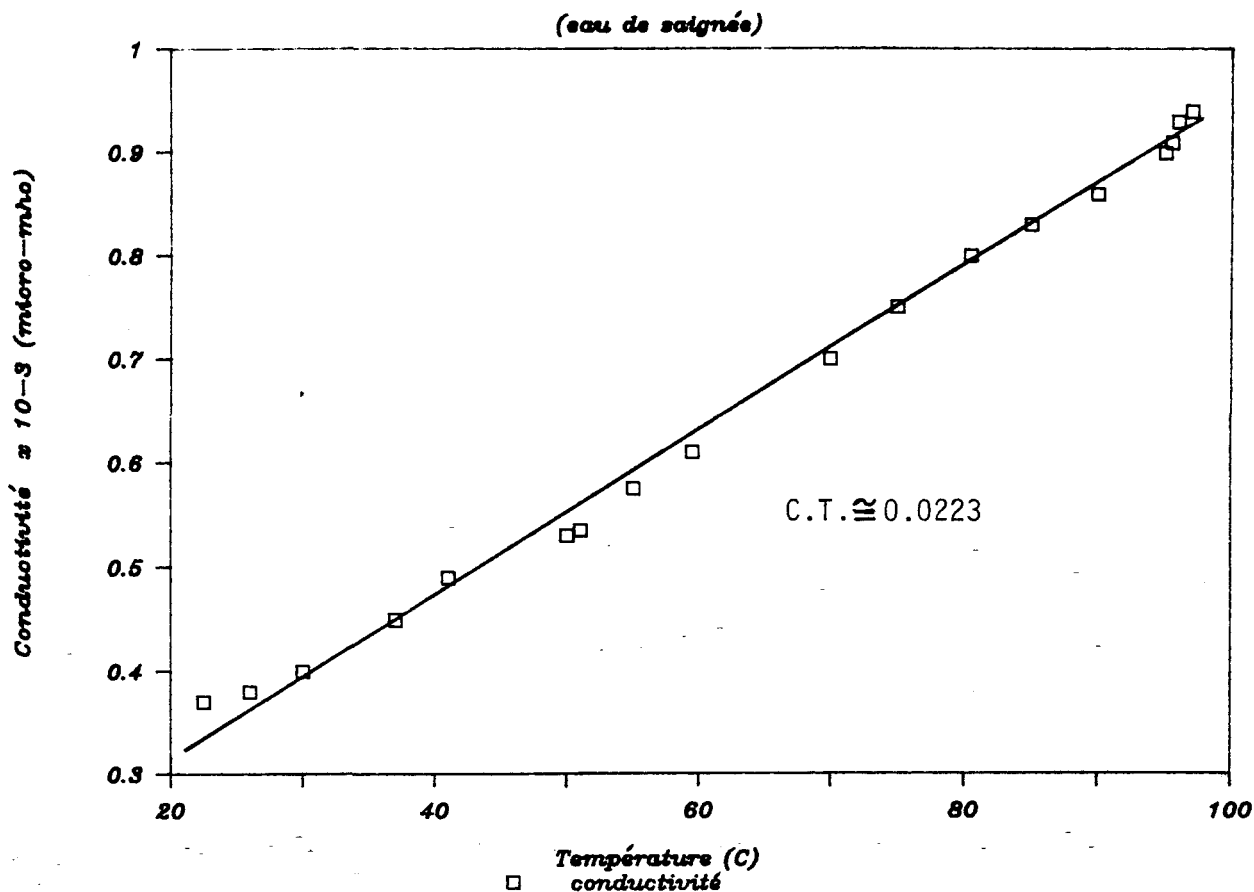


ESSAI 4: Courbe de la variation de la conductivité en fonction de la température

DONNEES RECUEILLIES  
(solution saline)

Température (Degré C)	Conductivité x 10 <sup>-3</sup> (micro-mho)	Température (Degré C)	Conductivité x 10 <sup>-3</sup> (micro-mho)
24	0.38	70	0.8
30	0.44	75.5	0.89
37	0.49	80	0.92
41	0.525	84.5	0.97
45	0.555	89.5	1.06
50.5	0.63	93	1.09
55.5	0.66	94	1.11
60	0.71	96	1.12
65	0.755	96	1.14

FIGURE 26: *CONDUCTIVITE vs TEMPERATURE*



ESSAI 5: Courbe de la variation de la conductivité en fonction de la température

DONNEES RECUEILLIES  
(Eau de saignée)

Température (Degré C)	Conductivité x. 10 <sup>-3</sup> (micro-mho)	Température (Degré C)	Conductivité x 10 <sup>-3</sup> (micro-mho)
22.5	0.37	70	0.7
26	0.38	75	0.75
30	0.4	80.5	0.8
37	0.45	85	0.83
41	0.49	90	0.86
50	0.53	95	0.9
51	0.535	95.5	0.91
55	0.575	96	0.93
59.5	0.61	97	0.94

#### 4.3 Influence des bulles de vapeur sur le courant

L'utilisation d'une cathode ouverte sur le côté en longueur a permis de vérifier qu'en régime:

- a. transitoire, le volume virtuel de liquide entre la cathode et l'anode varie rapidement et cause une instabilité ainsi qu'un courant élevé.
- b. permanent, le niveau d'eau entre les électrodes d'équilibre est égal à celui extérieure et le courant devient à peu près constant.

#### 5. Validation de l'équation d'état

L'équation développée à l'annexe 3 permet de relier les paramètres de la bouilloire au courant tiré.

Les données expérimentales ainsi que les données typiques permettent de valider cette équation.

##### 5.1 Vérification pour la solution saline et le modèle réduit

- a. Equation d'état (tension monophasée)

$$P1 = E^2 \frac{2\pi H \mathcal{U}_T}{\ln(r_o/r_i)}$$

$$\text{où: } \mathcal{U}_T = \mathcal{U}_{25} (1 + C.T. (T - 25))$$

EQUATION 3

où: E = Tension électrique = 110 Volts  
H = Niveau d'immersion = 3 3/8 pouces  
r<sub>o</sub> = Rayon interne de la cathode = 11/16 pouces  
r<sub>i</sub> = Rayon externe de l'anode = 1/4 pouces  
C.T. = Coefficient de température = 0.027  
 $\mathcal{U}_{25}$  = Conductivité en référence à 25°C



b. Compensation de l'effet isolant de la vapeur

Il est difficile de mesurer la production réelle de vapeur autour des électrodes. Une proportion de 50% en volume a été estimée significative (calculée à partir des débits des bouilloires électriques.)

L'essai no. 4 a fourni les données permettant la vérification théorique:

Comparaison entre le courant calculé et le courant mesuré pour l'essai no: 4

<u>V (25 °C)</u>	<u>I calculé (A)</u>	<u>I mesure (A)</u>
0.21	2.01	2.39
0.30	2.8	3.0

5.2 Vérification que les calculs théoriques corroborent les données typiques d'opération (Recueillies en annexe 7)

a. Equation d'état (tension triphasée)

$$P_{ph} = \frac{E^2}{3} \cdot \frac{2\pi H U_T}{\ln(r_o/r_i)}$$

EQUATION 6

où: E= Tension électrique =6600 Volts  
H= Niveau d'immersion = 53 Pouces  
r = Rayon interne de la cathode= 19.5 pouces  
r<sub>o</sub> = Rayon externe de l'anode = 11.5 pouces  
U<sub>T</sub><sup>i</sup> = Conductivité de l'eau de la bouilloire à environ 185 °C

b. Compensation de l'effet isolant de la vapeur

La portion de volume occupée par la vapeur dans l'espace rempli d'eau entre la cathode et l'anode, pour un débit de 142,070 lb/hre à 185 °C de vapeur saturée a été évaluée\* à environ 48.7%.

Ceci confirme l'utilisation de ce facteur dans le calcul pour le modèle réduit.

A l'aide de ces données, le calcul de  $P_{ph}$  égal 47.6 MW comparé à 42 MW typique.

6. Conclusion

L'utilisation du modèle réduit a permis de vérifier l'équation d'état de deux (2) façons en confirmant:

- a. la relation entre les paramètres
- b. que les résultats théoriques corroborent les résultats pratiques.

Finalement, l'essai de l'équation d'état comme une bonne approximation entre les conditions d'opération et le courant tiré.

---

\* REMARQUE: Evaluée à partir des données des bouilloires réelles.

## ANNEXE 6

### DONNEES TYPIQUES D'UNE BOUILLLOIRE ELECTRIQUE

Le modèle mathématique ne peut servir que s'il est validé.

En usine, les données sont recueillies par intégration de mesures: ceci rend impossible, à l'aide de l'instrumentation actuelle d'obtenir des données instantanées sur l'ensemble. Ceci aura pour effet de limiter la précision des calculs à une analyse de tendances et de réactions.

Les données utilisées (tableau 3) proviennent de deux bouilloires électriques reliées ensemble.

TABLEAU 3: DONNEES RECEUILLIES A L'USINE

DESCRIPTION	Bouilloire #4			Bouilloire #5		
	$t_1=9h15$	$t_2=11h10$	$Net=\frac{A_2 - A_1}{t_2 - t_1}$ $Net=\frac{A_2 - A_1}{1.95}$	$t_1=9h15$	$t_2=11h10$	$Net=\frac{A_2 - A_1}{1.9}$
Débit de vapeur ( $\dot{m}_v$ )	78591119	78594142	Net=1564.65	755855860	75588082	Net=114
Eau d'alimenta- tion ( $\dot{m}_e$ )	705025	707602	Net=1301.9			
Niveau d'eau (po. immergés)			63 à 64			51 à 5
Pression du réseau (psig)			175			
Courant (Amps/ph)	3600	3700	3800	2700	2800	2800

AUTRES DONNEES:

$CaCO_3$  eau alim. 7 - 10 mg/l

Conductivité eau 250 à 350 micro-mho /cm  
de purge

Ces données doivent ensuite être converties dans les unités  
utilisées dans les calculs (TABLEAU 4):

a) Débit de vapeur: Facteur comparatif de l'intégrateur= 0.0454

$$\begin{aligned} \text{d'où (pour la bouilloire 4) Net} &= 1564.65 \\ &\quad \times 0.0464 \\ &= 71.04 \text{ Ton/hr} \\ &\quad \times 2000 \text{ lb/ton} \\ &= 142,070 \text{ lb/hr} \end{aligned}$$

à 175 PSIG (175 +14.696 = 189.696 PSIA)

$$v_{\text{gsat}} \cong 2.404 \text{ (pi}^3/\text{lb)}$$

d'où

$$142,070 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \times 2.404 \frac{\text{pi}^3}{\text{lb}} = 341,536 \frac{\text{pi}^3}{\text{hr}}$$

b) Débit d'eau d'alimentation: Facteur comparatif de l'intégrateur= 0.1037

$$1301.9 \times 0.1037 = 135 \text{ Ton/hr} \times 2000 \frac{\text{lb}}{\text{Ton}} = 270,014 \frac{\text{lb}}{\text{hr}}$$

Qui peut se répartir proportionnellement à la production de  
vapeur des 2 bouilloires:

$$\begin{aligned} \text{PROD. VAPEUR B.E. 4} &= 71.04 \text{ Ton/hr} \\ \text{PROD. VAPEUR B.E. 5} &= \underline{52.18 \text{ Ton/hr}} \\ \text{TOTAL} &= 123.22 \text{ Ton/hr} \end{aligned}$$

$$m_e |_{\text{BE4}} = 270014 \times \frac{71.04}{123.22} = 155\,671.11 \text{ lb/hr}$$

c) Débit d'eau de purge:

$$\dot{m}_p \approx \dot{m}_e - \dot{m}_v$$

EQUATION 21

$$\text{Pour B.E. 4 : } \dot{m}_p = 155\,671.11 - 142\,070 = 13\,601 \frac{\text{lb}}{\text{hr}}$$

d) Puissance:

$$P = \sqrt{3} \cdot I \cdot E$$

EQUATION 22

$$\text{Pour B.E. 4: } I_{\text{moy}} = \frac{3600+3700+3800}{3} = 3700 \text{ amps}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot 3700 \cdot 6500 = 41\,655\,822 \text{ Watts} \\ = 42 \text{ MegaWatts environ (valeur typique)}$$

TABEAU 4: DONNEES TYPIQUES DE L'OPERATION DE BOUILLLOIRES ELECTRIQUES:

DONNEE	B.E. 4	B.E. 5
Niveau liquide (po)	53	54
Production de vapeur (Ton/hr)	71.04	52.18
(lb/hr)	142070	104357
(pi <sup>3</sup> /hr)	341536	250875
Eau d'alimentation (Ton/hr)	77.83	57.17
(lb/hr)	155671	114343
Eau de purge (lb/hr)	13601	9986
Courant par phase (Amp/Ø)	3700	2767
Puissance totale (MW)	42	31
Pression du réseau (PSIG)	175	175

DIVERS:

(CaCO<sub>3</sub>) dans l'eau d'alimentation = 7 - 10 mg/l

Conductivité eau de purge = 250 à 350 micro-mho/cm

## RÉSUMÉ

Ce mémoire présente une simulation dynamique sur ordinateur de réponses d'une bouilloire électrique soumise à des variations de conditions opératoires. Le travail de simulation repose sur l'élaboration d'une relation qui fournit la puissance requise à l'évaporation et qui a été trouvée dans des conditions d'opération données.

Le contenu de ce mémoire se divise en trois grandes sections. La première décrit brièvement une bouilloire à électrodes immergées et son importance dans le procédé SÉCAL. Une partie plus substantielle porte sur la description des essais expérimentaux ayant permis de développer l'équation de base, suivie du développement de tous les éléments composant le modèle théorique. Ainsi le lecteur sera amené à prendre connaissance d'une définition géométrique de la bouilloire, des essais expérimentaux, des hypothèses simplificatrices du modèle, du développement des équations et de la méthode de résolution. Finalement, la partie "Simulations et discussion" présente les résultats des simulations effectuées. L'étude portera sur les variations brusques (échelon) des quatre (4) principaux paramètres de contrôle des bouilloires électriques lesquels ont permis de conclure que le contrôle du débit d'eau d'alimentation (donc du niveau d'immersion des électrodes) serait la meilleure façon de contrôler la production de vapeur de la bouilloire.

*André Chartte*

Directeur de recherche

*Jean - Robert Claveau*

Étudiant