

30/81

2 ex

U.S.T.H.B.

الجامعة الوطنية للعلوم الهندسية

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

THESE D'INGENIORAT

TELEDETECTION RADIOMETRIQUE

ETUDE, MODELISATION ET LOGICIEL DE

CARACTERISATION DES PARAMETRES

DU BILAN ENERGETIQUE

Proposé par:

A. ABDELLAQUI
D^r de spécialité

Etudié par:

SADJI MUSTAPHA

MELOUAN M^{ed} SALAH

U.S.T.H.B.

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

THESE D'INGENIORAT

TELEDETECTION RADIOMETRIQUE

ETUDE, MODELISATION ET LOGICIEL DE

CARACTERISATION DES PARAMETRES

DU BILAN ENERGETIQUE

Proposé par:

A. ABDELLAOUI
Dr de spécialité

Etudié par:

SADJI

MUSTAPHA

MELOUAN

M^{ed} SALAH

§§§§§§§§§§§§§§§§§§
§ REMERCIEMENTS §
§§§§§§§§§§§§§§§§§§

Nous tenons à remercier notre promoteur M^r A.ABDELLAOUI directeur du groupe de recherche en télédétection d'Alger de nous avoir accueilli dans son laboratoire pour l'élaboration de notre projet.

Qu'il veuille bien trouver **ici** l'expression de notre sincère gratitude.

Nos vifs remerciements vont à M^r H.TEDJINI Docteur ingénieur, ~~dont~~ les conseils nous ont été très utiles..

Que M^{elle} S.Baya qui a bien voulu s'occuper de la frappe trouve ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Nos remerciements vont aussi à S.Fatiha, G.Bahia, M.Kamel , O.Azzedine, ~~et~~ ~~et~~ Aïcha, pour leurs aides pratiques et morales.

Que tous ceux qui, de près ou de loin ont contribué à notre formation, trouvent ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

§§§§§§§§§§§§§§§§
§ DEDICACES §
§§§§§§§§§§§§§§§§

A mon père

A ma mère

A ma grand-mère

A ma tante

A mes frères et soeurs

A tous mes amis d'école

Mohammed Tahar.

SOMMAIRE

I. INTRODUCTION

II. POSITION DU PROBLEME

- II.1. Présentation de la Télédétection
- II.2. Les grandeurs mesurables en Télédétection
- II.3. Problème de mesure posé en Télédétection
- II.4. Le bilan énergétique et radiatif
- II.5. Notion de modèle

III. FORMULATION DU MODELE

- III.1. Grandeur à modéliser
- III.2. Etude du rayonnement solaire : R_S
- III.3. Choix d'un modèle simple de T_S
- III.4. Modélisation de T_a
- III.5. Modélisation de R_n

IV. CALCUL DES PARAMETRES DU MODELE PROPOSE

- IV.1. Introduction
- IV.2. Modélisation de température de surface
 - IV.2.1. Détermination analytique des paramètres optimaux de T_1
 - IV.2.2. Détermination des paramètres à partir d'un nombre minimum de données
 - IV.2.2.1. Calcul des paramètres de T_S donnée par le 1er modèle
 - IV.2.2.2. Calcul des paramètres de T_S donnés par le 2ème modèle
- IV.3. Calcul des paramètres de $T_a(t)$
- IV.4. Calcul des paramètres de R_n

V. VALIDATION DU MODELE

- V.1. Résolution du problème par ordinateur
- V.2. Présentation des résultats

- V.2.1. Présentation graphique de l'écart quadratique moyen
- V.2.2. Influence des instants de mesure sur les paramètres
- V.2.3. Allure des courbes expérimentales et théorique de T_s , T_u et R_n
- V.3. Discussion des résultats.

VI. CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UN SYSTEME AUTONOME D'ANALYSE DES PARAMETRES

- VI.1. Introduction
- VI.2. Rappel sur le MC 6800
 - VI.2.1. Organisation interne de MC 6800
 - VI.2.2. Le logiciel
 - VI.2.2.1. Modes d'adressage du MC 6800
- VI.3. Elaboration du programme de détermination des paramètres
 - VI.3.1. Présentation de la bibliothèque mathématique
 - VI.3.2. Caractéristique de la bibliothèque mathématique
 - VI.3.3. Algorithme des opérations utilisées pour la détermination des paramètres
 - VI.3.4. Programme principal

VII. CONCLUSION

A N N E X E

I. INTRODUCTION

Plusieurs domaines de la recherche dont la TELEDETECTION doivent avoir recours à des modèles traduisant l'évolution de certains processus physiques et ce pour diverses raisons :

- la non connaissance de toutes les lois physiques régissant le phénomène à étudier,
- la difficulté de recenser toutes les composantes du phénomène ,
- certaines composantes, même si elles sont connues, ont un caractère aléatoire qui rend difficile, voir même impossible leur contrôle,
- la complexité de certaines formules rend délicat leur exploitation .

Un modèle n'est donc valable que sous certaines hypothèses donc limité dans l'espace et dans le temps.

Notre travail consiste dans un premier temps à contribuer à la modélisation de certaines grandeurs dont la connaissance est nécessaire pour expliciter des équations telles que l'équation du bilan énergétique à l'interface sol atmosphère et l'équation de transfert de chaleur dont l'étude fait l'objet d'un sujet de recherche en TELEDETECTION ELECTROMAGNETIQUE INFRAROUGE.

Il existe dans la littérature des modèles proposés par certains auteurs. Ces modèles constituent notre point de départ. On étudiera ces modèles et on apportera quelques améliorations dans le but d'obtenir des modèles simples à exploiter mais approchant néanmoins correctement la réalité.

Le modèle proposé est établi moyennant un certain nombre de paramètres ; ainsi se pose le problème de recherche des paramètres.

Notre travail se termine par l'élaboration d'un programme de calcul des paramètres des modèles adoptés.

Ce programme a été rédigé en langage assembleur en vue d'être mémorisé sur PROM.

II. POSITION DU PROBLEME

II.1. Présentation de la TELDETECTION

La Télédétection est la technique d'analyse à distance, d'enregistrement et de traitement des rayonnements émis ou réfléchis par la surface terrestre.

La connaissance de la terre est loin d'être totale. L'évaluation des ressources naturelles n'est pas encore achevée et doit être fréquemment renouvelée, les changements rapides dus au développement (aménagement, exploitation et dégradations des ressources) et aux catastrophes naturelles, obligent à développer toujours d'avantage les mises à jour, voir les prévisions : tels sont les buts que se fixe la Télédétection.

La télédétection a rendu possible la surveillance active et la gestion dynamique du milieu de vie de l'Homme. Elle permet des diagnostics en des points précis ainsi que des inventaires sur de larges surfaces de la terre.

La Télédétection utilise comme véhicule de l'information l'onde électromagnétique. En principe tout le spectre électromagnétique doit être exploité, mais les contraintes techniques et technologiques d'une part et la nature du milieu de propagation d'autre part ne le permettent pas, seules quelques fenêtres du spectre peuvent être utilisées, citons :

- le visible et le proche infrarouge : $0,4 \mu\text{m}$ à $1,1 \mu\text{m}$
- deux bandes situées dans l'infrarouge : 3 à $5 \mu\text{m}$ et 8 à $14 \mu\text{m}$
- enfin le domaine des hyperfréquences $\lambda \leq 1\text{cm}$.

Un système de télédétection comprend :

- une zone émettant un rayonnement,
- un système de transmission par télémesure,
- une plateforme d'observation dans laquelle sont embarqués des capteurs travaillant dans différents domaines du spectre électromagnétique,
- un système de transmission par télémesure

- un système d'enregistrement,
- un centre de recueil des données et de prétraitement,
- Des centres d'interprétation dont le but principal est d'établir une corrélation entre le rayonnement mesuré et la nature des objets au sol émettant ce rayonnement.

Les enregistrements exploités jusqu'à ce jour en Télédétection sont ceux fournis par les satellites américains Landsat (1, 2, 3), les satellites soviétiques Soyouz et dans une certaine mesure, certains satellites météorologiques.

Les satellites LANDSAT, lancés successivement en 1972, 1975, 1978 fournissent des enregistrements du type "multispectral" c'est-à-dire fournis simultanément dans quatre bandes spectrales différentes :

- 0,5 μm à 0,6 μm (bleu)
- 0,6 μm à 0,7 μm (vert)
- 0,7 μm à 0,8 μm (jaune-orangé)
- 0,8 μm à 1,1 μm (rouge-proche infrarouge)

II.2. Les grandeurs mesurables en Télédétection

Les différentes grandeurs mesurables en télédétection sont regroupées dans le tableau de la page suivante. Ces paramètres peuvent être analysés suivant le lieu et la nature dont ils interviennent. Parmi ces paramètres, il y a ceux qui décrivent les propriétés des divers milieux (sol, atmosphère, plantes, eau,...) intéressant les divers spécialistes, ces paramètres sont appelés paramètres thématiques pour être différenciés de ceux qui interviennent directement dans les équations gouvernant les divers flux d'énergie et de masse et qui sont appelés paramètres physiques.

A l'aide de modèles appropriés on établit des liens entre ces deux types de paramètres.

$$I_{\lambda, \rho}(\lambda, \theta, \varphi, t, R, ds)$$

Signal de sortie

<p><u>paramètres logistiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - heure t - saison - axes de prise de vue (orbital) - etc. ... 	<p><u>paramètres instrumentaux</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - bandes spectrales $(\lambda, \Delta\lambda)$ - polarisation ρ - réponse spectrale $f_{\omega}(\lambda)$ - FOV $(\rightarrow ds)$ - τ 	<p><u>récepteur</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - produit un signal de sortie en modifiant le signal reçu : convolution. 	
<p><u>atmosphère</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - composition moléculaire - profil P.T.U. - distribution et composition des aérosols 	<p><u>Météorologie</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - position du soleil - couverture nuageuse - température des nuages - pluie - turbulence 	<p><u>atmosphère</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - perturbe le signal reçu et ré-émis par l'interface. 	
<p><u>paramètres microclimatiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - T_a, T_c - température air et sol - e_a, pression de vapeur de l'air - e_c, pression de vapeur saturante à T_c - U_a, vitesse du vent - z_0, rugosité aérodynamique. 	<p><u>paramètres physiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>optiques</u> <ul style="list-style-type: none"> - émissivité ϵ_p - réflectivité ρ_p - <u>thermiques</u> <ul style="list-style-type: none"> - chaleur spécifique C_p - résistance R_{th} - <u>géomorphologiques</u> <ul style="list-style-type: none"> - pente, etc. 	<p><u>paramètres thématiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - nature du couvert - état phénologique - indice foliaire - contraintes diverses - rugosité du sol - profil thermique - profil d'humidité - distribution des feuilles etc. 	<p><u>Interface sol-atmosphère</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - couplage sol-atmosphère - Lieu des bilans d'énergie - de masse - Lieu d'émission du signal télédétection
<p><u>humidité de surface</u></p> <p><u>paramètres thématiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - nature du sol - dimension - humidité - salinité - composition minérale - structures - tailles 	<p><u>température TS</u></p> <p><u>paramètres physiques</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - <u>thermiques</u> <ul style="list-style-type: none"> - conductibilité - chaleur spécifique C_p - <u>hydriques</u> <ul style="list-style-type: none"> - conductibilité - capacité hydrique - <u>électromagnétiques</u> <ul style="list-style-type: none"> - constante diélectrique $\epsilon' - i\epsilon''$ - conductibilité σ <p>Modèles in situ</p>	<p><u>Sol</u></p> <p><u>Sous-sol</u></p> <p>essentiellement :</p> <ul style="list-style-type: none"> - conduction thermique - transferts hydriques 	

Les divers paramètres intervenant en télédétection

Earth Observations from space - MAY 78 -

(Problématique de la télédétection e.m : F. Becker)

II.3. Problème de mesure posé en Télédétection

La question qui se pose est la suivante : est ce que tous les paramètres utilisés peuvent être ^{obtenus} par Télédétection ?

La réponse à cette question est que seules les paramètres logistiques et les paramètres liés à l'instrumentation sont accessibles. Le signal enregistré sur la bande magnétique à bord du satellite s'écrit :

$$I_{\bar{\lambda},p}(\Delta\lambda, \theta, \varphi, t, h, dS) = I_0 + \int_{\bar{\lambda} - \frac{\Delta\lambda}{2}}^{\bar{\lambda} + \frac{\Delta\lambda}{2}} f(\lambda) [t_{\lambda}(h, \theta) R_{\lambda,p}(\theta, \varphi, T_a) + R_{\lambda}^{atm}(\theta, \varphi, \bar{T}_a)] d\lambda$$

où $\Delta\lambda$: largeur de la bande

(θ, φ) : angle de visée

t : l'instant de mesure

dS : dimension du pixel (surface élémentaire vue par le satellite)

$\bar{\lambda}$: position moyenne de la bande spectrale

P : la polarisation.

Le petit nombre de paramètres enregistrés $I_{\lambda,p}$ et le grand nombre de paramètres physiques qui sont à l'origine de ce signal ne permettent pas d'établir une relation univoque entre le signal reçu et les paramètres désirés permettant de passer du signal aux paramètres physiques et enfin aux paramètres thématiques.

De plus, le signal est perturbé dans le milieu de propagation ce qui accroît la difficulté de la connaissance de cette correspondance. Ainsi apparaissent les problèmes suivants :

a) Problèmes d'ordres méthodologiques :

Comment extraire les paramètres physiques intéressants à partir des données.

b) Problèmes concernant la valeur et le sens des paramètres ainsi extraits; les paramètres physiques obtenus par la procédure correspondent-ils à la réalité?

c) Problème théorique d'inversion des données.

Comment extraire les paramètres thématiques intéressants à partir des paramètres physiques mesurés. Dispose-t-on d'assez de paramètres par Télédétection, Quelle est la fiabilité de cette extraction ?

Le tableau de la page suivante regroupe ces divers problèmes.

II.4. Le Bilan Energétique et Radiatif

L'une des tâches de la Télédétection électromagnétique infrarouge est l'analyse quantitative des thermographies aériennes et spatiales. Cette analyse exige la connaissance de la réponse de la surface du sol aux excitations extérieures.

On est ainsi amené à résoudre l'équation différentielle aux dérivées partielles telle que ^{celle} traduisant l'évolution dans le temps et dans l'espace de la température du sol ;

$$\text{soit } C_u(z) \frac{\partial u}{\partial t} = K(z) \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$$

avec $C_u(z)$: capacité calorifique du sol par unité de volume

$K(z)$: conductivité thermique

(t,z) : température du sol

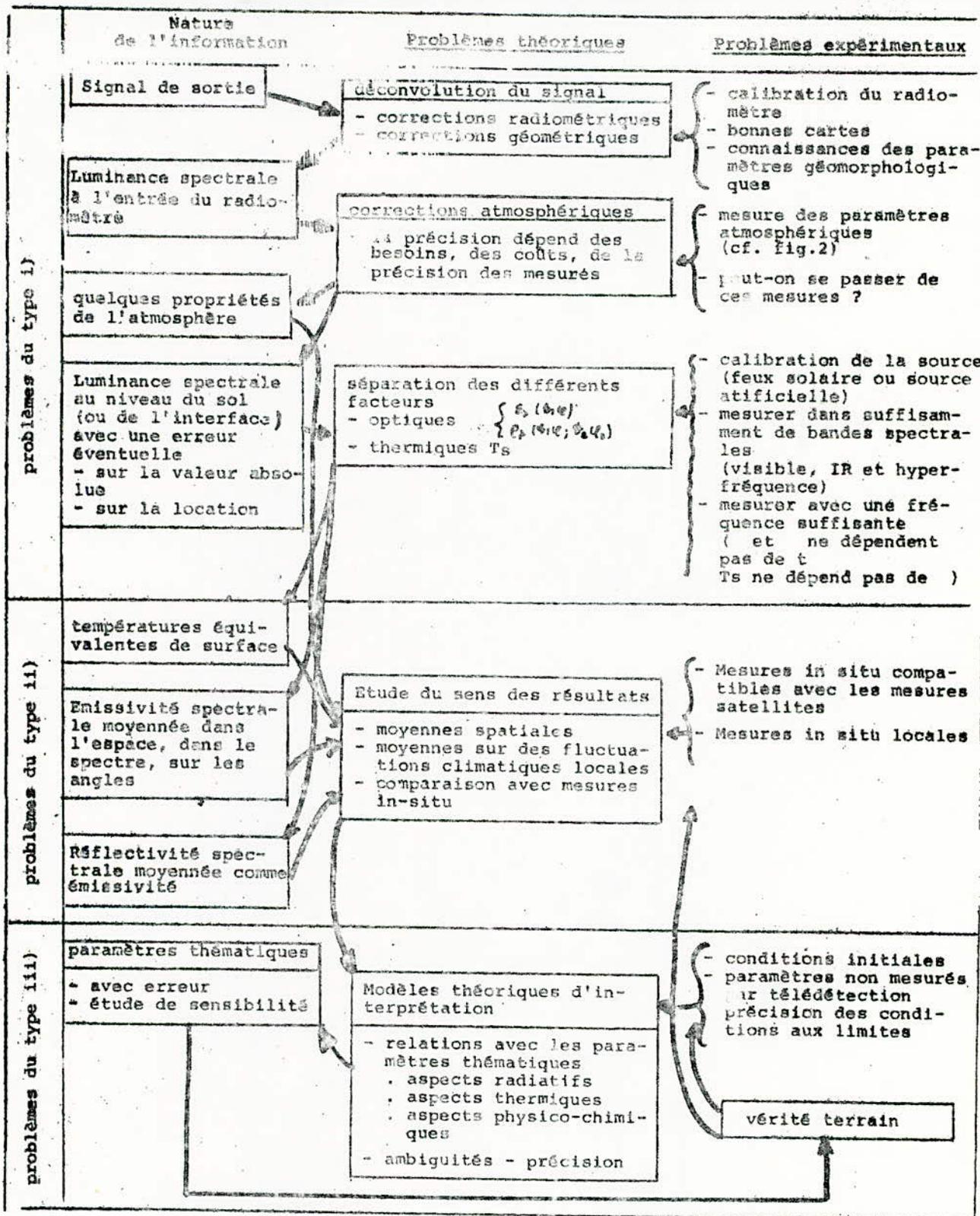
t : temps

z : profondeur comptée vers le bas à partir de l'interface sol atmosphère.

Quel que soit le mode de résolution, la solution effective exige des conditions aux limites. L'une des conditions aux limites est donnée par l'équation du Bilan énergétique suivante :

$$R_n + H + LE + G = 0 \quad (1)$$

qui traduit la conservation de l'énergie c'est-à-dire l'équilibre du milieu naturel à l'interface sol atmosphère.



Problèmes expérimentaux et théoriques à résoudre : tentative de schéma d'interprétation des données de télédétection.

Farth observations from space - MAY 1978 -

(Problématique de la télédétection É.m: F. BEKER).

- où
- Rn : désigne le rayonnement net
 - H : le flux de chaleur sensible
 - LE : le flux de chaleur latente
 - G : le gain de chaleur du sol.

Ces grandeurs sont des flux de chaleur ou rayonnements électromagnétiques décrivant les échanges physico-chimiques entre le sol et l'atmosphère, la description de ces échanges est donnée par des modèles visant à simplifier leur expressions.

L'expression du rayonnement net est la suivante.

$$R_n(t) = (1 - A) R_s(t) + \epsilon R_a(t) - \epsilon \sigma T_s^4$$

- où
- A : est l'albédo de la surface ou coefficient de réflexion pour les radiations de grande longueur d'onde.

ϵ : l'émissivité

$R_s(t)$: la radiation solaire incidente

$R_a(t)$: le flux de la radiation de grande longueur d'ondes émise par le ciel et dirigé vers le sol.

σ : constante de Stefan Boltzman : $= 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$

T_s : température de surface du sol

t : désigne le temps

Trois paramètres importants au moins influent considérablement sur l'expression du bilan (1). Il s'agit :

- du rayonnement net $R_n(t)$
- de la température T_s de la surface du sol qui intervient explicitement dans les expressions de R_n , H , et G et implicitement dans celle de LE .
- de la température T_a de l'air près du sol qui intervient dans les expressions de H et LE .

II.5. Notion de modèle

Un modèle mathématique est un ensemble de relations mathématiques reliant toutes ou parties des entrées et sorties du système physiques qu'il représente.

Cependant le nombre de lois nécessaires à la description d'un système physique complexe peut être considérable, il est donc impensable de toutes les retenir pour établir la notion de modèle mathématique.

De toute façon les connaissances de la physique font qu'actuellement seul un nombre restreint de ces lois est en fait connu ou du moins exploitable en routine. De même la connaissance quantitative du système est soumise à de nombreuses limitations : la non accessibilité à certains éléments, la précision des appareils de mesures...

Le modèle prend ainsi un caractère approximatif et aléatoire. Afin, de restituer le comportement du système réel, on est alors amené à considérer deux types d'entrées.

- les entrées déterministes qui influent sur l'évolution de la sortie et que l'on peut appréhender aux précisions des mesures près.
- les entrées aléatoires affectant également les sorties mais dont l'évolution échappe à notre connaissance sauf peut être dans un contexte probabiliste ou statistique. Elle regroupe toutes les approximations de la modélisation : contraintes de structures, limitation en nombre et précisions des observations disponibles

D'autres part une invariance dans le temps des modèles peut être retenue dans une première approche en accord avec le choix consistant à opter pour la deuxième proposition de l'alternative suivante:

- Modèle compliqué (mais de toute façon imparfait par nature) et résolution approché
- Modèle convenablement approximatif et simple mais résolution plus précise.

III. FORMULATION DU MODELE

III.1. Grandeurs à modéliser

Nous nous intéressons à la modélisation de $R_n(t)$, $T_s(t)$ et $T_a(t)$ en nous imposons de déterminer des modèles simples nécessitant le moins de paramètres possibles et décrivant correctement la réalité.

- a) $T_s(t)$: réponse en température du sol aux rayonnements incidents en particulier $R_s(t)$.
- b) $T_a(t)$: réponse en température de l'air à quelques mètres du sol aux rayonnements.
- c) $R_n(t)$: le flux de radiation net.

III.2. Etude du rayonnement solaire : R_s

Certains auteurs, notamment en météorologie et climatologie ont étudié et modélisé le rayonnement solaire direct incident et le rayonnement atmosphérique descendant R_a .

Ces modèles sont compliqués car ils introduisent beaucoup de paramètres ; Dans notre étude nous allons considérer des conditions météorologiques idéales c'est-à-dire sans changement brusque de nuages au dessus du pixel (élément de surface vue par le satellite) ou son voisinage immédiat.

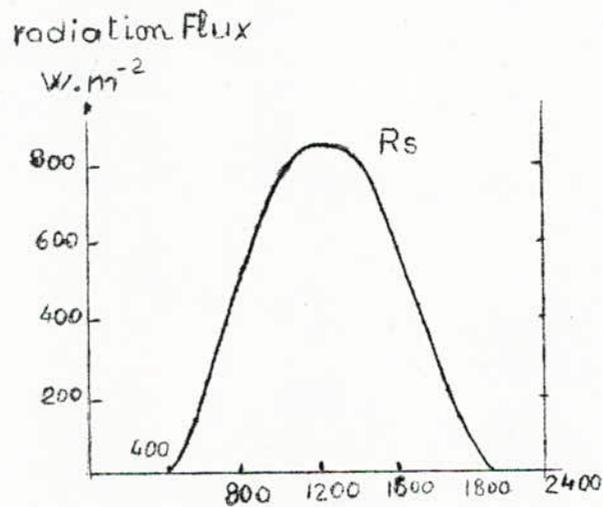
Ces hypothèses nous permettent de proposer un modèle simple, de R_s dont l'expression peut être justifiée par l'allure de la courbe expérimentale $R_s(t)$ donnée à la page suivante.

Ce modèle simple est formulé comme suit :

$$R_s(t) = \begin{cases} R_{s0} \sin \frac{t - t_L}{t_c - t_L} \pi & \text{si } t_L < t < t_c \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

où t_L et t_c désignent respectivement le temps de lever et de coucher du soleil.

RAYONNEMENT SOLAIRE



30 June 1976

- THE TERGA MODEL -
(G.J.R SOER)

III.3. Choix d'un modèle simple de T_s

La température de surface $T_s(t)$ traduisant la réponse du pixel à une excitation extérieure, notamment au rayonnement solaire incident, l'étude de l'évolution de cette température nous amène à décomposer l'intervalle $[0, \theta]$ en trois parties distinctes où le sol a des comportements différents.

- pendant la nuit c'est-à-dire en l'absence du rayonnement solaire ($R_s(t) = c$), le système sol-proche atmosphère perd de l'énergie et tend vers un état d'équilibre ;

nous pouvons approcher valablement $T_s(t)$ par une loi linéaire décroissante et nous poserons dans ce cas.

$$T_s(t) = bt + c$$

- à l'instant t_L où commence à apparaître le soleil à l'horizon, le pixel ne répond pas instantanément et l'on se trouve alors amené à définir un intervalle $[t_L, t_L + St]$ siège d'un phénomène transitoire complexe.
- dans l'intervalle $[t_L + St, t_c]$, la température T_s est modulée par le rayonnement R_s avec toutefois un déphasage dû au temps de réponse, nous poserons alors :

$$T_s(t) = T_0 + a \sin \frac{t - St - t_L}{t_c - t} \pi$$

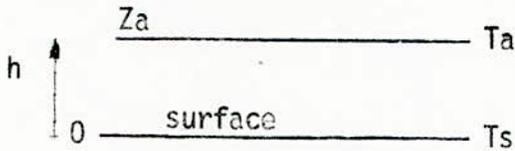
Nous décrivons ainsi $T_s(t)$ par deux relations simples fonctions de cinq paramètres T_0, a, b, c, St dont la détermination nécessite cinq mesures de T_s .

En fait l'écriture de la condition de continuité en $t_L + St$ permet de réduire le nombre de mesures à quatre.

III.4. Modélisation de T_a

On peut tout d'abord considérer que $T_a(t)$ représente la température de surface d'une couche $(0, z_a)$ et décrire de manière analogue à celle utilisée pour la description de T_s .

On aura dans ce cas besoin de quatre mesures de T_a à la hauteur z_a .



On peut également supposer que T_s influe directement sur T_a .

GEIGER (1965) propose une relation simple linéaire entre T_a et T_s .

$$\text{soit } T_a(t) = a (T_s - \bar{T}_s) + \bar{T}_a$$

où \bar{T}_s et \bar{T}_a représentent respectivement les valeurs moyennes de la température de surface et de la température de l'air.

L'examen des courbes (page 12, 13) montre que cette relation est très approximative et l'on constate que si le nuage est assez serré vers midi, la dispersion est d'autant plus grande que l'on s'éloigne de cet instant. L'erreur est d'autant plus importante que l'on s'éloigne des instants où $R_s(t)$ est maximum.

C'est pourquoi nous modifions cette formule en introduisant une fonction de correction ;

$$\alpha (t - t')^2 + \beta$$

et l'expression de T_a devient

$$T_a(t) = a (T_s - \bar{T}_s) + \bar{T}_a + \alpha (t - t')^2 + \beta.$$

où t' est un paramètre estimé à $\frac{t_L + t_C}{2}$

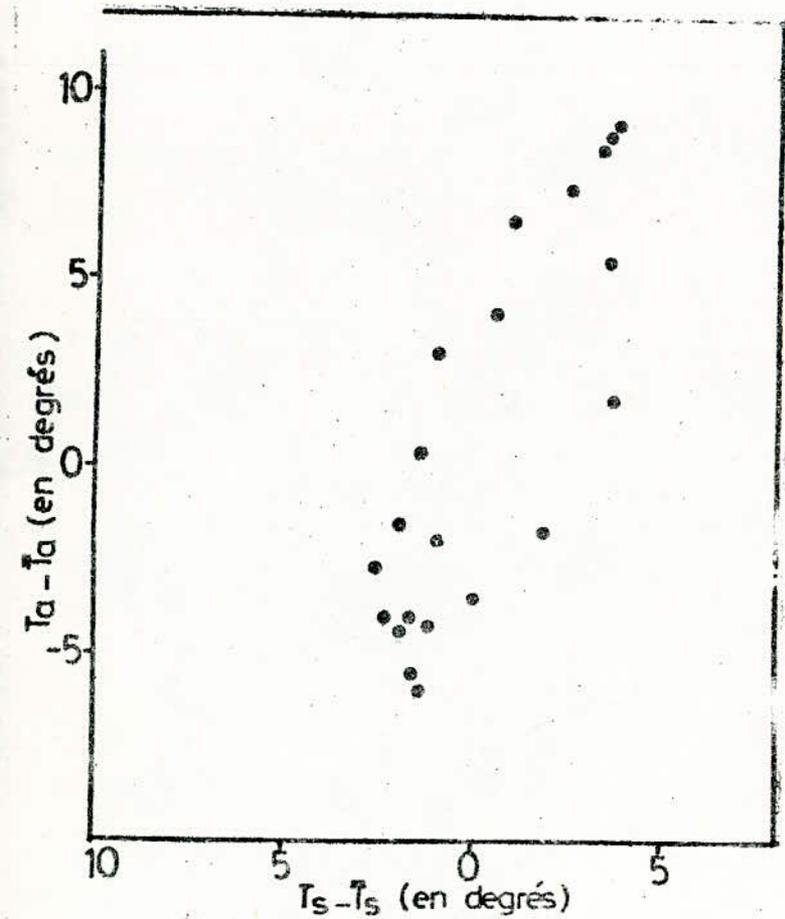
\bar{T}_a , a , α sont des paramètres dont la détermination nécessite trois mesures de T_a .

En fait on montrera que l'on peut tirer de l'expression de T_a une relation entre α et β .

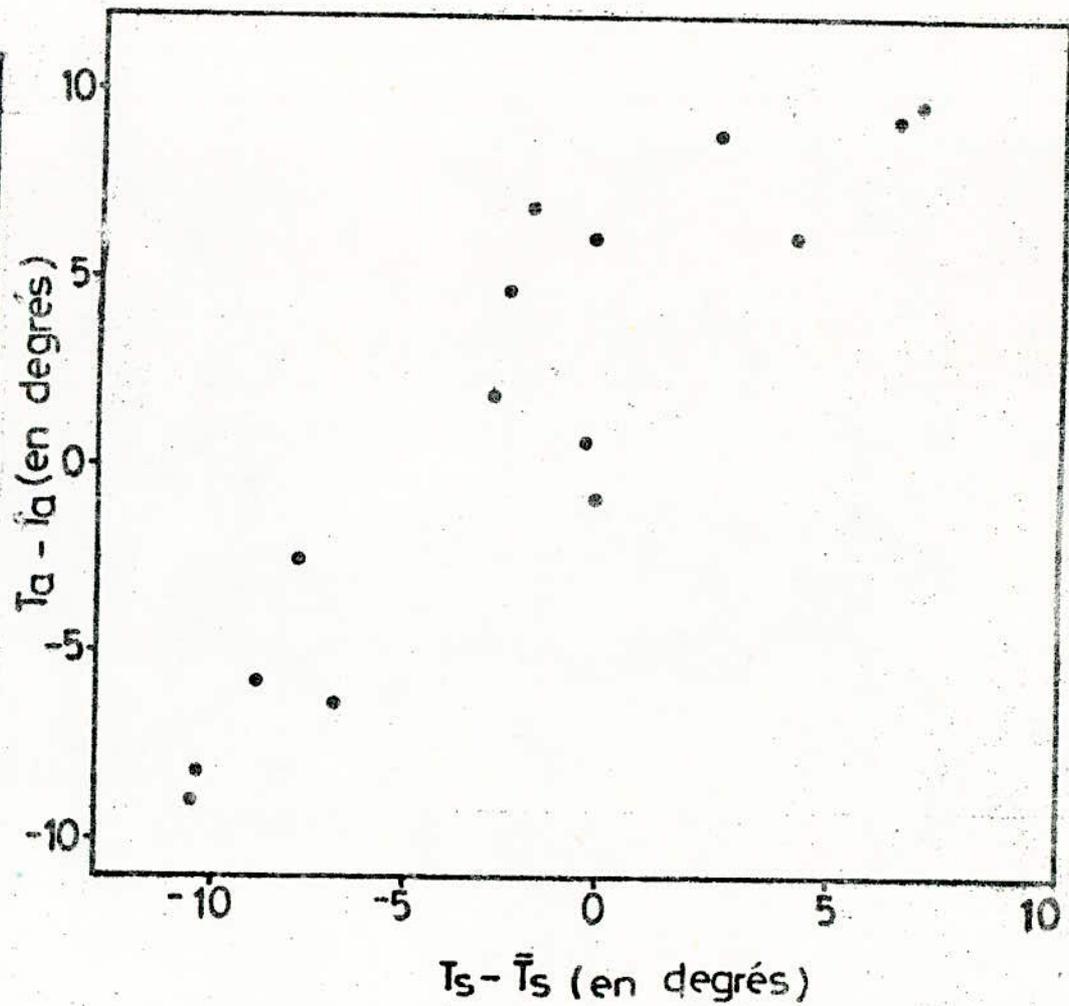
III.5. Modélisation de R_n

R_n est formulé à partir des courbes ou résultats d'expériences trouvées dans la bibliographie spécialisée.

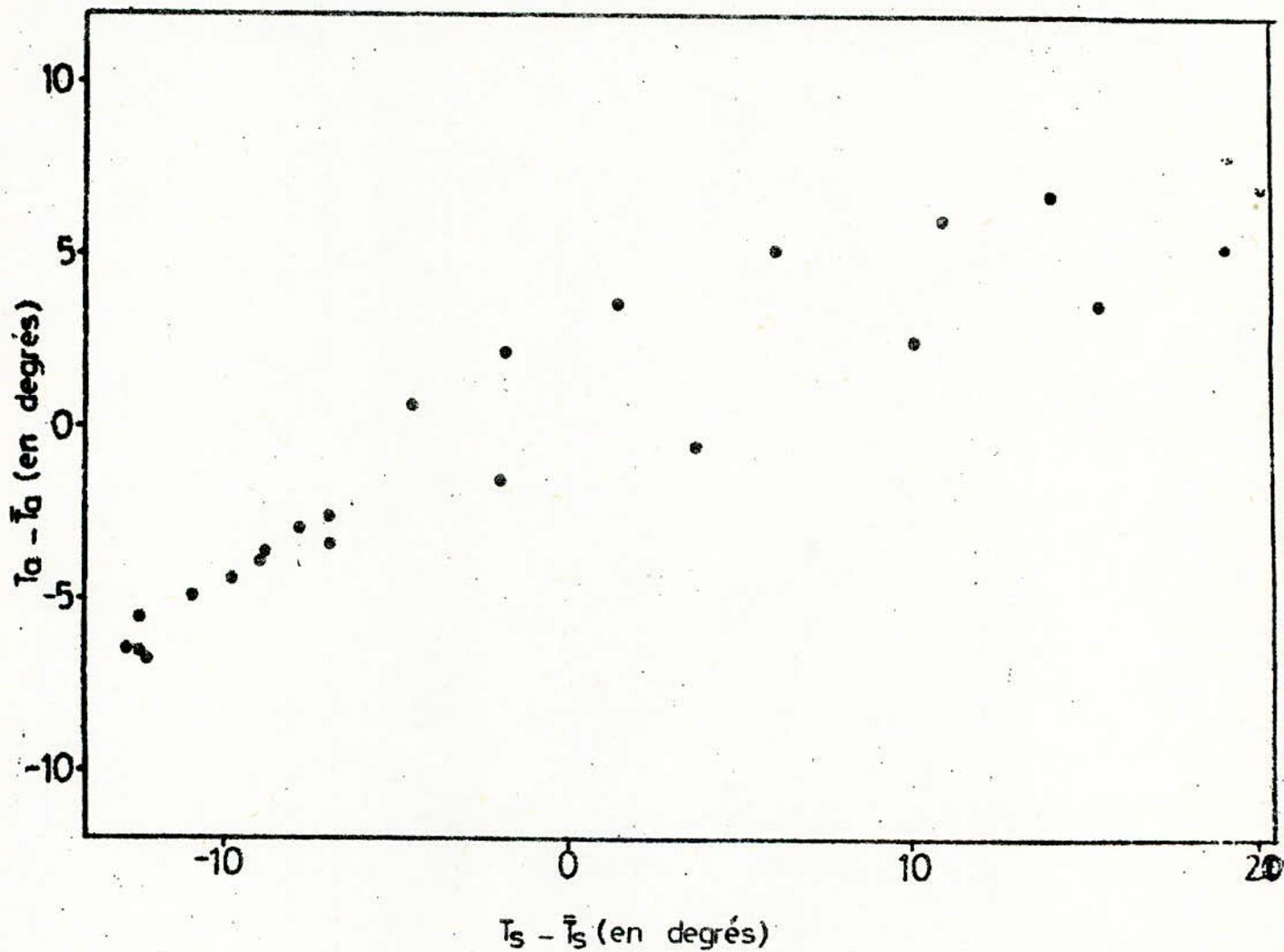
$$R_n(t) = \frac{a \sin \frac{t - t_L}{t_C - t} \pi}{1 + b \left[1 - \frac{t_L + t_C}{2} \right]^2}$$



Station de baraki (Alger)
2 Novembre 1980



D'après le TERGRA MODEL (Soer Novembre 1977)



Relevé de la station de bioclimatologie de L'INRAA - Avignon

journée du 27.7.78

IV. CALCUL DES PARAMETRES DU MODELE PROPOSE

IV.1. Introduction

Comme nous venons de le voir les fonctions $T_s(t)$, $T_a(t)$, $R_n(t)$ sont définis moyennant certains paramètres. La détermination de ces paramètres nécessitent un certain nombre de données représentant les valeurs de ces fonctions prises en des instants différents.

IV.2. Modèle de température de surface

L'intervalle $[t_L, t + \delta t]$ étant le siège d'un régime transitoire complexe on définit un gabarit à l'intérieur duquel s'inscrit la représentation graphique de la fonction T_s .

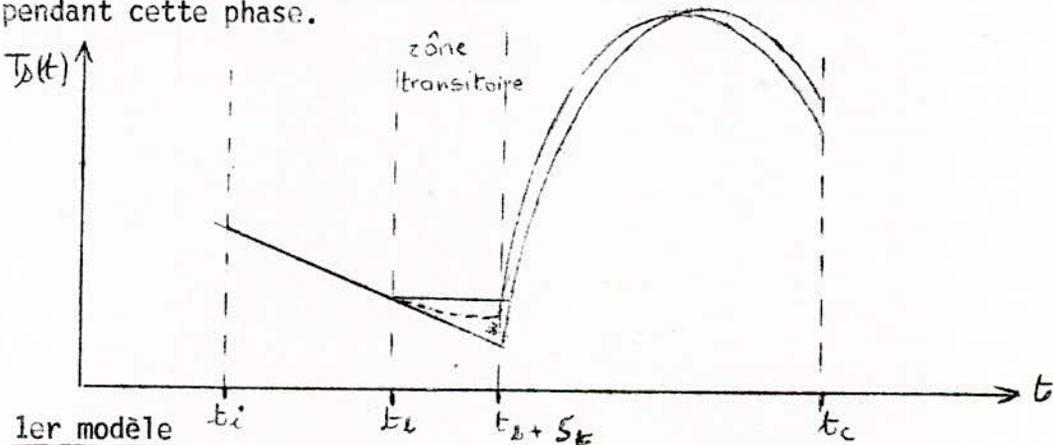
Pour cela deux modèles de T_s pourront être formulé.

a- 1er Modèle :

Dans l'intervalle $[t_L, t + \delta t]$ le sol rayonne librement de sorte que T_s est décrite par la loi $T_s = bt+c$

b- 2ème Modèle :

Dans l'intervalle $[t_L, t + \delta t]$ le rayonnement solaire arrive à compenser les pertes d'énergie du sol de sorte que la température T_s reste constante pendant cette phase.



1er modèle

$$T_s(t) = \begin{cases} bt + c & t_i \leq t \leq t_L + \delta t \\ T_0 + a \sin \frac{t - \delta t - t_L}{t_c - t_c} \pi & t_L + \delta t \leq t \leq t_c \end{cases}$$

2ème modèle

$$Ts(t) = \begin{cases} bt + c & t_i \leq t \leq t_L \\ d & t_L \leq t \leq t_L + St \\ To + a \sin \frac{t - St - t_L}{tc - t_L} \pi & t_L + St \leq t \leq tc \end{cases}$$

IV.2.1. Détermination analytique des paramètres optimaux de Ts

L'expression théorique de Ts(t) est :

$$Ts(t) = \begin{cases} bt + c & t_i \leq t \leq t_L \\ d & t_L \leq t \leq t_L + St \\ To + a \sin \frac{t - St - t_L}{tc - t_L} \pi & t_L + St \leq t \leq tc \end{cases}$$

L'équation de continuité aux instants t_L et $t_L + St$ s'écrit :

$$bt + c = d = To$$

On se propose de choisir des valeurs des paramètres To , a , St , b , c de sorte que la fonction obtenue décrive dans un certain ^{sens} de la meilleure manière possible le processus considéré.

La méthode largement répandue de résolution de ce type de problèmes est la méthode dite des moindres carrés. Elle consiste en ce qui suit :

On considère la somme S des carrés des différences entre les valeurs expérimentales notées $ETs(t_i)$ et celle de la fonction $Ts(t_i, To, a, St, b, c)$ aux points correspondants.

On doit chercher les paramètres de Ts de manière que cette somme ait la plus petite valeur possible.

L'expérience nous fournit N valeurs de la fonction Ts correspondantes à N valeurs du temps t .

$$\text{soit } S = \sum_{i=1}^N (ETs(t_i) - Ts(t_i))^2$$

Soit N_1 le nombre de points pris dans la nuit et N_2 l'indice du premier point pris dans le jour soit $N_2 = N_1 + 1$

On vérifie alors que

$$N_1 = PE \left(\frac{t_L - t_i + 1}{2} \right) + 1 ;$$

où PE désigne la partie entière

Posons :

$$S1 = \sum_{i=1}^{N1} (ETs (ti) - Ts (ti))^2$$

$$S2 = \sum_{i=N2}^N (ETs (ti) - Ts (ti))^2$$

d'où $S = S1 + S2$

S1 est une fonction de b et c

S2 est une fonction de To, St, a.

On admet que lorsque S est minimum, S1 et S2 le sont aussi de sorte que l'on puisse étudier séparément S1 et S2.

Il résulte du théorème de condition nécessaire pour l'existence d'un extremum que :

$$\frac{\partial S}{\partial b} = 0 ; \frac{\partial S}{\partial c} = 0 ; \frac{\partial S}{\partial a} = 0 ; \frac{\partial S}{\partial \sigma} = 0$$

ce qui implique :

$$\frac{\partial S_1}{\partial b} = 0 ; \frac{\partial S_1}{\partial c} = 0 ; \frac{\partial S_2}{\partial a} = 0 ; \frac{\partial S_2}{\partial \sigma} = 0$$

pour i variant de 1 à N1 on a : $Ts (ti) = bti + c$

d'où :

$$\left. \begin{matrix} \frac{\partial S_1}{\partial b} = 0 \\ \frac{\partial S_1}{\partial c} = 0 \end{matrix} \right\} \Leftrightarrow \begin{cases} \sum_{i=1}^{N1} [ETs (ti) - bti - c] ti = 0 \\ \sum_{i=1}^{N1} [ETs (ti) - bti - c] = 0 \end{cases}$$

soit après développement :

$$b \sum_{i=1}^{N1} ti^2 + c \sum_{i=1}^{N1} ti = \sum_{i=1}^{N1} Ts (ti) ti$$

$$b \sum_{i=1}^{N1} ti + N1 \times c = \sum_{i=1}^{N1} Ts (ti)$$

On obtient un système linéaire de deux équations à deux inconnues, pour $N1 > 1$; le déterminant du système est différent de zéro, le système admet toujours une solution soit :

$$b = \frac{N1 \sum_{i=1}^{N1} Ts (ti) ti - \sum_{i=1}^{N1} ti \sum_{i=1}^{N1} Ts (ti)}{N1 \sum_{i=1}^{N1} ti^2 - \sum_{i=1}^{N1} ti}$$

$$C = \frac{\sum_{i=1}^{N1} ti^2 \sum_{c=1}^{N1} Ts(ti) - \sum_{i=1}^{N1} ti \sum_{i=1}^{N1} Ts(ti)}{N1 \sum_{i=1}^{N1} ti^2 - \sum_{i=1}^{N1} ti^2}$$

pour i variant de N à N1 on a :

$$Ts(ti) = Ts(ti) = To + \sin \frac{ti - St - tL}{tc - tL} \pi$$

posant : $To - T(ti) = Ai$

$$\frac{ti - tL}{tc - tL} = Bi$$

$$\frac{- St}{tc - tL} = x$$

$$\alpha = Y \quad ; \quad y \neq 0$$

On aura :

$$\frac{\partial S_2}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial S_2}{\partial x} = 0 \quad \sum_{i=N_2}^N (y \sin(x+Bi) + Ai) y \cos(x+Bi) = 0$$

$$\frac{\partial S_2}{\partial \alpha} = 0 \quad \frac{\partial S_2}{\partial y} = 0 \quad \sum_{i=N_2}^N (y \sin(x+Bi) + Ai) \sin(x+Bi) = 0$$

Après développement le système ci-dessus s'écrit :

$$\sum_{i=N_2}^N Ai \cos(x+Bi) + \frac{1}{2} \sum_{i=N_2}^N \sin 2(x+Bi) y = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{i=N_2}^N Ai \sin(Bi+n) + \sum_{i=N_2}^N \sin^2(x+Bi) y = 0 \quad (2)$$

De l'équation (2) on tire y que l'on substitue dans (1)

$$\text{Soit } y = \frac{\sum_{i=N_2}^N Ai \sin(x+Bi)}{\sum_{i=N_2}^N \sin^2(x+Bi)}$$

On obtient l'équation en x suivant :

$$G(X) = 2 \left[\sum_{i=N_2}^N \sin^2 (x+Bi) \right] \left[\sum_{i=N_2}^N A_i \cos (x+Bi) \right] - \left[\sum_{i=N_2}^N \sin^2 (x+Bi) \right] \left[\sum_{i=N_2}^N A_i \sin (x+Bi) \right] = 0$$

En développant les quantités sous le signe "Σ" et en posant :

$$z = \operatorname{tg} x$$

$$A = \sum_{i=N_2}^N \cos^2 B_i$$

$$B = \sum_{i=N_2}^N \sin 2 B_i$$

$$C = \sum_{i=N_2}^N A_i \cos B_i$$

$$D = \sum_{i=N_2}^N A_i \sin B_i$$

On vérifie que $G(x) = \cos^3 X \quad G(z)$

$$\text{Avec } G(z) = \left[(BC-2AD)z + 2C(N-N_1) - 2AC - BD \right] (z^2 + 1)$$

Résolution de l'équation $G(X) = 0$

$$G(X) = 0 \Leftrightarrow (\cos x = 0 \text{ ou } G(z) = 0)$$

$$\cos x = 0 \quad x = (2k+1) \frac{\pi}{2} \quad k \in \mathbb{Z}$$

$$\text{Or } x = \frac{\delta t}{t_c - t_1} \quad x \in \left[-\frac{t_3 - t_1}{t_c - t_1} \pi ; 0 \right]$$

$$0 < \delta t < t_3 - t_1$$

donc $(2k+1) \frac{\pi}{2}$ est en dehors du domaine de x.

par conséquent $\cos x \neq 0$

$$G(z) = 0 \quad z = -\frac{2C(N-N_1) - 2AC - BD}{BC - 2AD} ; \text{ si } BC - 2AD \neq 0$$

si $BC - 2AD = 0$ l'équation n'a pas de solution

d'où : pour $BC \neq 2AD$ et $S_T \in [0, t_3 - t_1]$ les solutions du système sont :

$$S_{Ts} = \frac{t_L - t_c}{\pi} \text{ arcty } z.$$

$$a = \frac{D \cos x + C \sin x}{(N-N_2) - (2A-N+N_1) \cos 2x + B \sin 2x}$$

IV.2.2. Détermination des paramètres à partir d'un nombre minimum de données

IV.2.2.1. Calcul des paramètres de Ts donné par le 1er modèle

Rappelons l'expression de la température de surface donnée par le premier modèle.

$$Ts(t) \begin{cases} bt + c & t_i \leq t \leq t_L + S_T \\ To + \sin \frac{t - S_T - t_L}{t_c - t_L} \pi & t_L + S_T \leq t \leq t_c \end{cases}$$

à l'instant $t_L + S_T$, la fonction $Ts(t)$ doit être continue, ce qui permet d'écrire : $b(t_L + S_T) + C = To$

la détermination des paramètres b, c, To, a, S_T se fait par la donnée de quatre mesures de Ts . Ce qui nous conduit à résoudre le système suivant :

$$\begin{cases} bt_1 + c & = Ts(t_1) \\ bt_2 + c & = Ts(t_2) \\ b(t_L + S_T) + c & = To \\ To + \sin \frac{t_3 - S_T - t_L}{t_c - t_L} \pi & = Ts(t_3) \\ To + \sin \frac{t_4 - S_T - t_L}{t_c - t_L} \pi & = Ts(t_4) \end{cases}$$

où t_1, t_2 sont des instants des mesures effectuées la nuit

t_3, t_4 " " " " " " " pendant la journée

Notons aussi que : $0 \leq S_T \leq t_3 - t_L$

Les deux premières équations forment un système linéaire de deux équations à deux inconnues b et c . On tire donc :

$$b = \frac{Ts(t_1) - Ts(t_2)}{t_1 - t_2} \quad c = \frac{t_1 Ts(t_2) - t_2 Ts(t_1)}{t_1 - t_2}$$

Les trois paramètres sont solutions du système suivant :

$$S_T = \frac{T_0 - c}{b} - t_L$$

$$T_0 + \alpha \sin \frac{t_3 - S_T - t_L}{t_c - t_L} \pi = T_s(t_3)$$

$$T_0 + \alpha \sin \frac{t_4 - S_T - t_L}{t_c - t_L} \pi = T_s(t_4)$$

Algorithme de résolution :

On pose $A = \frac{\pi}{(t_L - t_c)b}$

$$B = -A(bt_3 + C)$$

$$C = -A(bt_4 + C)$$

$$D = AT_s(t_3)$$

$$X = AT_0$$

$$A1 = -B$$

$$A2 = A(bt + C)$$

$$E = AT_s(t_4)$$

La recherche des paramètres T_0 , S_T et α , va consister à résoudre l'équation :

$$G(X) = (D-X) \sin(X+B) - (E-X) \sin(X+C) = 0 \text{ dans le domaine } [A1, A2]$$

On démontre en annexe que l'équation $G(X) = 0$ peut admettre 0, 1 ou solutions dans l'intervalle $A1, A2$ selon que le produit $G(A1) G(A2)$ est :

- (1) négatif : dans ce cas $G(X)$ admet une solution
- (2) positif : $G(X)$ admet zéro ou deux solutions
- (3) nul : $A1$ ou $A2$ est solution

seul le cas (1) et (3) seront retenus.

Le paramètre S_T étant une caractéristique du milieu considéré, donc possédant une valeur unique, le 2^e cas est à rejeter.

La solution x de l'équation $G(X) = 0$ permet le calcul de $T_0 = \frac{X}{A}$

$$\text{d'où : } S_T = \frac{T_0 - c}{b} - t_L \quad \alpha = \frac{T_s(t_3) - T_0}{\sin(X+B)}$$

2.2.2.2. Calcul des paramètres de Ts donné par le 2ème module

L'expression de Ts est la suivante :

$$T_s(t) = \begin{cases} bt + c & t_i \leq t \leq t \\ d & t_i \leq t \leq t_L + S_T \\ T_0 + \sin \frac{t - S_T - t_L}{t_c - t_L} \pi & t_L + S_T \leq t \leq t_c \end{cases}$$

Les conditions de continuité aux points t et t + S_T donnent :

$$bt + c = d = T_0.$$

Comme dans le premier modèle, les paramètres b, c, T₀, S_T sont solutions d'un système de cinq équations à cinq inconnues obtenu à partir de quatre mesures de Ts en des instants différents. La cinquième équation traduit la continuité de la fonction Ts.

Les paramètres b et c sont donnés par les expressions suivantes :

$$b = \frac{T_s(t_1) - T_s(t_2)}{t_1 - t_2} \quad c = \frac{t_1 T_s(t_2) - t_2 T_s(t_1)}{t_1 - t_2}$$

où t₁ et t₂ sont les instants de mesure.

Le paramètre T₀ est donné par l'équation de continuité soit :

$$T_0 = bt + c \quad ; \quad t_L : \text{temps de levé du soleil}$$

Les paramètres S_T et t_c sont déterminés en résolvant le système :

$$\circ \sin \frac{t_3 - S_T - t_L}{t_c - t_L} \pi = T_s(t_3) - T_0$$

$$\circ \sin \frac{t_4 - S_T - t_L}{t_c - t_L} \pi = T_s(t_4) - T_0$$

qui est un système non linéaire de deux équations à deux inconnues

$$\text{Posons : } A = \frac{t_3 - t_L}{t_c - t_L} \pi \quad ; \quad B = \frac{t_4 - t_L}{t_c - t_L} \pi \quad C = \frac{T_s(t_3) - T_0}{T_s(t_4) - T_0} \quad D = \frac{\pi}{t_c - t_L}$$

La solution du système est pour S_T ∈ [0, t₃ - t_L] :

$$S_T = \frac{1}{D} \text{ Artg} \left(\frac{\sin A - C \sin B}{\cos A - C \cos B} \right)$$

$$\circ = \frac{T_s(t_3) - T_0}{(\sin A - D \cdot S_T)}$$

IV.3. Calcul des paramètres de $T_a(t)$

Rappelons que le modèle de T est le suivant :

$$T_a(t) = \alpha(T_s(t) - T_s) + \bar{T}_a + f(t)$$

$$\text{avec } f(t) = \alpha \left[t - \frac{t_L + t_c}{2} \right]^2 + \beta$$

On remarque que les paramètres de la T ne peuvent être déterminés sans la connaissance de $T_s(t)$.

en adoptant le premier modèle de la température de surface on a :

$$\bar{T}_s(t) = \frac{1}{24} \int_{t_i}^{t_i+24} T_s(t) dt ; \text{ tout calcul fait on obtient :}$$

$$\bar{T}_s = \frac{c}{24} (t_L + S_T - t_i) + \frac{b}{48} \left[(t_L + S_T)^2 - t_i^2 \right] + \frac{T_0}{24} (t_L + S_T - t_c)$$

$$+ \frac{a}{24} \times \frac{t_c - t_L}{\pi} \left(1 + \cos \frac{S_T \pi}{t_c - t_L} \right)$$

pour le 2ème modèle on obtient :

$$\bar{T}_s = \frac{c}{24} (t_L + S_T - t_i) + \frac{b}{48} (t_L^2 - t_i^2) + \frac{T_0}{24} (t_L + 2 S_T - t_c) +$$

$$+ \frac{a}{24} \frac{t_c - t_L}{\pi} \left(1 + \cos \frac{S_T \pi}{t_c - t} \right)$$

Le paramètre \bar{T}_a représente la moyenne de $T_a(t)$ dans l'intervalle $[t_i, t_c]$

On doit donc avoir $\bar{f}(t) = 0$

Ceci permet de tirer une relation entre α et β

$$\text{soit : } \beta = K \alpha \quad \text{avec } K = - \frac{1}{3(t_c - t_L)} \left[\left(t_c - \frac{t_L + t_c}{2} \right)^2 - \left(t_i - \frac{t_L + t_c}{2} \right)^2 \right]$$

T_a est donc défini moyennant trois paramètres : α , \bar{T}_a et α

la détermination de ces paramètres nécessitent trois données.

Pour ce faire, on effectue une mesure la nuit et deux mesures le jour.

soient $(t_2, T_a(t_2)) ; (t_3, T_a(t_3)) ; (t_4, T_a(t_4))$ les données.

On est alors conduit à résoudre le système suivant :

$$(T_s(t_2) - \bar{T}_s) a + \bar{T}_a + \left[\left(t_2 - \frac{t_c + t_L}{2} \right)^2 + K \right] \alpha = T_a(t_2)$$

$$(T_s(t_3) - \bar{T}_s) a + \bar{T}_a + \left[\left(t_3 - \frac{t_c + t_L}{2} \right)^2 + K \right] \alpha = T_a(t_3)$$

$$(T_s(t_4) - \bar{T}_s) a + \bar{T}_a + \left[\left(t_4 - \frac{t_c + t_L}{2} \right)^2 + K \right] \alpha = T_a(t_4)$$

qui est un système linéaire de trois équations à trois inconnues.

posons :

$$\begin{aligned} T_s(t_2) - \bar{T}_s &= A_{11} & \left(t_2 - \frac{t_c + t_L}{2} \right)^2 + K &= A_{13} \\ T_s(t_3) - \bar{T}_s &= A_{21} & \left(t_3 - \frac{t_c + t_L}{2} \right)^2 + K &= A_{23} \\ T_s(t_4) - \bar{T}_s &= A_{31} & \left(t_4 - \frac{t_c + t_L}{2} \right)^2 + K &= A_{33} \end{aligned}$$

Le déterminant du système est :

$$\Delta = -A_{21} A_{33} + A_{23} A_{31} + A_{11} A_{33} - A_{13} A_{31} - A_{11} A_{23} + A_{13} A_{21}$$

les expressions donnant les paramètres sont les suivantes :

$$a = \left[-T_a(t_3) A_{33} + A_{23} T_a(t_4) + T_a(t_2) A_{33} - A_{13} T_a(t_4) - T_a(t_2) A_{23} + A_{13} T_a(t_3) \right] / \Delta$$

$$T_a = \left[-T_a(t_2) (A_{21} A_{33} - A_{23} A_{31}) + T_a(t_3) (A_{11} A_{33} - A_{13} A_{31}) - T_a(t_4) (A_{11} A_{23} - A_{13} A_{21}) \right] / \Delta$$

$$\alpha = \left[-A_{21} T_a(t_4) + A_{31} T_a(t_3) + A_{11} T_a(t_4) - A_{31} T_a(t_2) - A_{11} T_a(t_3) + A_{13} T_a(t_2) \right] / \Delta$$

IV.4. Calcul des Paramètres de R_n :

Le modèle de R_n étant le suivant :

$$R_n(t) = \frac{a \sin \frac{t-t_L}{t-t}}{1+b \left[t - \frac{t_c+t_2}{2} \right]^2}$$

deux mesures de R_n seront nécessaires pour déterminer a et b ,

soient $(t_3, R_n(t_3))$ et $(t_4, R_n(t_4))$ ou t_3 et t_4 sont les instants des mesures effectuées le jour.

On a alors à résoudre le système suivant :

$$\text{SIN} \frac{t_3 - t_L}{t_c - t_L} \pi \times a - R_n(t_3) \left(t_3 - \frac{t_c + t_L}{2} \right)^2 = R_n(t_3)$$

$$\text{SIN} \frac{t_4 - t_L}{t_c - t_L} \pi \times a - R_n(t_4) \left(t_4 - \frac{t_c + t_L}{2} \right)^2 = R_n(t_4)$$

qui est un système linéaire de deux équations à deux inconnues a et b

$$\begin{aligned} \text{posons : } B_{11} &= \text{SIN} \frac{t_3 - t_L}{t_C - t_L} \pi & B_{12} &= - \text{Rn}(t_3) \left(t_3 - \frac{t_C + t_L}{2} \right)^2 \\ B_{21} &= \text{SIN} \frac{t_4 - t_L}{t_C - t_L} \pi & B_{22} &= - \text{Rn}(t_4) \left(t_4 - \frac{t_C + t_L}{2} \right)^2 \end{aligned}$$

le déterminant du système est :

$$\Delta = B_{11}B_{22} - B_{12}B_{21}$$

les paramètres seront donc :

$$a = [\text{Rn}(t_3) B_{22} - B_{12} \text{Rn}(t_4)] / \Delta$$

$$b = [B_{11} \text{Rn}(t_4) - \text{Rn}(t_3) B_{21}] / \Delta$$

V. Validation du Modèle

Les paramètres du modèle sont déterminés soit à partir d'un nombre minimum de données égal au nombre de paramètres, soit à partir de plusieurs données. Ce dernier cas n'a été traité que pour T_s mais peut être étudié pour T_a et R_n .

Les résultats obtenus à partir des modèles proposés ont été comparés à des résultats de référence.

Nous disposons de quatre échantillons qu'on notera E_1, E_2, E_3, E_4 .

Ces échantillons ne sont autre que des tableaux de valeurs expérimentales ou simulées de T_s, T_a, R_n relevées au cours au ~~cours~~ de 24 heures.

- E_1, E_2 concernent des résultats du TERGA MODEL (SOER, 1975). E_1 correspond à un sol humide et E_2 à un sol sec. Les valeurs ont été relevées dans la période du 7 Juillet 1975 à 20h au 8 juillet 1975 à 20h. Le temps de lever et de coucher étant respectivement estimés à partir de R_s : $T_L = 4,5h$ et $T_C = 20,2h$.

- E_3, E_4 : proviennent de la zone irriguée du site expérimental de LACRAU. Les valeurs ont été relevées au cours de la journée du 27 juin 1978 pour E_3 ($T_L = 4,3h$ et $T_C = 18,6h$) E_4 correspond à la journée du 29 Juin 78 ($T_L = 4,4h$; $T_C : 18h$).

Pour tester nos modèles, nous sommes amenés à déterminer pour chaque échantillon et pour des choix suffisants de données, les divers paramètres du modèle.

Le travail nécessite l'emploi d'un ordinateur.

V.1. Résolution du problème par ordinateur

Le programme de recherche des paramètres a été rédigé en FORTRAN IV. Ce programme, après avoir initialement "généralisé" une combinaison (t_1, t_2, t_3, t_4) des instants de mesures effectués le calcul des paramètres et consigne sous forme de tableaux les valeurs prises par les expressions de T_s, T_a, R_n , de l'instant initial - 4h (correspond à 20h de la journée précédente) à 20h,

ainsi que les écarts quadratiques moyen entre les valeurs expérimentales et les valeurs théoriques. Les instants de mesures ont été espacés d'un multiple de 4 heures. (contrainte satellitaire)

On dispose ainsi de valeurs théoriques et expérimentales à confronter. Les divers symboles introduits dans le programme ont la signification suivantes :

T, ET désigne le temps

TS, TA, RN : valeurs théoriques de TS, Ta, Rn respectivement !

ETS, ETA, ERN : valeurs expérimentales de TS, Ta, Rn respectivement

BS, CS, AS, TO, DT : représentent les paramètres de TS soit : b, c, a, To, St.

AA, ALPHA, TAM, AKA : " " " de Ta soit : a, x, Ta, k.

AN, BN : " " " de Rn soit : a, b.

SUMS : erreur quadratique moyenne entre ETS et TS

SUMA : " " " " ETA et TA

SUMR : " " " " ERN et RN

L'Organigramme et le programme de calcul des paramètres sont donnés en pages suivantes.

V.2. Présentation des résultats

V.2.1. Présentation graphique de l'écart quadratique moyen

Pour chaque échantillon, on représente par un point l'écart quadratique moyen pour un choix donné des instants de mesures, lorsque cet écart est "jugé" faible. On le représente par une croix lorsque sa valeur est "jugée" excessive.

Ces graphes (voir pages 28, 29, 30 et 31) font apparaître une répartition des points en deux catégories.

- la 1ère catégorie qui correspond à des choix des instants de mesures donnant des écarts quadratiques moyens faibles et localisés.
- la 2è catégorie qui correspond à des choix des instants de mesures donnant des écarts quadratiques moyen importants et dispersés.

V.2.2. Influence des instants de mesures sur les paramètres

- avec perturbation : Ce cas a été écarté puisque le modèle suppose les conditions atmosphériques idéales. Dans ce cas tous les choix des instants de mesures ayant donnés des écarts quadratiques importants ont été rejetés.

- sans perturbations : Les divers paramètres calculés correspondant aux choix retenus sont reportés dans les tableaux des pages (32 et 33).
On remarque que le choix des instants pour de bonnes conditions admosphériques n'influent pas tellement sur les valeurs des paramètres.

V.2.3. Allures des courbes expérimentales et théoriques de T_s, T_a, R_n

Ces courbes sont tracées à partir des valeurs consignées dans les tableaux des pages (34 et 35).

A chaque tableau de données expérimentales lui correspond un tableau des valeurs optimales.

Les figures de la page (40) montre l'influence des choix des données sur l'allure de la fonction $T_s(t)$

- avec perturbations :

toutes les courbes obtenues sont délimitées par les 2 courbes tracées avec le symbole. (—○—○—○—)

- sans perturbation

toutes les courbes obtenues sont délimitées par les 2 courbes tracées en trait gras lesquelles chevauchent la courbe expérimentale.

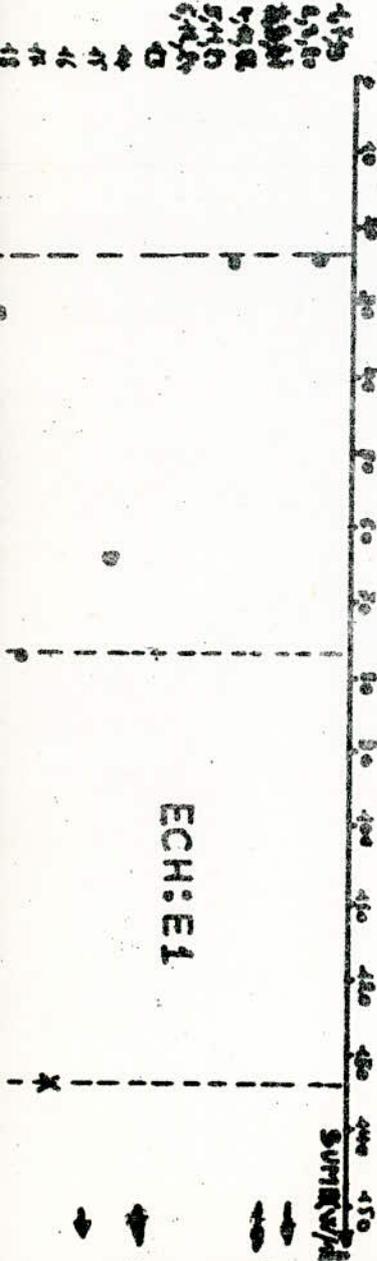
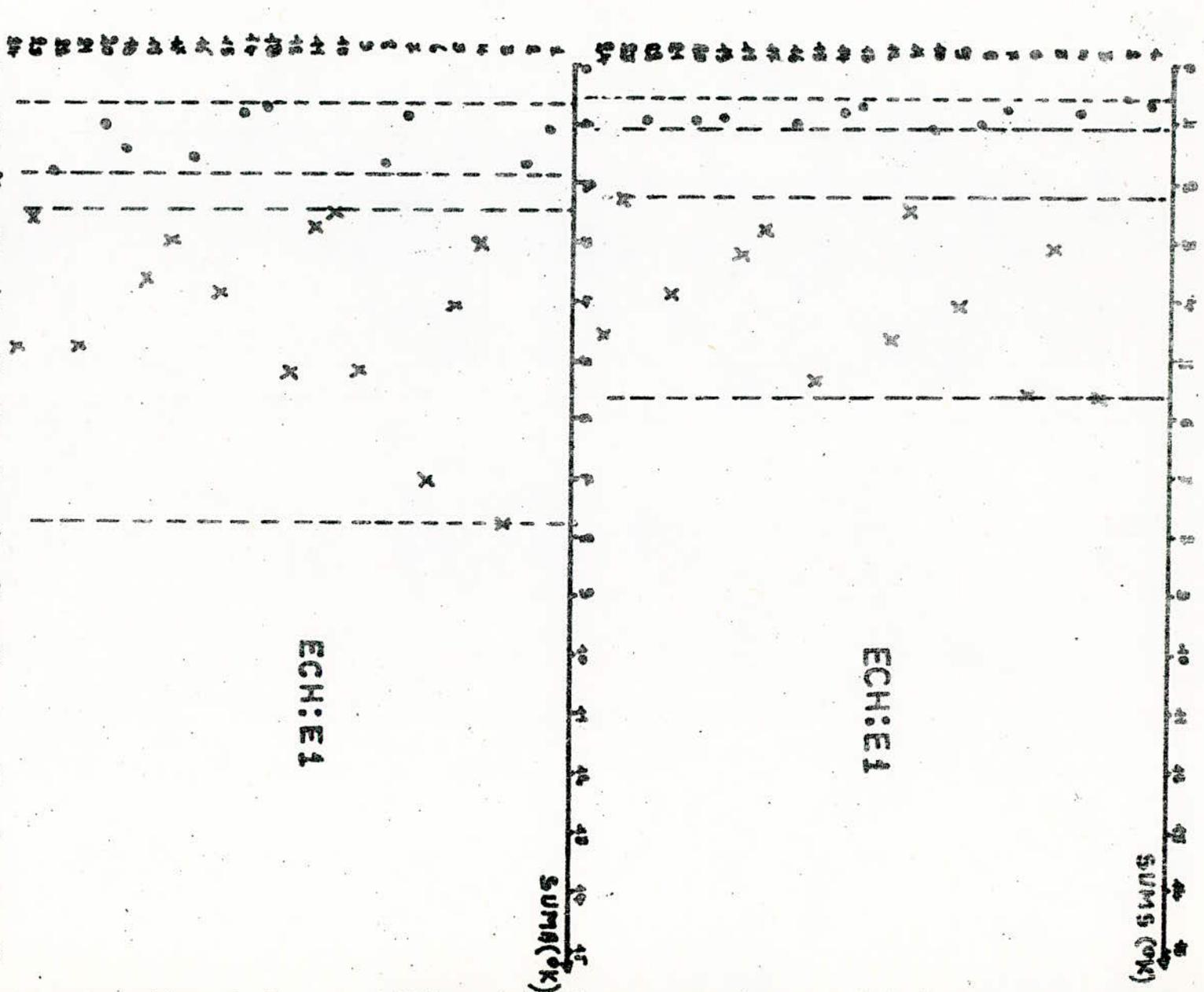
NUMEROTAGE

DES CHOIX DES INSTANTS

DONNANT UNE SOLUTION

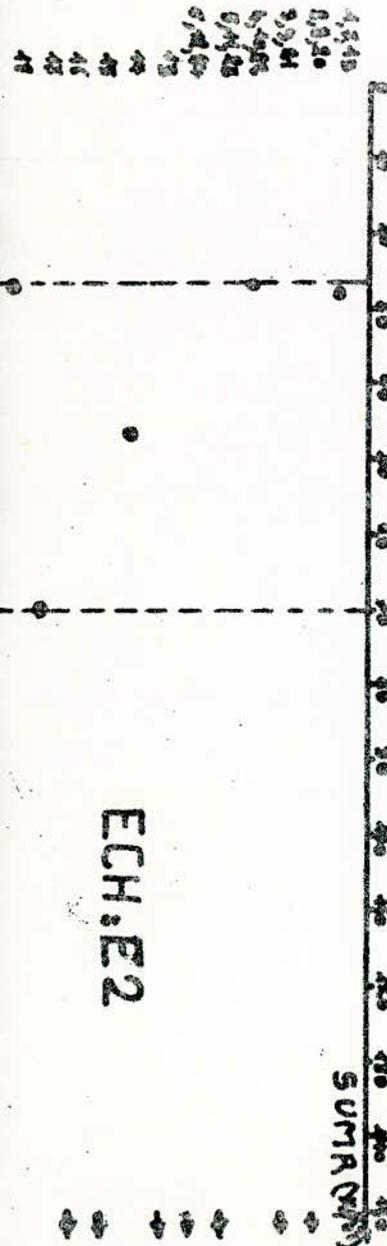
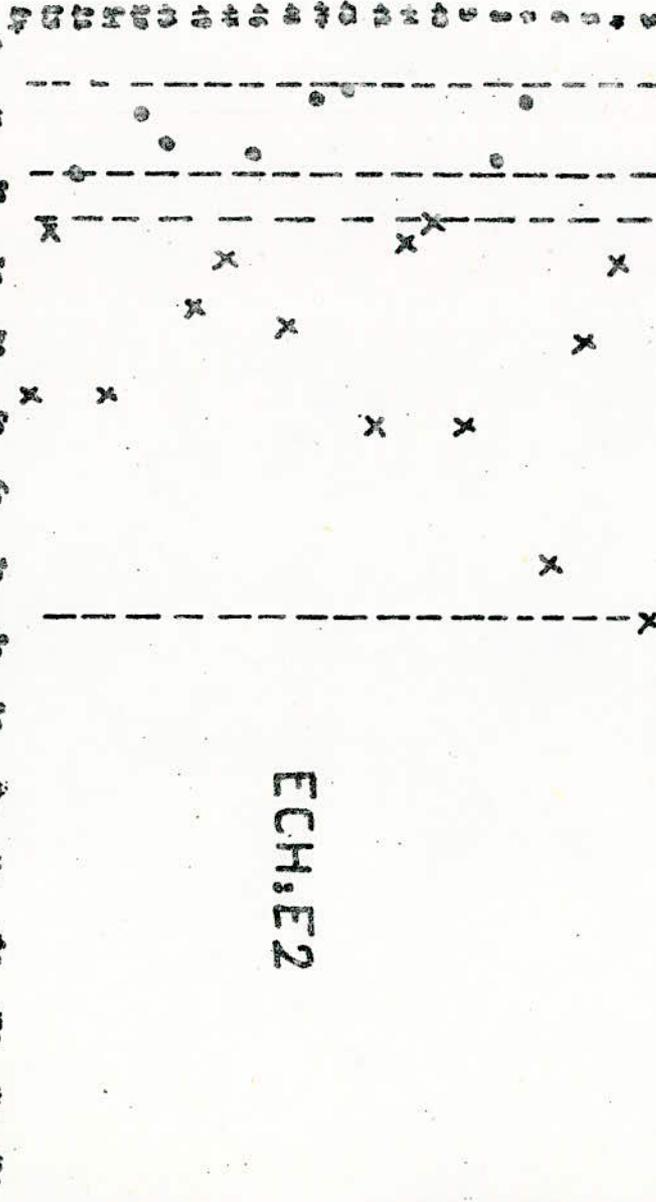
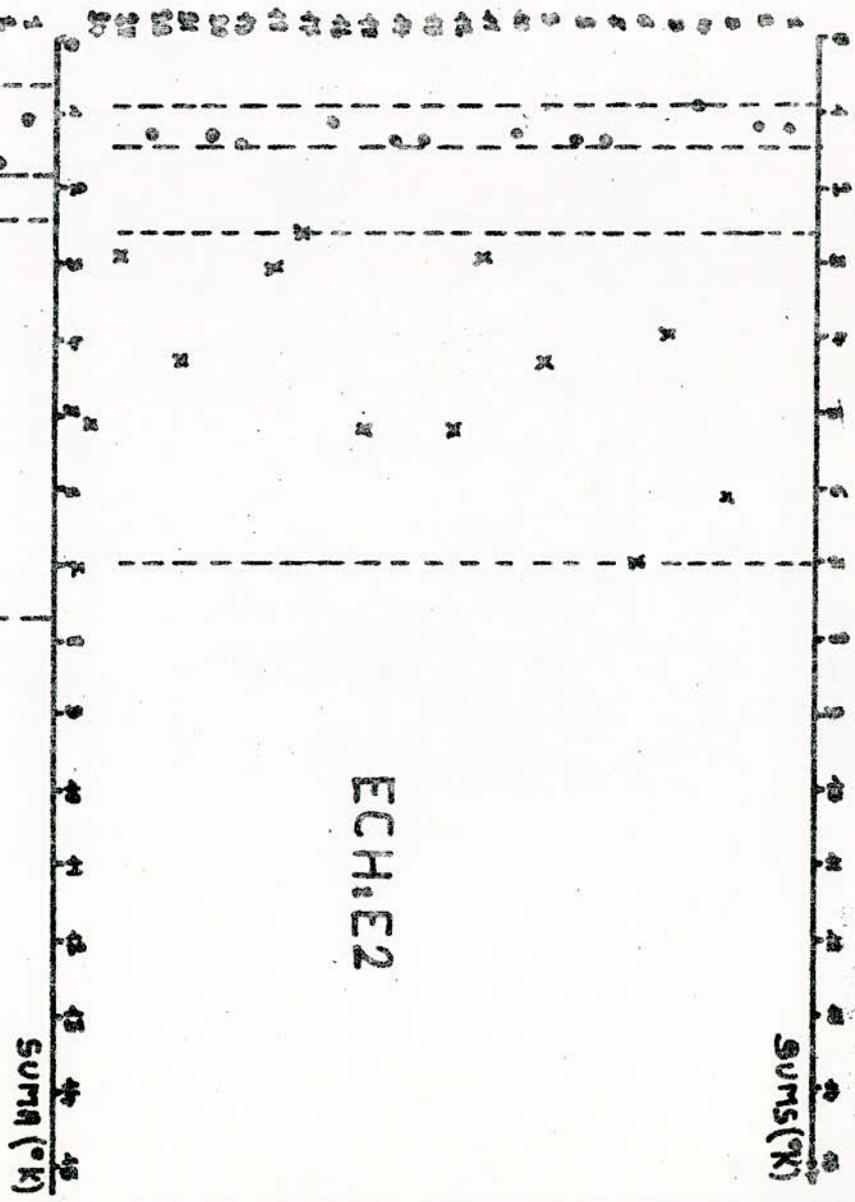
T ₁ (heure)	T ₂ (heure)	T ₃ (heure)	T ₄ (heure)	N°
-4	0	8	12	1
-4	0	8	16	2
-4	0	8	20	3
-4	0	12	16	4
-4	0	12	20	5
-4	0	16	20	6
-4	4	8	12	7
-4	4	8	16	8
-4	4	8	20	9
-4	4	12	16	10
-4	4	12	20	11
-4	4	16	20	12
-2	2	6	10	13
-2	2	6	14	14
-2	2	6	18	15
-2	2	10	14	16
-2	2	10	18	17
-2	2	14	18	18
4	0	8	12	19
4	0	8	16	20
4	0	8	20	21
4	0	12	16	22
4	0	12	20	23
4	0	16	20	24

ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE
OBTENUE A PARTIR DES DIFFERENTS
CHOIX DES INSTANTS DE MESURE

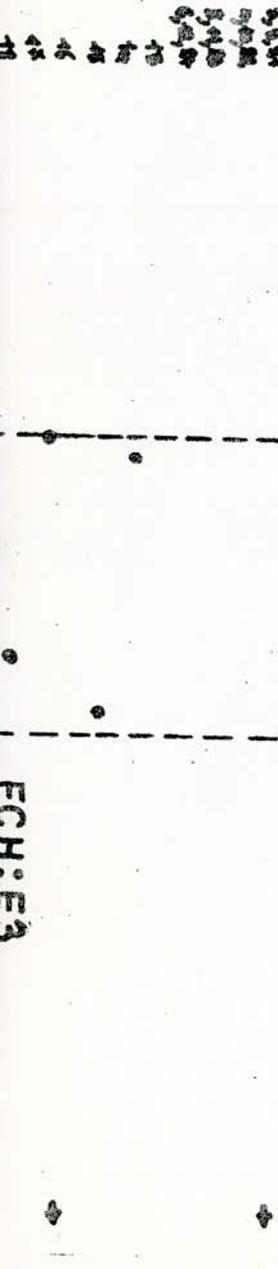
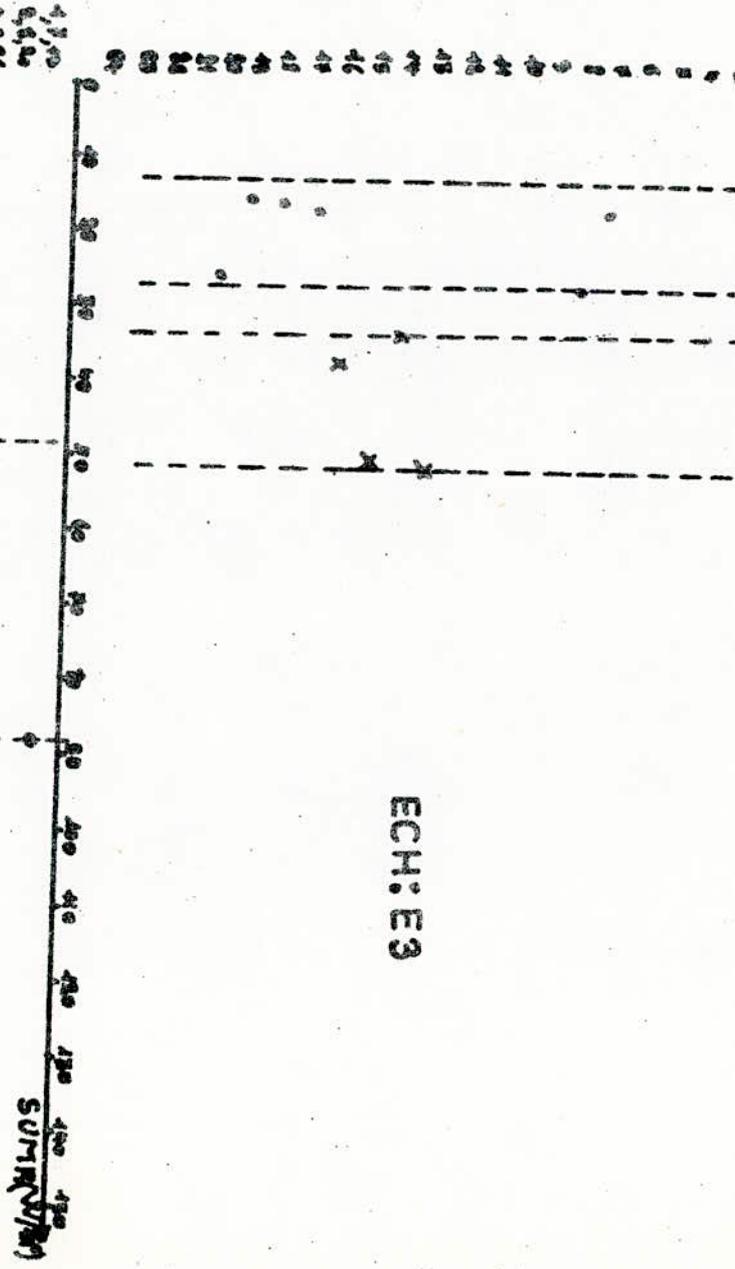
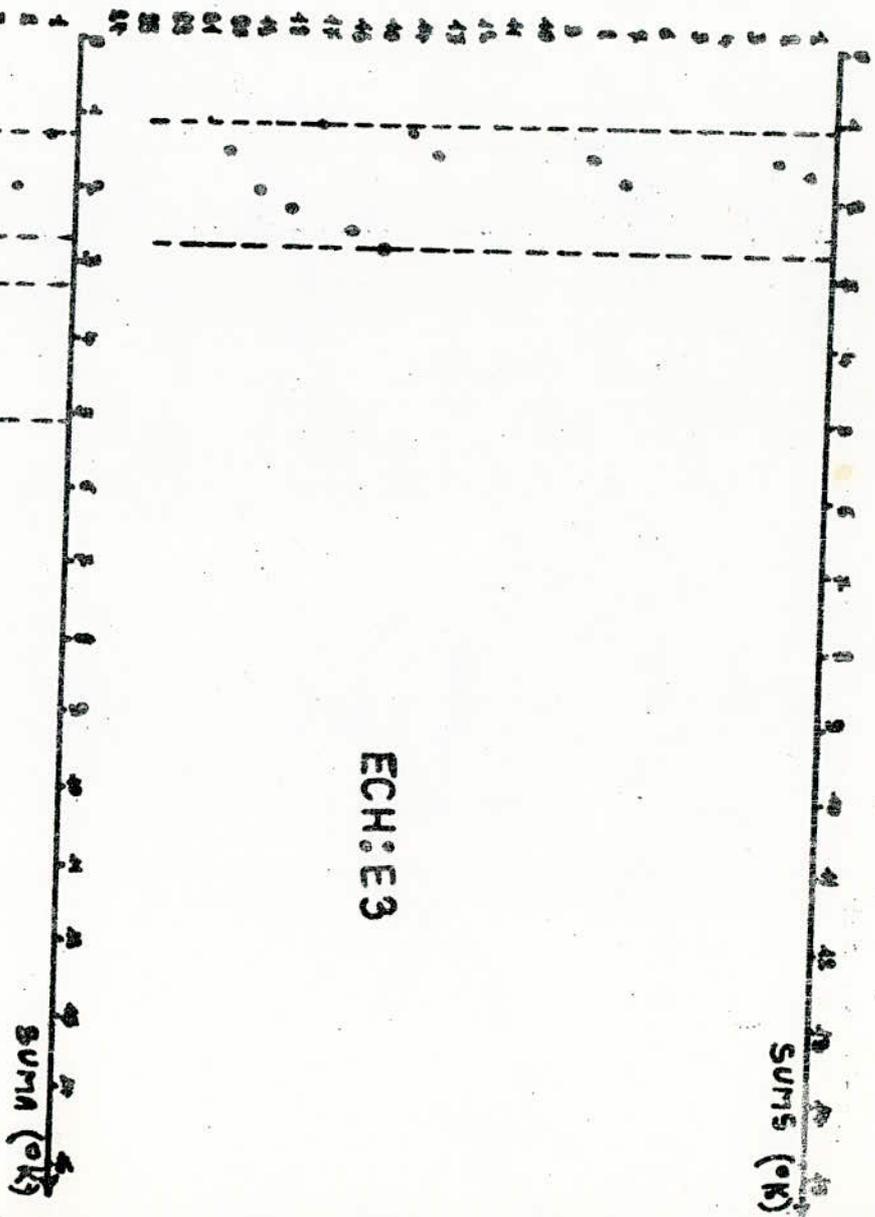


ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE
 OBTENUE A PARTIR DES DIFFERENTS
 CHOIX DES INSTANT DE MESURE

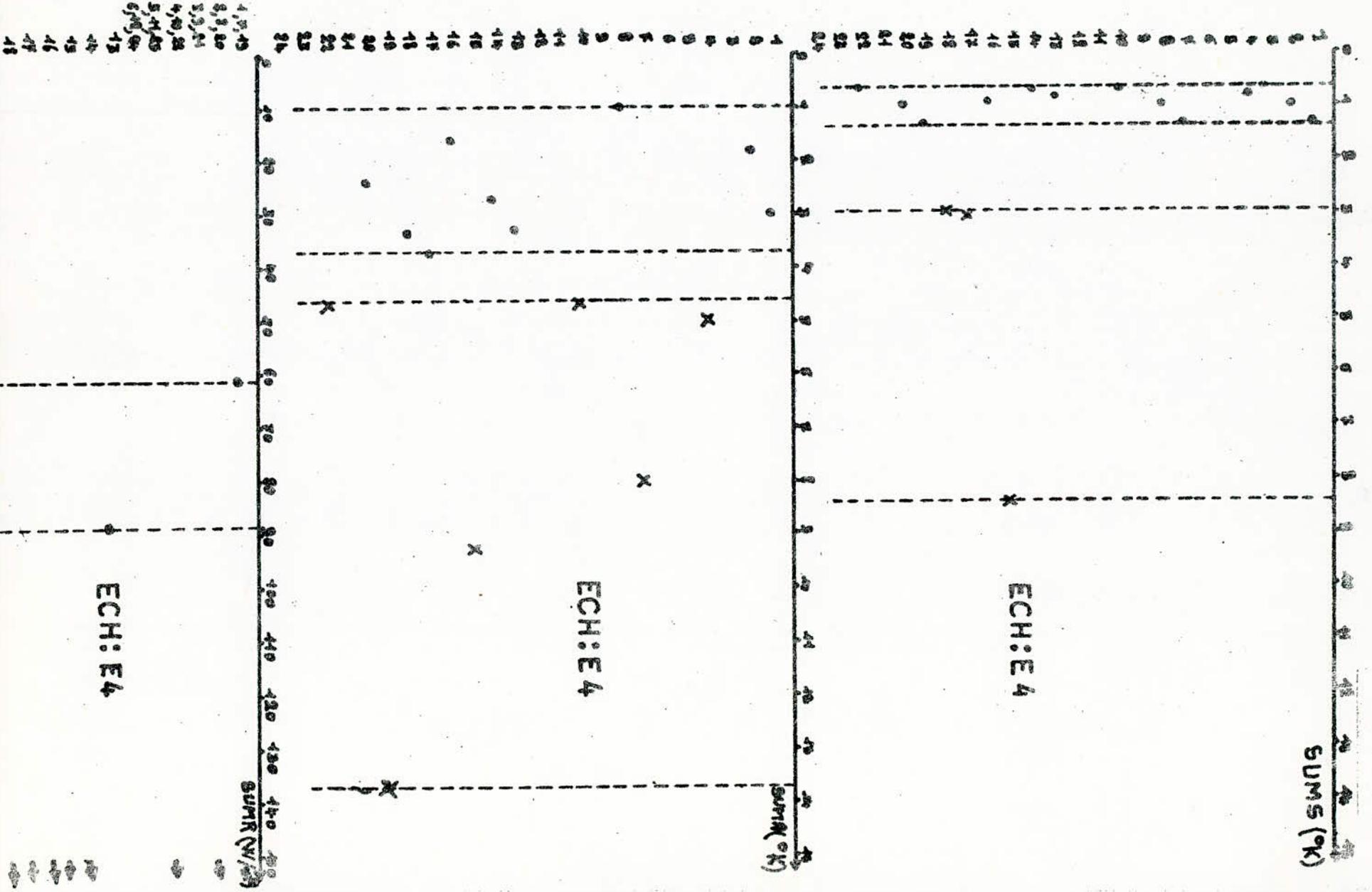
0.01 x ECH



ERREUR QUADRATIQUE MOYENNE
 OBTENUE A PARTIR DES DIFFERENTS
 CHOIX DES INSTANTS DE MESURE



PAR SUR QUADRANTIQUE
 • TEMPERATURES LES DIFFERENTS
 CHOIX DES INDIANTS DE MESURE



PARAMETRES CORRESPONDANTS AUX CHOIX DE LA 1^{re} CATEGORIE

ECH: E1

NE DU CHOIX	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	β ₁ (°K/A)	C ₁ (°K)	α ₁ (°K)	T ₀ (°K)	β _T (K ⁻¹)	α ₂	α ₃ (K/A)	α ₄ (K/m ²)	β _T
1	292.2	293.6	-0.0	296.3	20.4	292.6	.23	4.04	.05	468	.03
2	292.2	294.4	"	"	20.2	"	.25	4.25	.06		
4	292.2	293.7	"	"	20.3	"	.24	4.25	.11	469	.05
7	293.0	294.3	-0.64	294.6	19.7	294.4	.55	4.02	.03	468	.03
8	292.5	293.6	"	"	17.6	"	.34	4.01	.07		
10	293.0	294.1	"	"	18.3	"	.06	4.01	.09	469	.05
13	292.8	294.1	-0.65	296.1	19.6	295.2	.48	4.04	.06		
14	292.8	294.0	"	"	21.0	"	.29	.33	.05	445	.12
16	292.6	293.5	"	"	20.7	"	.62	.33	.02	436	.002
17										425	.12
18										530	.06
19	292.8	294.0	-0.40	296.3	18.8	294.5	.57	4.02	.05	468	.02
20	292.5	293.4	"	"	17.9	"	.37	4.02	.07		
22	292.7	293.8	"	"	18.4	"	.05	4.01	.09	469	.05

ECH: E2

NE DU CHOIX	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	β ₁ (°K/A)	C ₁ (°K)	α ₁ (°K)	T ₀ (°K)	β _T (K ⁻¹)	α ₂	α ₃ (K/A)	α ₄ (K/m ²)	β _T
1	293.7	293.1	-1.03	294.5	30.0	293.9	.60	.64	.02	425	.05
2	293.3	294.4	"	"	28.8	"	.47	.80	.04		
4	293.6	293.3	"	"	29.7	"	.23	.80	.03	430	.06
7	294.6	292.8	-0.53	293.4	28.2	291.3	.23	.68	-.02	425	.03
8	293.8	295.1	"	"	26.0	"	.37	.76	.05		
10	294.5		"	"	29.7	"	4.66	.62		474	-.04
13	293.2	294.4	-0.88	294.2	28.0	290.4	.41	.74	.07		
14	294.2	294.2	"	"	30.4	"	.21	.67	.06	533	.14
16	293.3	293.6	"	"	29.8	"	.60	.67	.02		
17										661	.12
18										475	.08
19	294.3	292.6	-0.55	284.5	27.0	282.0	.25	.67	-.02	425	.03
20	293.5	294.9	"	"	29.8	"	.57	.75	.05		
22	294.2	295.1	"	"	29.6	"	4.64	.68	.05	424	-.04

PARAMETRES CORRESPONDANTS AUX CHOIX DE LA 1^{re} CATEGORIE

ECH: E3

NR DU CHOIX	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	b ₃ (°K/A)	c ₃ (°K)	a ₃ (°K)	T ₀ (°K)	t _T (heure)	α _A	α _A (°K/A ²)	Q _N (W/A ²)	b _N
1	298.7	295.7	-0.70	287.1	35.2	284.0	1.13	.42	.03	520	.14
2	296.6	293.9	"	"	33.3	"	.56	.60	.07		
7	299.2	299.0	-0.56	287.7	34.2	285.2	1.23	.40	.05	520	.14
8	296.8	295.1	"	"	27.6	"	.57	.43	.07		
13	298.2		-0.68	287.1	33.1	284.2	.54			557	.05
14	297.2		"	"	30.6	"	.43			743	.01
16	297.7		"	"	31.7	"	.10			456	-0.03
17	298.8	294.0	"	"	33.9	"	.75	.44	.06	692	.14
18	296.5	293.8	"	"	29.2	"	1.04	.30	.05		
19	299.0	294.9	-0.43	287.1	34.1	285.2	1.24	.40	.05	520	.14
20	296.6	295.0	"	"	27.5	"	.57	.43	.07		

ECH: 4

NR DU CHOIX	T ₁ (°K)	T ₂ (°K)	b ₃ (°K/A)	c ₃ (°K)	a ₃ (°K)	T ₀ (°K)	t _T (heure)	α _A	α _A (°K/A ²)	Q _N (W/A ²)	b _N
1	298.3	295.1	-0.45	289.2	28.0	287.2	1.41	.34	-0.03	550	.03
2	297.8	296.4	"	"	28.0	"	1.26	.58	.01		
4	298.4		"	"	28.5	"	1.05				
7	298.4		-0.42	289.3	28.6	287.4	1.43			550	.03
8	297.8		"	"	26.7	"	1.26				
10	298.4		"	"	28.3	"	1.03				
13	298.2	294.6	-0.43	289.2	28.0	287.2	.90	.44	-0.02	514	.07
14	298.0	295.1	"	"	27.5	"	.89	.49	-0.01		
16	298.1	295.7	"	"	27.7	"	.83	.49	.02		
17		296.8						.52	.05		
18		296.9						.49	.05		
19	298.3		-0.40	289.2	28.6	287.4	1.43			550	.03
20	297.7	296.0	"	"	26.7	"	1.26	.63	.006		
21	298.4		"	"	28.3	"	1.03	.46	.07		

ECH:E1

VALEURS
EXPERIMENTALES

VALEURS
THEORIQUES
OPTIMUMS

T (heure)	T _A (°K)	T _G (°K)	R _g (W/m²)	T _A (°K)	T _G (°K)	R _g (W/m²)
- 4.0	289.6	285.8	-22.3	289.0	285.7	-50.6
- 2.0	287.4	281.4	-44.4	287.8	281.9	-61.9
0 0.0	286.3	282.1	-50.2	286.6	282.6	-64.8
0 2.0	284.6	283.4	-47.2	285.3	285.7	-52.6
0 4.0	284.7	284.9	-35.6	284.1	285.3	-14.9
0 6.0	288.8	287.6	023.2	288.2	287.6	062.7
0 8.0	294.8	294.7	194.2	293.2	294.6	191.2
1 0.0	300.8	300.1	306.0	300.8	300.1	357.1
1 2.0	302.8	303.3	465.3	302.8	303.2	465.3
1 4.0	303.4	303.7	410.8	302.5	305.5	402.8
1 6.0	298.5	302.9	209.6	299.0	301.1	247.9
1 8.0	299.2	300.8	062.5	295.8	296.7	101.0
2 0.0	292.9	296.7	-14.8	295.9	291.2	006.7

ECH:E2

VALEURS
EXPERIMENTALES

VALEURS
THEORIQUES
OPTIMUMS

T (heure)	T _A (°K)	T _G (°K)	R _g (W/m²)	T _A (°K)	T _G (°K)	R _g (W/m²)
- 4.0	288.6	293.8	-16.7	288.0	296.9	-24.3
- 2.0	288.3	291.9	-37.1	286.4	292.6	-30.2
0 0.0	284.5	288.1	-41.4	284.8	288.9	-32.3
0 2.0	282.5	285.7	-36.2	283.2	285.7	-27.0
0 4.0	282.5	284.9	-23.7	281.6	283.1	-08.1
0 6.0	288.1	287.6	024.5	287.2	287.6	036.4
0 8.0	296.3	294.7	183.1	297.5	294.6	127.6
1 0.0	303.1	300.1	355.2	303.2	300.1	283.5
1 2.0	309.3	303.8	425.4	309.1	303.8	425.4
1 4.0	309.5	309.7	372.0	308.6	309.7	347.9
1 6.0	308.1	302.8	173.5	303.7	301.8	173.5
1 8.0	300.0	300.8	058.8	295.3	297.7	061.6
2 0.0	292.7	298.7	-14.0	284.7	292.8	008.7

ECH:E3

VALEURS
EXPERIMENTALES

VALEURS
THEORIQUES
OPTIMUMS

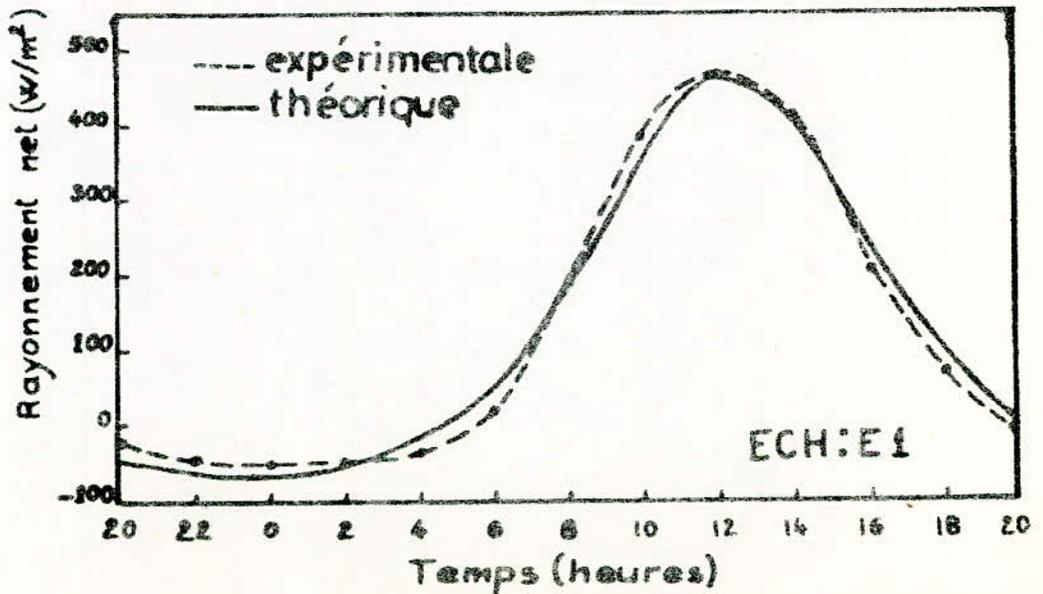
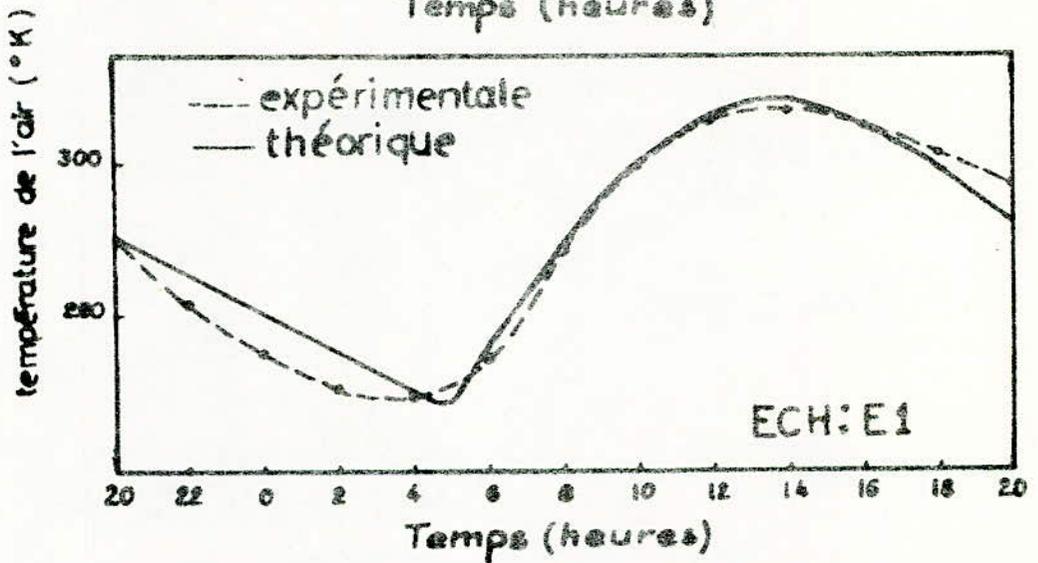
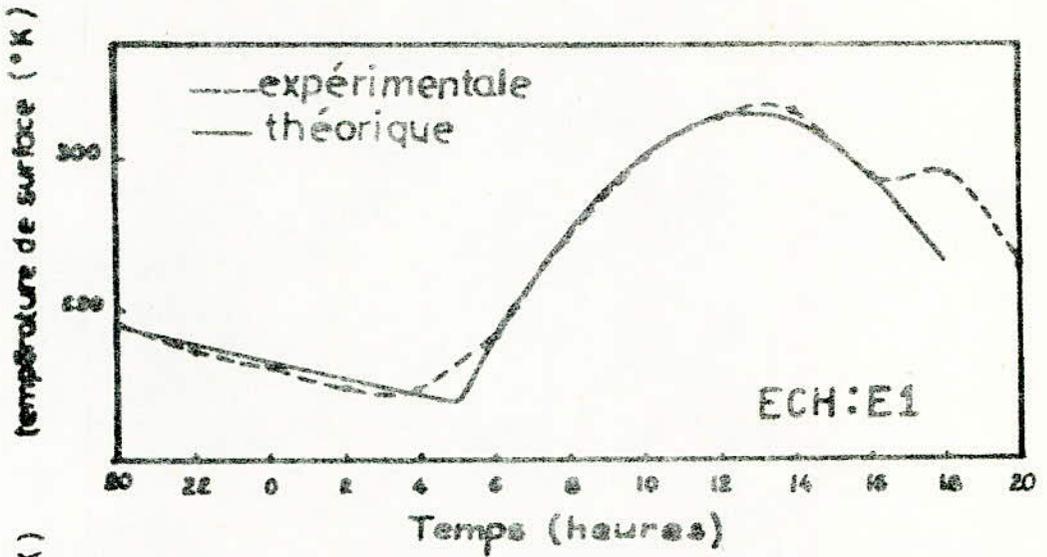
T (heure)	T _a (°K)	T _e (°K)	R _n (W/m²)	T _a (°K)	T _e (°K)	R _n (W/m²)
- 4.0	283.5	292.4	-23.0	283.7	292.6	-44.2
- 2.0	283.8	290.8	-33.0	283.5	290.8	-57.1
0 0.0	287.1	289.2	-49.0	287.3	289.2	-62.3
0 2.0	286.8	287.7	-42.0	286.2	287.8	-51.7
0 4.0	285.4	287.8	-30.8	285.0	286.7	-19.3
0 6.0	291.8	290.7	077.0	291.8	287.8	077.0
0 8.0	302.0	293.7	126.0	303.3	293.7	242.1
1 0.0	313.6	297.8	462.0	312.5	298.5	462.0
1 2.0	318.7	301.2	541.0	316.0	301.2	532.5
1 4.0	318.3	301.0	469.0	313.9	301.5	390.8
1 6.0	304.2	299.4	280.0	306.4	299.4	178.3
1 8.0	296.4	296.4	021.0	294.9	295.4	040.3
2 0.0	291.2	283.6	-49.0	284.7	290.4	-29.6

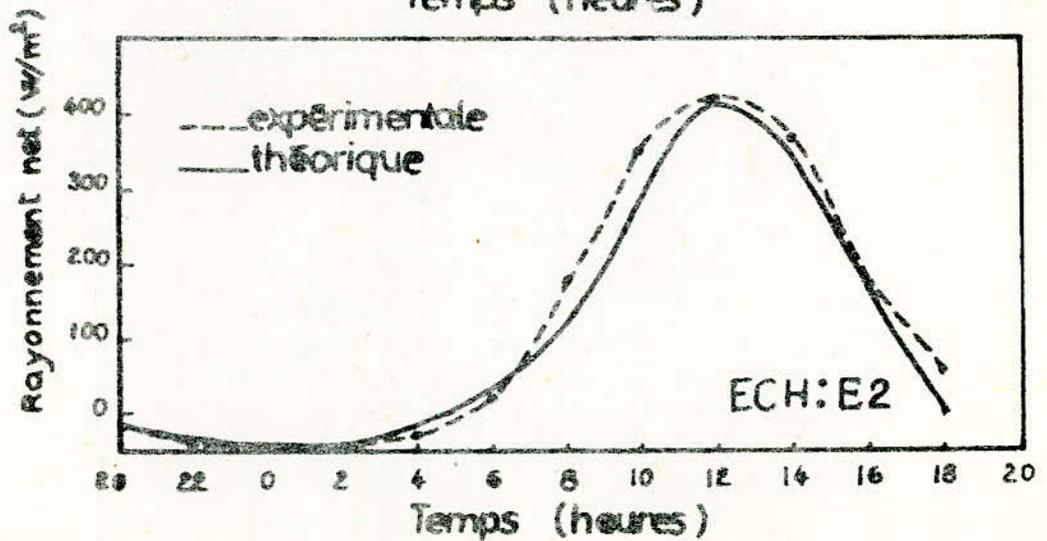
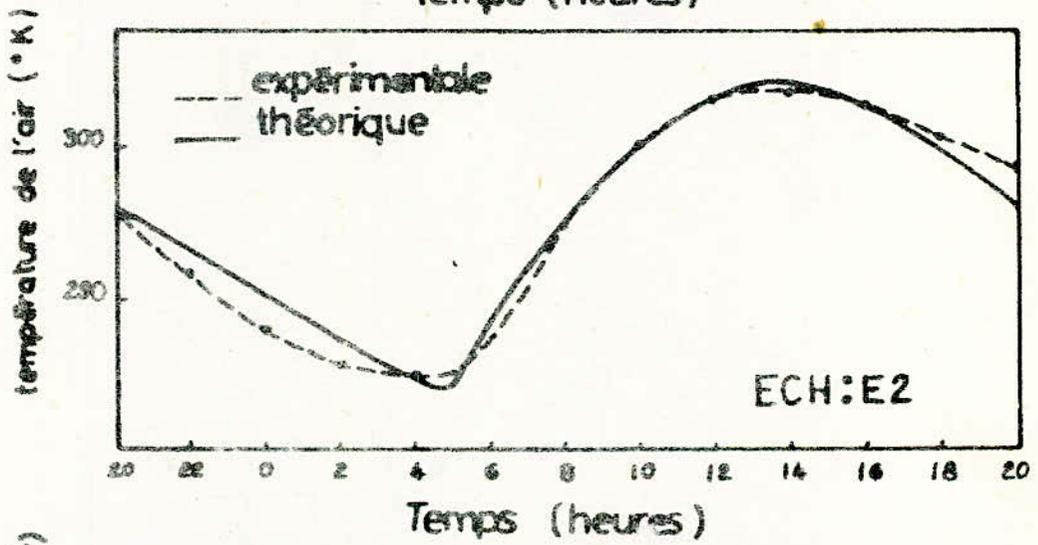
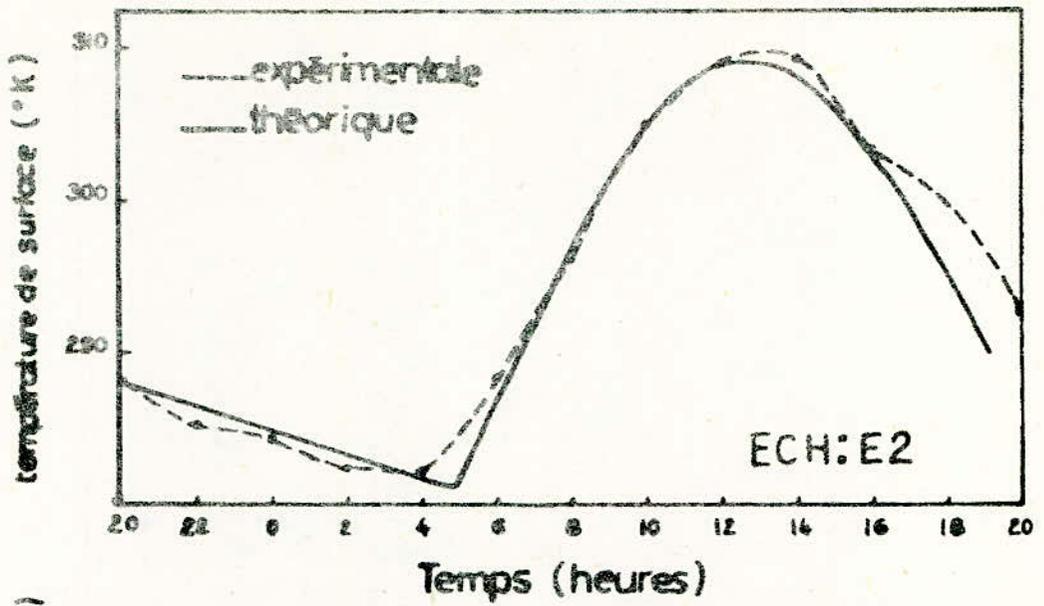
ECH:E4

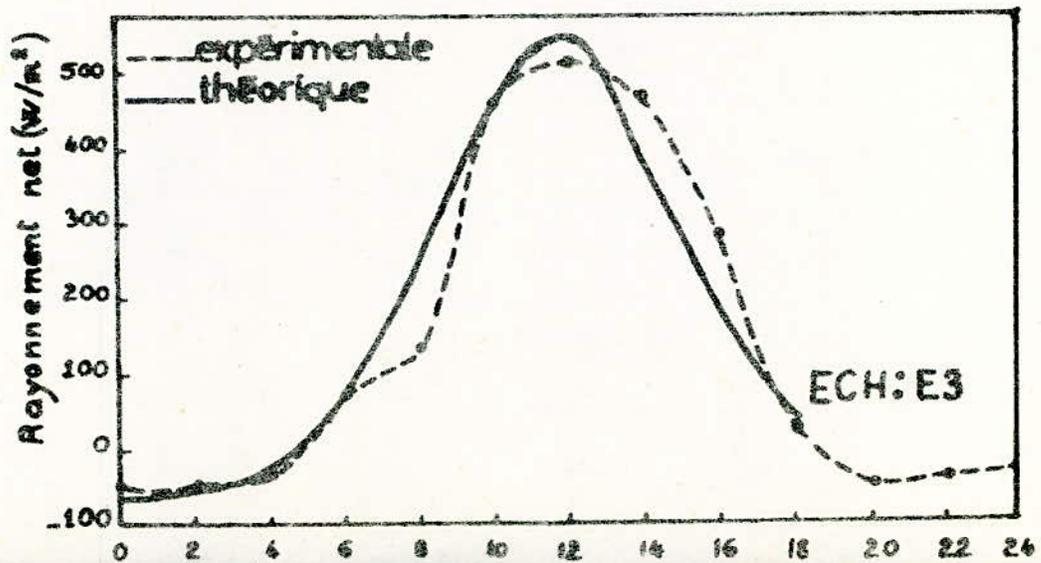
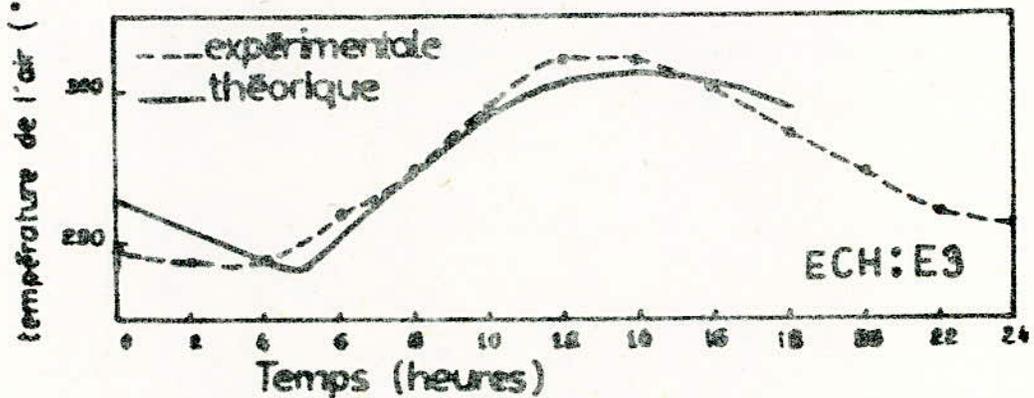
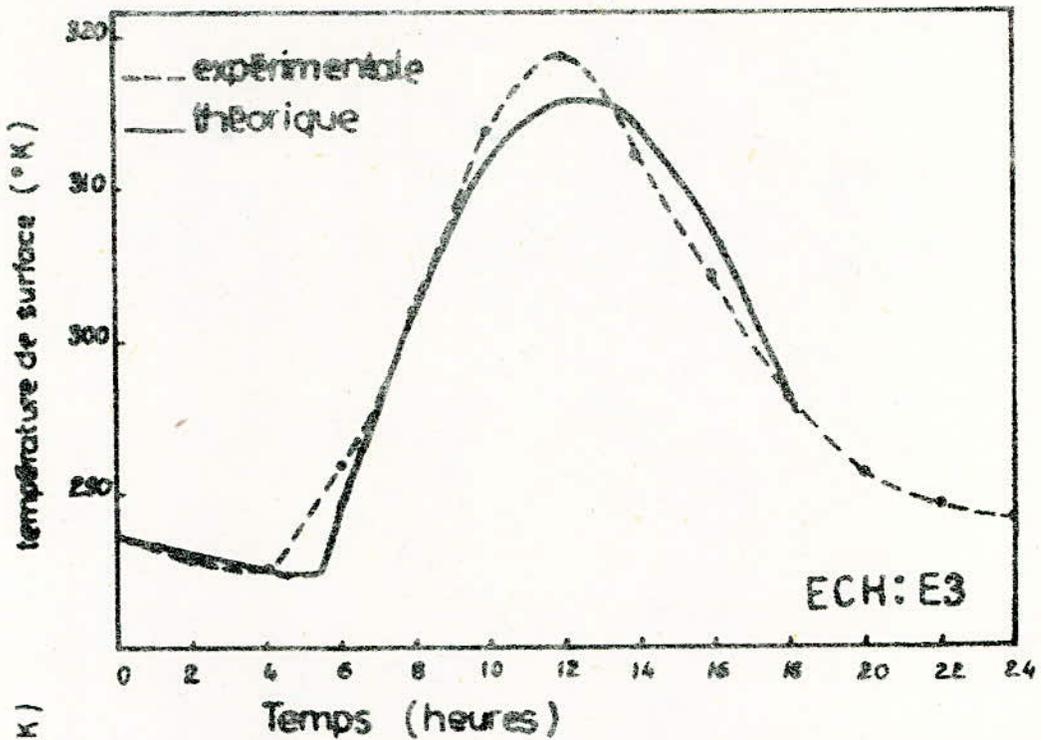
VALEURS
EXPERIMENTALES

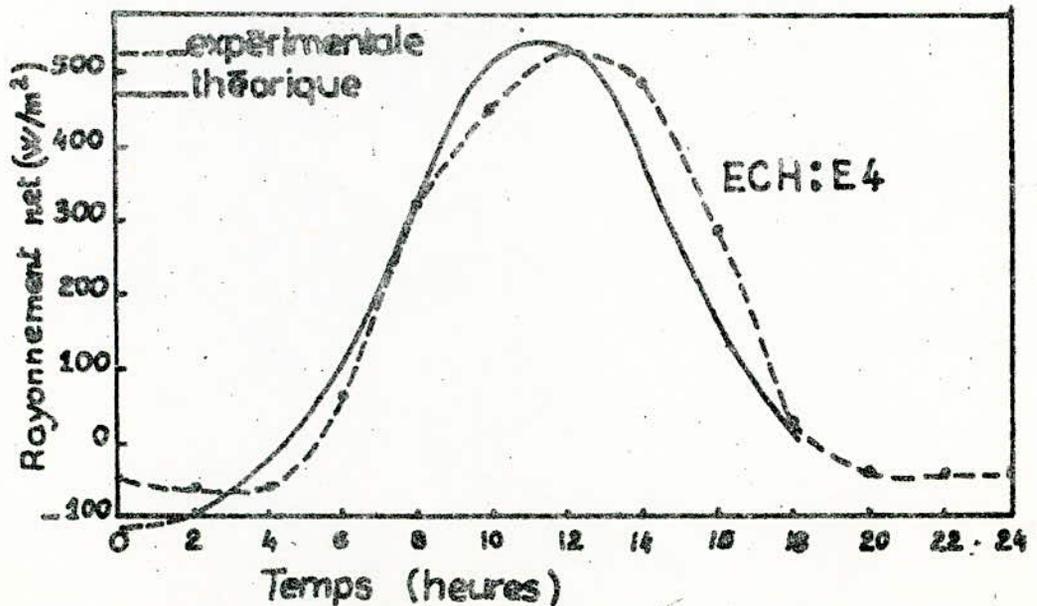
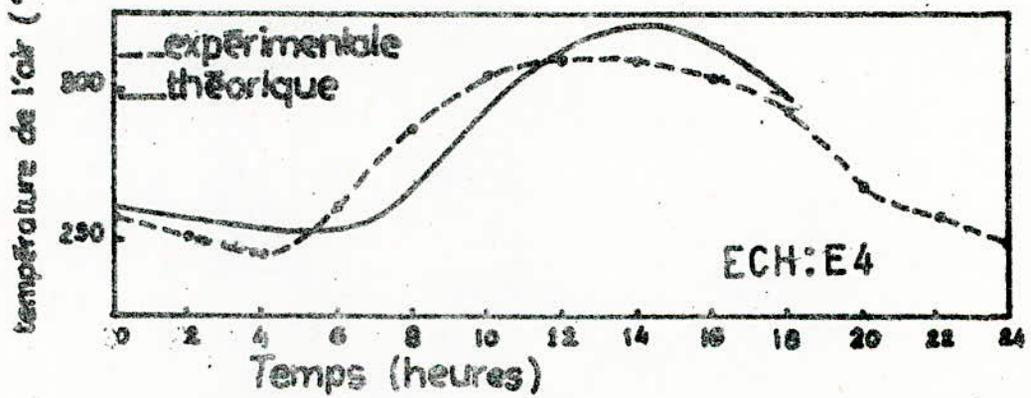
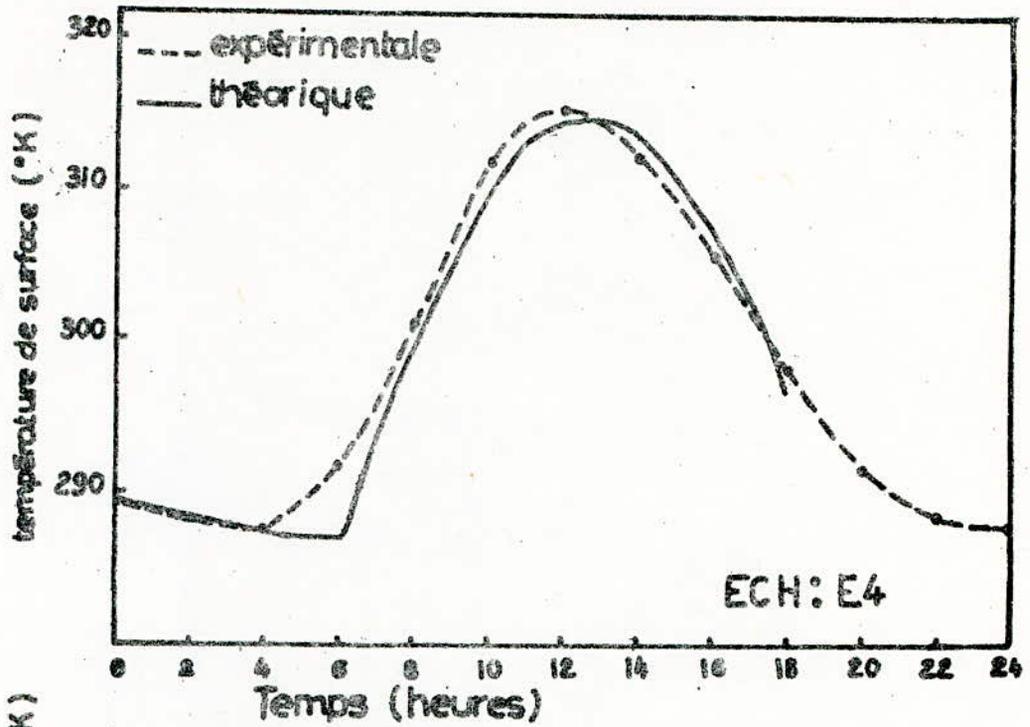
VALEURS
THEORIQUES
OPTIMUMS

T (heure)	T _a (°K)	T _e (°K)	R _n (W/m²)	T _a (°K)	T _e (°K)	R _n (W/m²)
- 4.0	281.0	283.3		290.8	293.9	-74.8
- 2.0	290.1	292.7		290.1	293.0	-101.2
0 0.0	289.2	291.6	-49.0	289.2	292.2	-102.2
0 2.0	288.3	290.5	-56.0	288.4	291.5	-92.5
0 4.0	287.6	289.4	-54.2	287.5	290.9	-22.5
0 6.0	291.7	292.5	063.0	289.6	290.7	-117.2
0 8.0	301.1	297.8	322.0	301.8	293.5	322.0
1 0.0	312.0	301.4	448.0	311.1	299.0	303.8
1 2.0	315.7	302.3	532.0	313.3	302.9	532.0
1 4.0	312.2	302.2	483.0	313.6	304.4	366.5
1 6.0	303.7	301.1	280.0	306.5	303.1	155.1
1 8.0	298.3	298.8	021.0	297.3	299.5	000.0
2 0.0	291.9	293.7	-47.9	282.4	294.3	-82.9

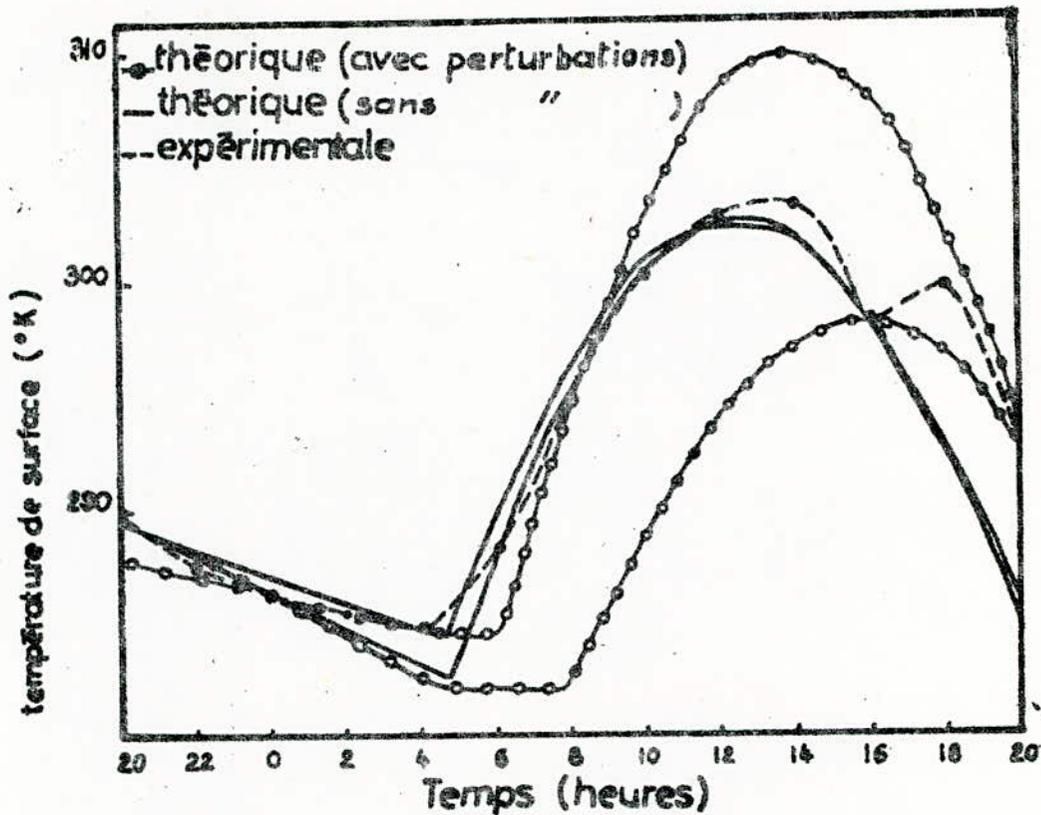




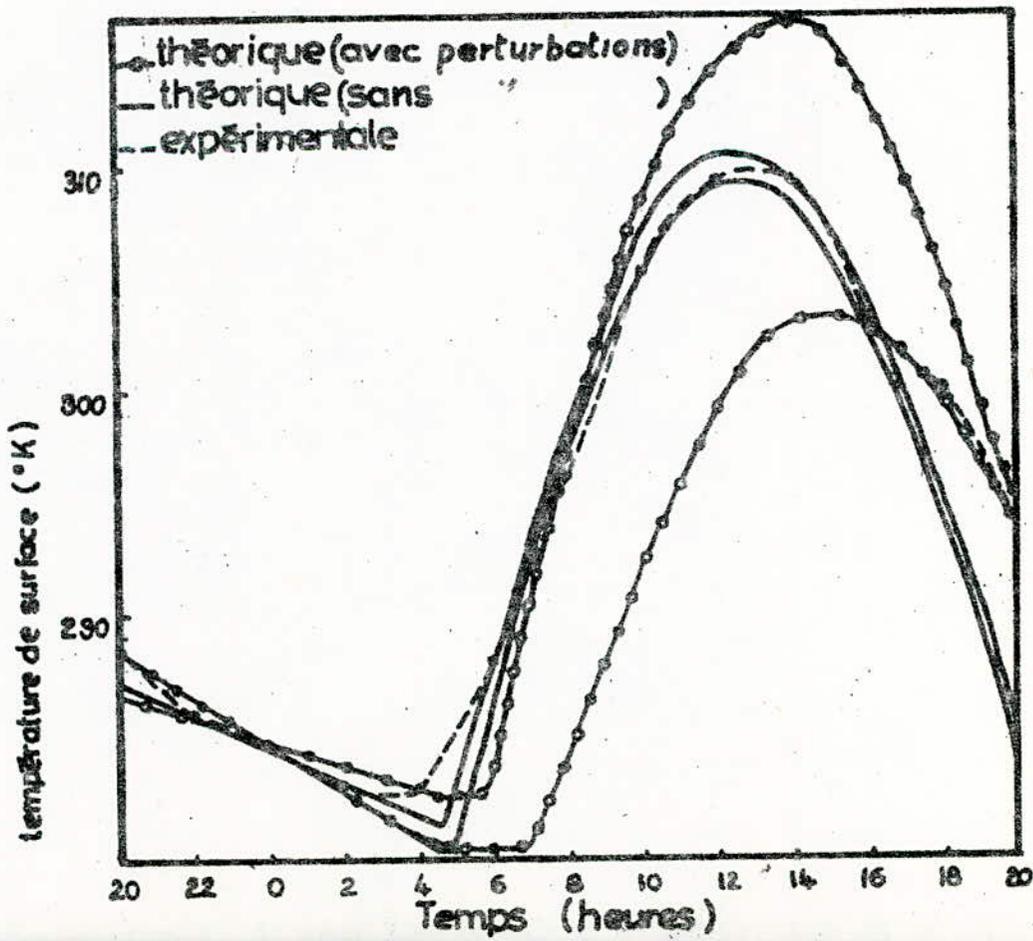




ECHANTILLON : E1



ECHANTILLON : E2



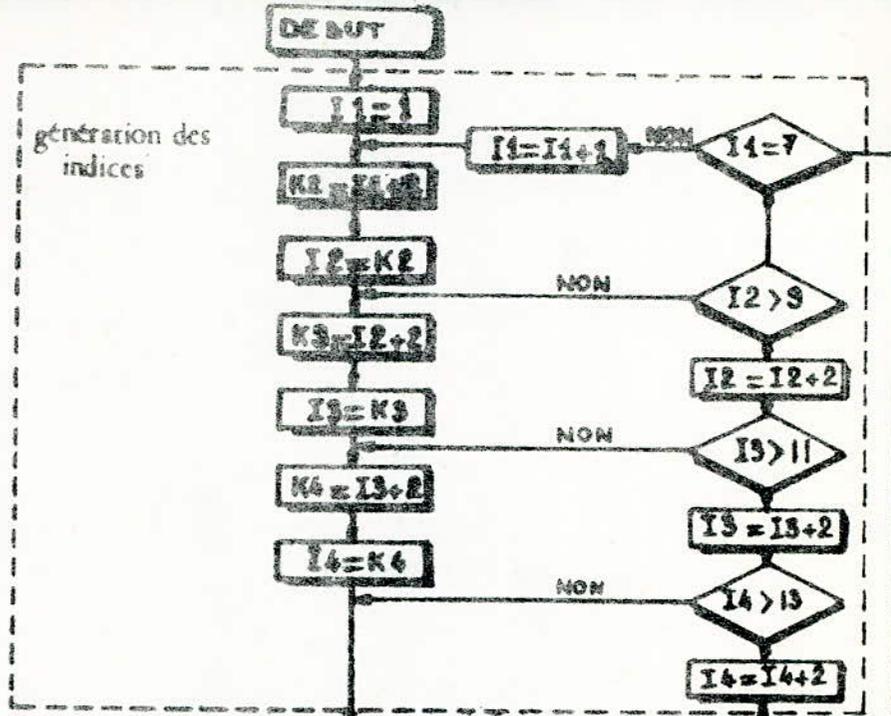
V.3. Discussion des résultats:

Soulignons qu'une bonne discussion de la validité du modèle proposé repose sur sa comparaison à d'autres modèles, mais dans la présente étude nous nous sommes limités à l'écart entre les courbes théoriques et réelles comparé à la variation maximale des différentes grandeurs qui est de l'ordre de 30°K pour T_s et T_a et $500\text{W}/\text{m}^2$ pour R_n .

L'examen de toutes les courbes montre que notre modèle est effectivement valable pour un milieu répondant aux hypothèses de départ. Lorsque des perturbations apparaissent le résultat n'est plus satisfaisant.

Notons aussi qu'un nombre minimum d'informations nécessaires à la détermination des paramètres ne fait pas apparaître la présence des perturbations affectant les mesures. Par conséquent, l'exactitude du résultat obtenu prend un caractère aléatoire. Un nombre important de données permettant de détecter les perturbations serait préférable.

organigramme de calcul des paramètres de:
 T_s, T_a, R_n



DEFINITION DES DONNEES
 A TRAITER

CALCUL DE BS

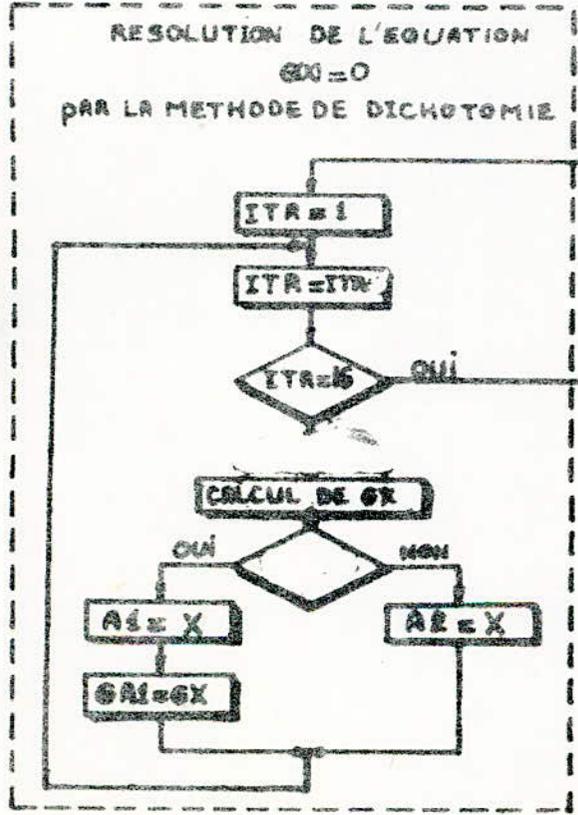


CALCUL DE CS



CALCUL DE
 T_0, A_S, B_T, T_{SM}
 $R_{KA}, A_Q, T_{AM}, \alpha$
 A_N, B_N

CALCUL DE T_s, T_a, R_n
 POUR DIFFERENTES VALEURS
 DE T
 CALCUL DE: S_{UM}, S_{UM}, S_{UM}
 S_{UM}, S_{UM}, S_{UM}



FIN

```

1 DIMENSIONNA(13),B(13)
2 DIMENSIONNET(13),FTS(13)
3 DIMENSIONT(13),TS(13)
4 READ(105,180)TL,TC
5 180 FORMAT(2F6.2)
6 READ(105,123)(ET(I),I=1,13)
7 READ(105,123)(ETS(I),I=1,13)
8 123 FORMAT(13F6.1)
9 ST=0
10 ST2=0
11 STTS=0
12 STS=0
13 R=(TL+1.-ET(1))/2.+1.
14 N1=R
15 DO10I=1,N1
16 ST=ST+FT(I)
17 STR=STR+FT(I)*+2.
18 STTS=STTS+ETS(I)*ET(I)
19 STS=STS+ETS(I)
20 10 CONTINUE
21 DEL=(ST2+FLOAT(N1))-ST*+2.
22 BS=((STTS+FLOAT(N1))-ST*STS)/DEL
23 CS=(STR+STS-ST+STTS)/DEL
24 PI=3.14159
25 TO=BS*TL+CS
26 N2=N1+1
27 SCS2=0
28 S2SN=0
29 SACS=0
30 SASN=0
31 DO24I=N2,11
32 B(I)=(ET(I)-TL)*PI/(TC-TL)
33 A(I)=TO-ETS(I)
34 SCS2=SCS2+COS(B(I))*+2.
35 S2SN=S2SN+SIN(2.*B(I))
36 SACS=SACS+A(I)*COS(B(I))
37 SASN=SASN+A(I)*SIN(B(I))
38 24 CONTINUE
39 DT=ATAN((2.+SCS2+SACS+S2SN+SASN-2.*SACS*(1.-FLOAT(N1)))/(S2SN+SACS
40 IS-2.*SCS2+SASN))*(TL-TC)/PI
41 X=DT*PI/(TL-TC)
42 AS=(SACS*SIN(X)+SASN*COS(X))/(SCS2+COS(2.*X)-6.*COS(X)*+2.-S2SN*SI
43 2N(X)*COS(X))
44 PRINT40
45 40 FORMAT(///(2X,42(1H*))/(2X,1H*,40X,1H*),/(2X,1H*,1X,'VALEURS OPTI
46 MALES DES PARAMETRES DE TS ',1H*),/(2X,1H*,40X,1H*),/(2X,42(1H*)))
47 WRITE(108,50)TO,AS,DT
48 50 FORMAT(//(2X,'TO=',F6.2,2X,'AS=',F5.2,2X,'DT=',F4.2))
49 WRITE(108,60)BS,CS
50 60 FORMAT(//(2X,'BS=',F6.3,2X,'CS=',F6.2))
51 PRINT70
52 70 FORMAT(//,4X,'T',5X,'TS')
53 SUMS=0
54 DO12I=1,N1
55 TS(I)=BS*ET(I)+CS
56 SUMS=SUMS+(ETS-TS)*+2.
57 WRITE(108,14)ET(I),TS(I)
58 12 CONTINUE
59 DO15I=N2,13
60 TS(I)=TO+AS*SIN(PI*(ET(I)-DT-TL)/(TC-TL))
61 SUMS=SUMS+(ETS-TS)*+2.
62 WRITE(108,14)ET(I),TS(I)
63 15 CONTINUE
64 14 FORMAT(/(1X,F6.2,2X,F6.1))
65 WRITE(108,60)SUMS
66 60 FORMAT(/(4X,'ECART QUADRATIQUE MOYEN'),/(4X,'SMMS=',F4.2))
67 STOP
68 END

```

programme de calcul des
parametres de T_s ; T_a ; R_n .

FORTRAN IX

```

1 DIMENSION ET(13), ETS(13), ETA(13), ERN(13)
2 DIMENSION T(13), TS(13), TA(13), RN(13)
3 READ(105,180) TL, TC
4
5 180 FORMAT(2F6.2)
6 READ(105,123) (ET(K), K=1, 13)
7 READ(105,123) (ETS(K), K=1, 13)
8 READ(105,123) (ETA(K), K=1, 13)
9 READ(105,123) (ERN(K), K=1, 13)
10 123 FORMAT(13F6.1)
11 D0850I1=1, 7
12 K2=I1+2
13 D0850I2=K2, 9, 2
14 K3=I2+2
15 D0850I3=K3, 11, 2
16 K4=I3+2
17 D0850I4=K4, 13, 2
18 T1=ET(I1)
19 T2=ET(I2)
20 T3=ET(I3)
21 T4=ET(I4)
22 TS1=ETS(I1)
23 TS2=ETS(I2)
24 TS3=ETS(I3)
25 TS4=ETS(I4)
26 TA2=ETA(I2)
27 TA3=ETA(I3)
28 TA4=ETA(I4)
29 RN3=ERN(I3)
30 RN4=ERN(I4)
31 BS=(TS1-TS2)/(T1-T2)
32 IF(BS.GT.0) GO TO 850
33 CS=(T1+T3-T2+TS1)/(T1-T2)
34 PI=3.14159
35 A=-PI/BS/(TC-TL)
36 B=-A*(BS*T3+CS)
37 C=-A*(BS*T4+CS)
38 D=A+TS4
39 E=A+TS3
40 A1=-B
41 A2=A*(BS*TL+CS)
42 GA1=(D-A1)*SIN(A1+B)-(E-A1)*SIN(A1+C)
43 GA2=(D-A2)*SIN(A2+B)-(E-A2)*SIN(A2+C)
44 WRITE(108,150) T1, T2, T3, T4
45 150 FORMAT(/, '(T1=', F6.2, 1X, 'T2=', F6.2, 1X, 'T3=', F6.2, 1X,
46 'T4=', F6.2))
47 IF(GA1#GA2) 1, 2, 3
48 3 WRITE(108,105)
49 105 FORMAT(/, 'PAS DE SOLUTION')
50 GO TO 700
51 2 X=(A1*GA2+A2*GA1)/(GA1+GA2)
52 GO TO 4
53 1 ITR=0
54 200 ITR=ITR+1
55 X=(A1+A2)/2
56 GX=(D-X)*SIN(X+B)-(E-X)*SIN(X+C)
57 IF(ITR.EQ.16) GO TO 4
IF(GX#GA1.GT.0) GO TO 5

```

```

58 A2=X
59 GET#200
60 A1=X
61 GA1=GX
62 GET#200
63 T0=X/A
64 AS=(TS3-T0)/SIN(X+B)
65 DT=(T0-CS)/BS-TL
66 TSM=BS*((TL+DT)**2.-(TC-TL)**2.)/40.+CS*(TL+DT-TC+24.)/24.
67 I+T0*(TC-TL-DT)/24.+AS*(TC-TL)*(COS((DT*PI)/(TC-TL))+1.)/24./PI
68 AR=TS2-TSM
69 AS=TS3-TSM
70 AA=TS4-TSM
71 AKA=-((TC-B.)**3.-(TC-32.)*3.)/72.
72 B2=(TS-B.)**2.+AKA
73 B3=(TS-B.)**2.+AKA
74 B4=(TS-B.)**2.+AKA
75 DELTA=AS*B4-B3*AA-A2*B4+B2*AA+A2*B3-B2*AS
76 TAM=(TA2*(A3+B4-B3*AA)-TA3*(A2+B4-B2*AA)+TA4*(A2+B3-B2*AS))/DELTA
77 AA=(TA3*B4-B3*TA4-TA2*B4+B2*TA4+TA2*AS-B2*TA3)/DELTA
78 ALPHA=(AS*TA4-TA3*AA-A2*TA4+TA2*AA+AR*TA3-TA2*AS)/DELTA
79 A3=SIN(PI*(TS-TL)/(TC-TL))
80 A4=SIN(PI*(TA-TL)/(TC-TL))
81 B3=-RM3*(TS-(TC+TL)/2. )**2.
82 B4=-RM4*(TA-(TC+TL)/2. )**2.
83 DELTA=AS*B4-B3*AA
84 AN=(RM3*B4-B3*RM4)/DELTA
85 BN=(AS*AN4-RM3*AA)/DELTA
86 WRITE(100,140)BS,CS,AS,T0,DT,AA,TAM,ALPHA,AN,BN,AKA
87 140 FORMAT(/,2X,10(1X,F8.5))
88 IF(T2.GE.TL)GOTO700
89 IF(T3.LT.(TL+DT))GOTO700
90 WRITE(100,101)
91 101 FORMAT(////,4X,'T',5X,'TS',6X,'TA',6X,'RM')
92 SUNS=0
93 SUMA=0
94 SUMR=0
95 D#500K=1,13
96 T(K)=2.+FLD#T(K)-6
97 IF(T(K).GE.(TL+DT))GOTO10
98 TS(K)=BS*T(K)+CS
99 GOTO11
100 10 TS(K)=T0+AS*SIN(PI*(T(K)-DT-TL)/(TC-TL))
101 11 TA(K)=AA*(TS(K)-TSM)+TAM+ALPHA*((T(K)-B.)**2.+AKA)
102 RN(K)=AN*SIN(PI*(T(K)-TL)/(TC-TL))/(1.-BN*(T(K)-(TC+TL)/2. )**2.)
103 SUNS=SUNS+(ETS(K)-TS(K))**2
104 SUMA=SUMA+(ETA(K)-TA(K))**2
105 SUMR=SUMR+(ERN(K)-RN(K))**2
106 WRITE(100,108)T(K),TS(K),TA(K),RN(K)
107 300 CONTINUE
108 108 FORMAT(/,(1X,F6.2,3(2X,F6.1)))
109 WRITE(100,102)TSM,TAM,DT
110 102 FORMAT(////,(5X,'TSM=',F8.2,2X,'TAM=',F8.2,2X,'DT=',F8.2))
111 SUNS=SQRT(SUNS/13.)
112 SUMA=SQRT(SUMA/13.)
113 SUMR=SQRT(SUMR/13.)
114 WRITE(100,250)SUNS,SUMA,SUMR
115 250 FORMAT(/,(5X,'SUNS=',F6.2,2X,'SUMA=',F6.2,2X,'SUMR=',F6.2))
116 100 PRINT150
117 130 FORMAT(/,2X,31(1X))
118 850 CONTINUE
119 PRINT450
120 450 PAR#AT(///,5X,'TABLEAU DES DONNEES')
121 WRITE(100,550)
122 550 FORMAT(////,4X,'T',5X,'TS',6X,'TA',6X,'RN')
123 D#650K=1,13
124 WRITE(100,350)ET(K),ETS(K),ETA(K),ERN(K)
125 CONTINUE
126 350 FORMAT(/,(1X,F6.2,3(2X,F6.1)))
127 STOP
128 END

```

* T₀ est donné par le 1^{er} modèle

SUITE D'INSTRUCTIONS
REPLAÇANT LES INSTRUCTIONS 34 A 65
DU PROGRAMME PRINCIPALE DANS
LE CAS DU 2^e MODELE

```
1  T0=TS+TL+CS  
2  A=(T3-TL)*PI/(TC-TL)  
3  B=(T4-TL)*PI/(TC-TL)  
4  C=TS3-T0  
5  D=TS4-T0  
6  DT=(CTL-TC)/PI*ATAN((C*B SIN(B)-D*SIN(A))/(D*  
7  IF(DT.LT.0)GOTO50  
8  AB=C/SIN((T3-DT-TL)*PI/(TC-TL))
```

VI, CONTRIBUTION A L'ETUDE D'UN SYSTÈME AUTONOME D'ANALYSE DES PARAMETRES

VI.1. Introduction

Le problème de recherche des paramètres du modèle fait partie de toute un ensemble de problèmes intéressant la télédétection. Dans le cadre de notre projet, notre étude s'est limitée à la modélisation de trois grandeurs fondamentales intervenant dans l'équation du bilan énergétique.

Cependant la détermination des paramètres de nos modèles, nous a conduit à élaborer le programme de calcul de ces paramètres. L'exécution de ces programmes par miniordinateur présente beaucoup d'inconvénients tels que

- la sortie du résultat qui nécessite parfois une longue attente
- le coût du passage
- lors des mesures sur terrain l'utilisateur ne peut pas accéder à cette grosse machine

On envisage donc la nécessité d'un organe de calcul autonome capable de résoudre les nombreux problèmes posés en télédétection.

La seconde étape de notre travail a consisté à traduire le programme de calcul des paramètres en langage assembleur et de le mémoriser sur PROM.

(mémoire programmable.)

Cette mémoire sera insérée dans un organe de calcul construit autour du microprocesseur MC6800 et utilisant une bibliothèque mathématique flottante pour effectuer les divers opérations appelées par le programme.

Pour cela nous donnant un rappel sommaire du MC6800, une brève présentation de la bibliothèque mathématique flottante de MOTOROLA.

VI.2. Rappel sur le MC. 6800

VI.2.1. Organisation Interne du 6800

L'Organisation interne du 6800 est donnée sur la figure (page 46)

Ce microprocesseur comprend essentiellement :

- une unité arithmétique et logique
- une unité de contrôle et de décodification des instructions
- un certain nombre de registres de travail

Le dialogue entre ces différents modules fonctionnels se fait par l'intermédiaire d'un bus interne de 8 bits.

L'Unité arithmétique et logique : (U.A.L)

Cette unité représente l'ensemble des circuits logiques capable d'exécuter des opérations arithmétiques et logiques. Ces circuits ne sont pas adressables par le programme. Ils effectuent le traitement demandé sur un opérande lu en mémoire centrale ou extrait de l'accumulateur et mettent le résultat du traitement à la disposition de l'accumulateur.

L'Unité de contrôle

L'Unité de contrôle se charge de la décodification des instructions et engendre les signaux de commandes nécessaires à la bonne exécution de l'instruction.

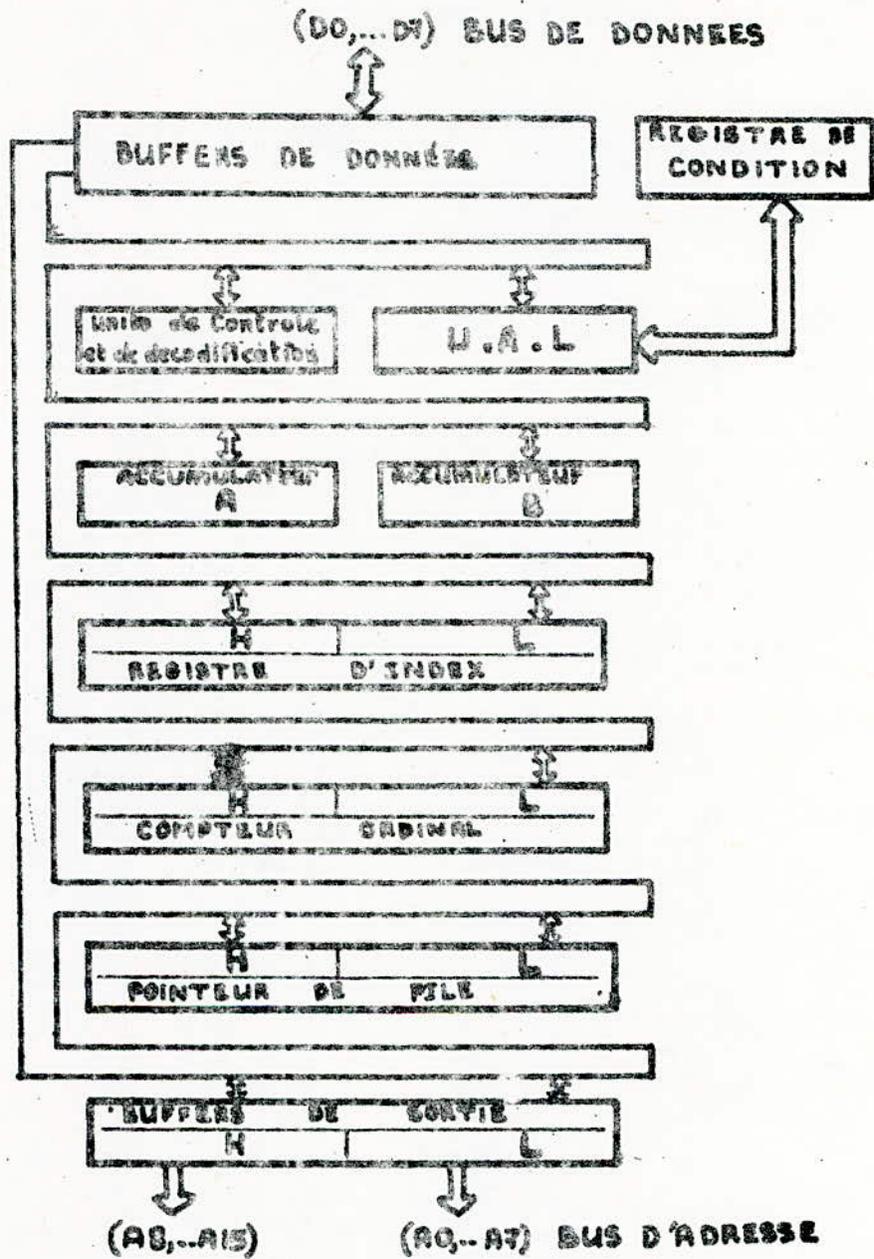
Les registres Internes

Ce sont des mémoires destinés à stocker temporairement certaines informations. Ces registres sont au nombre de six.

- Les accumulateurs A et B

Ce sont des registres à 8 bits. Un accumulateur servira pour toutes les opérations arithmétiques et la plupart des opérations logiques.

L'accumulateur contiendra un opérande au début de l'opération puis le résultat à la fin de l'opération.



ORGANISATION INTERNE DU MC 6800

Il pourra servir aussi de compteur ou de décompteur car il peut être incrémenté ou décrementé par des instructions.

Le Registre d'Index

C'est un registre à 16 bits destiné à contenir une adresse souvent utilisée dans le mode d'adressage indexé.

Le registre d'instruction

C'est un registre à 16 bits où vient se ranger chaque instruction reçue de la mémoire RAM ou ROM, pendant le temps nécessaire à son exécution.

Le compteur de programme (ou compteur ordinal)

C'est un registre à 16 bits. Il conserve en mémoire l'adresse de la prochaine instruction à exécuter. A chaque fois que le micro ^{PROCESSEUR} va chercher dans la mémoire de programme l'instruction dont l'adresse est indiquée par le compteur ordinal, il décodifie cette instruction et fait progresser le compteur ordinal jusqu'à l'adresse de la prochaine instruction et ainsi de suite.

Le pointeur de pile

C'est un registre à 16 bits utilisé lors d'un passage à un sous programme. Il permet de stocker l'adresse de l'emplacement mémoire du programme principal pour un retour ultérieur.

Le registre de condition (ou registre d'états)

C'est un registre à 8 bits.

La plupart des opérations exécutées par le microprocesseur affectent le contenu de son registre de condition. Celui-ci ^{possède} 6 bascules qui donnent des renseignements à propos du résultat de la dernière opération effectuée par l'unité centrale.

Ces bascules se positionnent à "1" lorsqu'une condition à chacune apparaît.

Ces bits indicateurs d'états sont les suivants :

- Le bit de report (carry) : C
Ce bit permet de recevoir :
 - le bit sortant lors d'un décalage à droite ou à gauche
 - la retenue lors d'une addition

- Le bit de dépassement (ou overflow) : V
 - le positionnement à "1" de ce bit indique un débordement de la capacité que peut traiter un mot.

- Le bit de zéro : Z
Cet indicateur témoigne que le résultat d'une opération est nul

- Le bit de signe : N
 - l'état "0" de ce bit indique que le résultat est positif et l'état "1" indique que le résultat est négatif.

- Le bit d'interruption : I
 - Ce bit est positionné à "1" en présence d'un signal d'interruption.

- Le bit de demi-retenu : H
 - La demi-retenu intervient dans les opérations codées en DCB

Les deux derniers bits sont constamment égaux à 1.

VI.2.2. Le Logiciel

Le MC 6800 possède un jeu de 72 instructions d'une longueur de 1 à 3 octets. Le premier octet est toujours l'instruction proprement dite. Le second et le troisième octet, lorsqu'ils existent sont des adresses ou des données.

Ces instructions permettent d'effectuer les opérations suivantes :

- arithmétiques (addition et soustraction, incrémenta-
tion)

- logique (RAZ, rotation, comparaison, ET, OU, ou (ex))
- instructions relatives aux interruptions (SWI, WAI, RTI)
- Branchement systématique et conditionnel
- chargement
- stockage
- manipulation dans la pile

Ces instructions sont réparties sur quatre tableaux suivants qu'elles agissent sur :

- les accumulateurs et les mémoires
- le registre d'index et le registre pointeur de pile
- le registre d'état CCR
- les instructions de branchement et de saut. (BRANCH AND JUMP)

Ces quatre tableaux figurent sur les pages suivantes.

La réalisation d'une instruction se déroule en trois phases :

- 1- la phase de recherche de l'instruction au cours de laquelle l'instruction à exécuter est lue dans la mémoire et analysée
- 2- la phase d'exécution de l'instruction au cours de laquelle l'opérande est lu dans la mémoire et l'opération est exécutée.
- 3- la phase de préparation de l'instruction suivante : au cours de laquelle l'adresse de l'instruction suivante du programme en cours d'exécution est préparé pour la prochaine lecture d'instruction.

Le temps d'exécution d'une instruction peut aller de 2 à 12 μ s suivant la complexité de cette dernière.

Jeu d'instructions développé du 6800.

ACCUMULATOR AND MEMORY		ADDRESSING MODES												LOGIC/ARITHMETIC OPERATION (All register labels refer to constants)	COND. CODE REG.										
		IMMED			DIRECT			INDEX			EXTND				INNER			S	Z	V	C				
		OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#		OP	~	#								
OPERATIONS	MEMORY	OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#	A + M → A	1	0	0	0	0
Add	ADDA	8B	2	2	8B	3	2	AB	5	2	8B	4	3							B + M → B	1	0	0	0	0
	ADDB	CB	2	2	DB	3	2	EB	5	2	FB	4	3							A ← B → A	1	0	0	0	0
Add Acmits	ABA													1B	2	1				A + M + C → A	1	0	0	0	0
Add with Carry	ADCA	8B	2	2	9B	3	2	A9	5	2	8B	4	3							B ← M + C → B	1	0	0	0	0
	ADCB	C9	2	2	D9	3	2	E9	5	2	F9	4	3							A ← M → A	0	0	0	1	0
And	ANDA	84	2	2	94	3	2	A4	5	2	B4	4	3							B ← M → B	0	0	0	1	0
	ANDB	C4	2	2	D4	3	2	E4	5	2	F4	4	3							A ← M → A	0	0	0	1	0
Bit Test	BITA	85	2	2	95	3	2	A5	5	2	B5	4	3							B ← M → B	0	0	0	1	0
	BITB	C5	2	2	D5	3	2	E5	5	2	F5	4	3							A ← M	0	0	0	1	0
Clear	CLR							6F	7	2	7F	6	3							B ← M	0	0	0	1	0
	CLRA													4F	2	1				00 ← M	0	0	0	1	0
	CLRB													5F	2	1				00 → A	0	0	0	1	0
Compare	CMPA	81	2	2	91	3	2	A1	5	2	B1	4	3							00 → B	0	0	0	1	0
	CMPB	C1	2	2	D1	3	2	E1	5	2	F1	4	3							A ← M	0	0	0	1	0
Compare Acmits	CBA													11	2	1				B ← M	0	0	0	1	0
Complement, 1's	COM							63	7	2	73	6	3							A ← B	0	0	0	1	0
	COMA													43	2	1				M ← M	0	0	0	1	0
	COMB													53	2	1				A → A	0	0	0	1	0
Complement, 2's (Negate)	NEG							60	7	2	70	6	3							B → B	0	0	0	1	0
	NEGA													40	2	1				00 ← M → M	0	0	0	1	0
	NEGB													50	2	1				00 → A → A	0	0	0	1	0
Decimal Adjust, A	DAA													19	2	1				00 → B → B	0	0	0	1	0
Decrement	DEC							6A	7	2	7A	6	3							Converts Binary Add. of BCD Characters into BCD Format	0	0	0	1	0
	DECA													4A	2	1				M ← 1 → M	0	0	0	1	0
	DECB													5A	2	1				A ← 1 → A	0	0	0	1	0
Exclusive OR	EORA	88	2	2	98	3	2	A8	5	2	B8	4	3							B ← 1 → B	0	0	0	1	0
	EDRB	C8	2	2	D8	3	2	E8	5	2	F8	4	3							A ← M → A	0	0	0	1	0
Increment	INC							6C	7	2	7C	6	3							B ← M → B	0	0	0	1	0
	INCA													4C	2	1				M ← 1 → M	0	0	0	1	0
	INCB													5C	2	1				A ← 1 → A	0	0	0	1	0
Load Acmitr	LDA	86	2	2	96	3	2	A6	5	2	B6	4	3							B ← 1 → B	0	0	0	1	0
	LDAB	C6	2	2	D6	3	2	E6	5	2	F6	4	3							M → A	0	0	0	1	0
Or, Inclusive	ORAA	8A	2	2	9A	3	2	AA	5	2	BA	4	3							M → B	0	0	0	1	0
	ORAB	CA	2	2	DA	3	2	EA	5	2	FA	4	3							A ← M → A	0	0	0	1	0
Push Data	PSHA													36	4	1				B ← M → B	0	0	0	1	0
	PSHB													37	4	1				A ← Msp, SP - 1 → SP	0	0	0	1	0
Pop Data	PULA													32	4	1				B → Msp, SP - 1 → SP	0	0	0	1	0
	PULB													33	4	1				SP + 1 → SP, Msp → A	0	0	0	1	0
Rotate Left	ROL							69	7	2	79	6	3							SP + 1 → SP, Msp → B	0	0	0	1	0
	ROLA													49	2	1				M	0	0	0	1	0
	ROLB													59	2	1				A ← M	0	0	0	1	0
Rotate Right	ROR							66	7	2	76	6	3							B ← M	0	0	0	1	0
	RORA													46	2	1				M	0	0	0	1	0
	RORB													56	2	1				A ← M	0	0	0	1	0
Shift Left, Arithmetic	ASL							68	7	2	78	6	3							B	0	0	0	1	0
	ASLA													48	2	1				M	0	0	0	1	0
	ASLB													58	2	1				A ← M	0	0	0	1	0
Shift Right, Arithmetic	ASR							67	7	2	77	6	3							B	0	0	0	1	0
	ASRA													47	2	1				M	0	0	0	1	0
	ASRB													57	2	1				A ← M	0	0	0	1	0
Shift Right, Logic	LSR							64	7	2	74	6	3							B	0	0	0	1	0
	LSRA													44	2	1				M	0	0	0	1	0
	LSRB													54	2	1				A ← M	0	0	0	1	0
Store Acmitr	STAA				97	4	2	A7	6	2	B7	5	3							B → M	0	0	0	1	0
	STAB				D7	4	2	E7	6	2	F7	5	3							A ← M → A	0	0	0	1	0
Subtract	SUBA	80	2	2	90	3	2	A0	5	2	B0	4	3							B ← M → B	0	0	0	1	0
	SUBB	C0	2	2	D0	3	2	E0	5	2	F0	4	3							A ← B → A	0	0	0	1	0
Subtract Acmits	SBA													10	2	1				A ← M - C → A	0	0	0	1	0
Subtr. with Carry	SBCA	82	2	2	92	3	2	A2	5	2	B2	4	3							B ← M - C → B	0	0	0	1	0
	SBCB	C2	2	2	D2	3	2	E2	5	2	F2	4	3							A → B	0	0	0	1	0
Transfer Acmits	TAB													16	2	1				B → A	0	0	0	1	0
	TBA													17	2	1				M ← 00	0	0	0	1	0
Test, Zero or Minus	TST							6D	7	2	7D	6	3							A ← 00	0	0	0	1	0
	TSTA													4D	2	1				B ← 00	0	0	0	1	0
	TSTB													5D	2	1					0	0	0	1	0

INDEX REGISTER AND STACK

OPERATIONS		INHERD			DIRECT			INDEX			EXTND			INNER			BOOLEAN/ARITHMETIC OPERATION					
OP	MNEMONIC	~	#	OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#	H	I	N	Z	V	C	
BC	CPX	3	3	9C	4	2	AC	6	2	BC	5	3							7	1	0	
	DEX												09	4	1							
	DES																					
	INX												06	4	1							
	INS												31	4	1							
CE	LDX	3	3	DE	4	2	EE	6	2	FE	5	3										
BE	LOS	3	3	9E	4	2	AE	6	2	DE	5	3										
	STX			DF	5	2	EF	7	2	FF	6	3										
	STS			DF	5	2	AF	7	2	BF	6	3										
	TXS												35	4	1							
	TSX												30	4	1							

JUMP AND BRANCH

OPERATIONS		RELATIVE			INDEX			EXTND			INNER			BRANCH TEST							
OP	MNEMONIC	~	#	OP	~	#	OP	~	#	OP	~	#	H	I	N	Z	V	C			
20	BRA	4	2																		
24	BCC	4	2																		
25	BCS	4	2																		
27	BEQ	4	2																		
2C	BGE	4	2																		
2E	BGT	4	2																		
22	BHI	4	2																		
2F	BLE	4	2																		
23	BLS	4	2																		
2D	BLT	4	2																		
28	BMI	4	2																		
26	BNE	4	2																		
28	BVC	4	2																		
29	BVS	4	2																		
2A	BPL	4	2																		
8D	BSR	8	2																		
	JMP			6E	4	2	7E	3	3												
	JSR			AD	6	2	BD	9	3												
	NOP												01	2	1						
	RTI												38	10	1						
	RTS												39	5	1						
	SWI												3F	12	1						
	WAI												3E	9	1						

CONDITIONS CODE REGISTER

OPERATIONS		INHER			BOOLEAN OPERATION					
OP	MNEMONIC	~	#	OP	H	I	N	Z	V	C
0C	CLC	2	1	0-C						R
0E	CLI	2	1	0-I		R				
0A	CLV	2	1	0-V						R
0D	SEC	2	1	1-C						S
0F	SEI	2	1	1-I		S				
0B	SEV	2	1	1-V						S
06	TAP	2	1	A-CCR						12
07	TPA	2	1	CCR-A						

CONDITION CODE REGISTER NOTES:

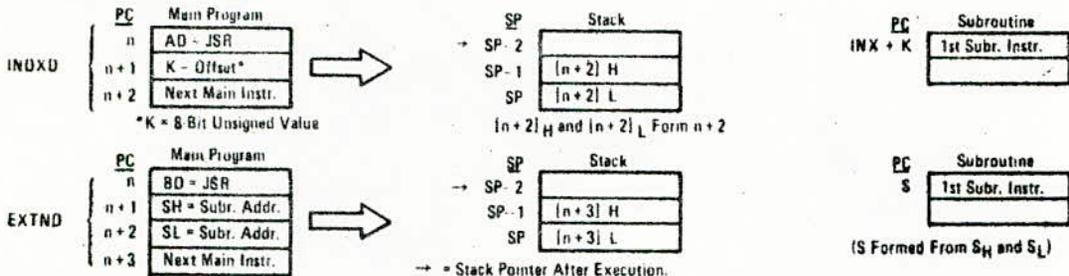
- (Bit set if test is true and cleared otherwise)
- ① (Bit V) Test: Result = 10000000?
- ② (Bit C) Test: Result = 00000007
- ③ (Bit C) Test: Decimal value of most significant BCD Character greater than nine? (Not cleared if previously set.)
- ④ (Bit V) Test: Operand = 10000000 prior to execution?
- ⑤ (Bit V) Test: Operand = 01111111 prior to execution?
- ⑥ (Bit V) Test: Set equal to result of N ← C after shift has occurred
- ⑦ (Bit N) Test: Sign bit of most significant (MS) byte of result = 1?
- ⑧ (Bit V) Test: Z's complement overflow from subtraction of LS bytes?
- ⑨ (Bit N) Test: Result less than zero? (Bit 15 = 1)
- ⑩ (All) Load Condition Code Register from Stack (See Special Operations)
- ⑪ (Bit I) Set when interrupt occurs. If previously set, a Non Maskable Interrupt is required to exit the wait state.
- ⑫ (ALL) Set according to the contents of Accumulator A.

LEGEND

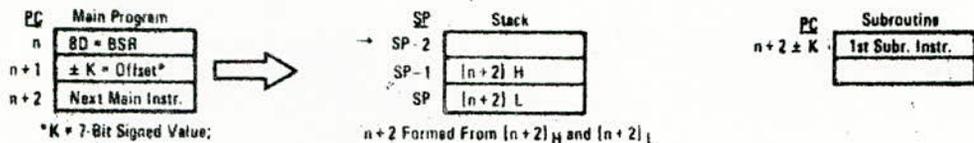
- OP Operation Code (Hexadecimal);
- ~ Number of MPU Cycles;
- # Number of Program Bytes;
- + Arithmetic Plus;
- Arithmetic Minus;
- Boolean AND;
- Mgp Contents of memory location pointed to by Stack Pointer;
- ⊕ Boolean Inclusive OR;
- ⊙ Boolean Exclusive OR;
- ⌘ Complement of M;
- Transfer Into;
- 0 Bit = Zero;
- 00 Byte = Zero;
- H Half carry from bit 3;
- I Interrupt mask;
- N Negative (sign bit)
- Z Zero (byte)
- V Overflow Z's complement
- C Carry from bit 7
- R Reset Always
- S Set Always
- 1 Test and set if true, cleared otherwise
- 0 Not Affected
- CCR Condition Code Register
- LS Least Significant
- MS Most Significant

SPECIAL OPERATIONS

JSR, JUMP TO SUBROUTINE:



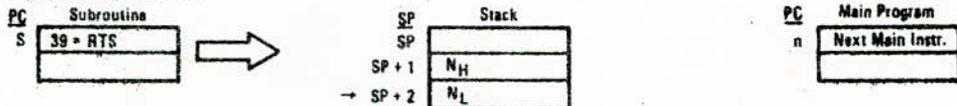
BSR, BRANCH TO SUBROUTINE:



JMP, JUMP:



RTS, RETURN FROM SUBROUTINE:



RTI, RETURN FROM INTERRUPT:

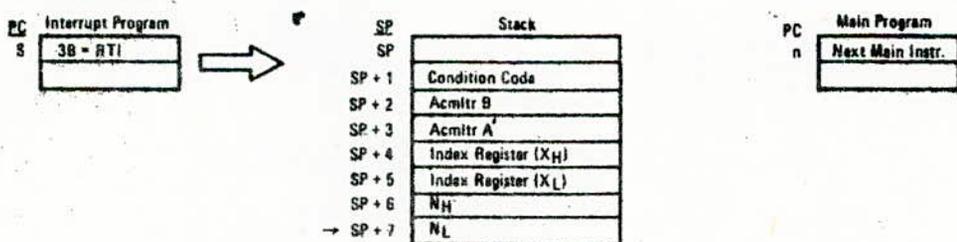


TABLE 6 - CONDITION CODE REGISTER MANIPULATION INSTRUCTIONS

OPERATIONS	MNEMONIC	IMPLIED		BOOLEAN OPERATION	COND. CODE REG.					
		OP	#		5	4	3	2	1	0
					H	I	N	Z	V	C
Clear Carry	CLC	0C	2 1	0 → C	•	•	•	•	•	R
Clear Interrupt Mask	CLI	0E	2 1	0 → I	•	R	•	•	•	•
Clear Overflow	CLV	0A	2 1	0 → V	•	•	•	•	R	•
Set Carry	SEC	0D	2 1	1 → C	•	•	•	•	•	S
Set Interrupt Mask	SEI	0F	2 1	1 → I	•	S	•	•	•	•
Set Overflow	SEV	0B	2 1	1 → V	•	•	•	•	S	•
Acmttr A → CCR	TAP	06	2 1	A → CCR	⑬					
CCR → Acmttr A	TPA	07	2 1	CCR → A	•	•	•	•	•	•

CONDITION CODE REGISTER NOTES: (Bit set if test is true and cleared otherwise)

- 1 (Bit V) Test: Result = 10000000?
- 2 (Bit C) Test: Result = 00000000?
- 3 (Bit C) Test: Decimal value of most significant BCD Character greater than nine? (Not cleared if previously set.)
- 4 (Bit V) Test: Operand = 10000000 prior to execution?
- 5 (Bit V) Test: Operand = 01111111 prior to execution?
- 6 (Bit V) Test: Set equal to result of N⊕C after shift has occurred.
- 7 (Bit N) Test: Sign bit of most significant (MS) byte = 1?
- 8 (Bit V) Test: 2's complement overflow from subtraction of MS bytes?
- 9 (Bit N) Test: Result less than zero? (Bit 15 = 1)
- 10 (All) Load Condition Code Register from Stack. (See Special Operations)
- 11 (Bit I) Set when interrupt occurs. If previously set, a Non-Maskable Interrupt is required to exit the wait state.
- 12 (All) Set according to the contents of Accumulator A.

VI.2.2.1. Modes d'adressage du MC 6800

On appelle mode d'adressage le moyen dont dispose le programmeur pour adresser, à partir du contenu de l'instruction, la position mémoire où :

- se trouve l'opérande à traiter, dans le cas d'une lecture mémoire
- sera stocker le résultat d'une opération, dans le cas d'une écriture mémoire.

Un choix judicieux du mode d'adressage permet de réduire la largeur de programme, la capacité et le temps d'exécution.

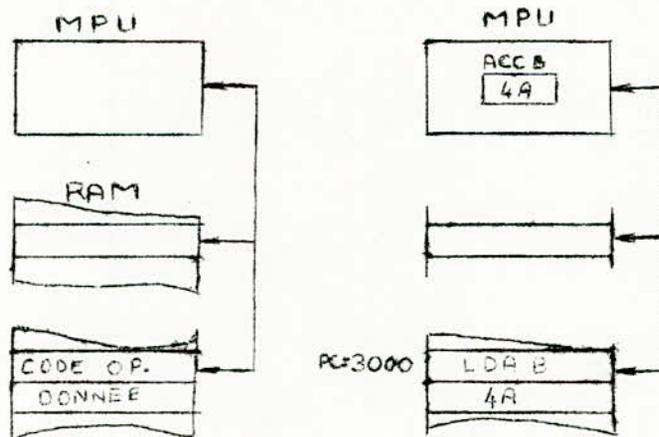
Les différents modes d'adressage associé au 6800 sont les suivants :

Adressage immédiat :

Dans ce mode d'adressage le mot suivant l'instruction contient une donnée directement utilisable par le microprocesseur.

Ce mot est de un octet lorsque l'on s'adresse aux accumulateurs, de deux octets pour les instructions LOS, LDX, CPX s'adressant aux registres.

Le principe de l'adressage immédiat est donné par la figure suivante :

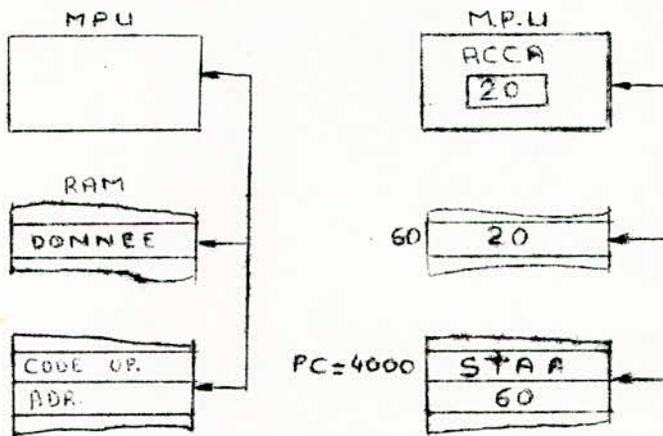


ex : LDAB # \$4A : Cette instruction permet le chargement de l'accumulateur B par le contenu 4A du second octet de l'instruction.

Adressage direct

L'adresse de l'opérande est contenu dans le second octet de l'instruction. Cet adressage permet d'adresser que les positions de mémoires comprises entre 0 et 255.

Ex. STA A \$60 : Stocker le contenu de l'accumulateur A dans la position de mémoire d'adresse 60 (en hexadécimal)



Le microprocesseur après avoir lu l'instruction STA A à la position de mémoire 4000, trouve à la position de mémoire 4001 l'adresse 60 de la cellule mémoire où sera logé le contenu de l'accumulateur.

Adressage étendu

L'adressage étendu requiert 3 octets : un pour l'instruction et deux pour l'adresse. Pour le 6800 l'adressage étendu impose d'écrire d'abord les poids forts d'adresse puis les poids faibles.

Ce mode d'adressage permet de balayer toutes les mémoires de 0000 à FFFF.

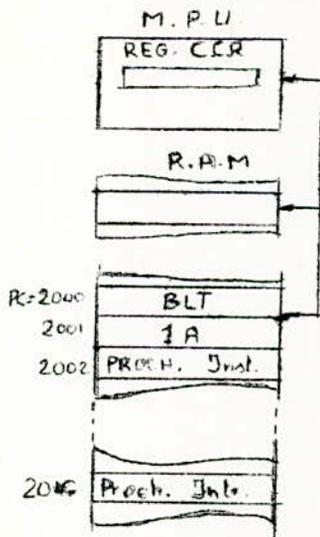
Le principe de l'adressage étendu est illustré par la figure suivante :

Ex : LDA A 5,X : on charge l'accumulateur A par le contenu de la position mémoire dont l'adresse 405 est obtenu en faisant la somme du contenu de la position mémoire 3501 (5) et du contenu du registre d'indexe.

Adressage relatif

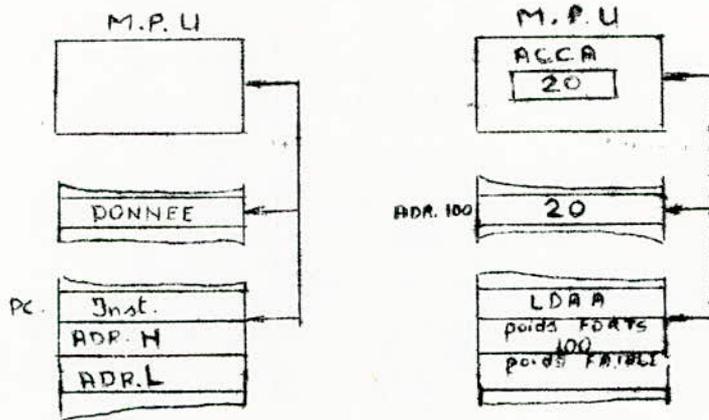
Cet adressage relatif est utilisé uniquement pour les instructions de branchements. Le contenu du second octet de l'instruction (appelé aussi déplacement ou adresse relative) est ajouté au contenu du compteur ordinal afin de déterminer l'adresse de branchement. Le résultat est envoyé dans le compteur de programme.

Le principe de cet adressage est donné par la figure suivante.



Le microprocesseur lit à l'adresse mémoire 2000 une instruction BLT de branchement conditionnel à l'adresse 201C si le résultat de l'opération précédente est inférieur à zéro c.à.d. qu'il continuera séquentiellement son programme à l'adresse 2002 si ce résultat est supérieur ou égal à zéro et effectuera un saut à l'adresse 201c si le résultat est négatif.

Remarque : L'adressage relatif se fait sur 8 bits. Ceci permet des branchements dans une limite de -125 à +129 par rapport à l'adresse de l'instruction.

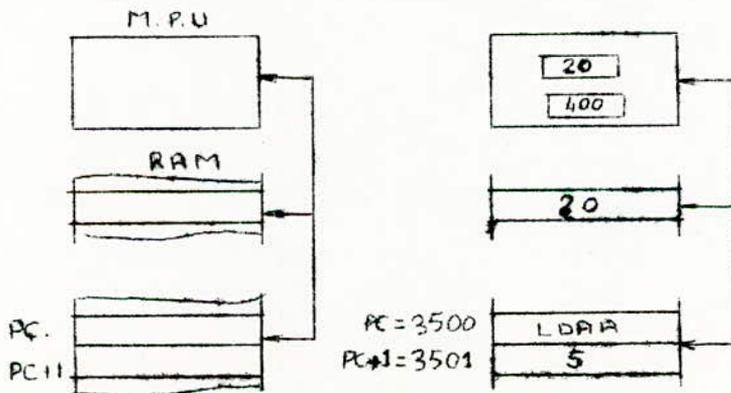


Le microprocesseur après avoir lu le code opération de l'instruction (LDA A) à la position de mémoire 4000 (le contenu du compteur de programme est 4000), recherche dans la position de mémoires 4001 et 4002, l'adresse 100 du contenu à charger dans l'accumulateur A et effectue ce chargement.

Adressage indexé

La technique de l'adressage indexé consiste à ajouter l'adresse du bus à une valeur particulière contenue dans le registre d'indexe, puis à utiliser l'adresse résultante appelée aussi adresse effective pour accéder à la position mémoire contenant la donnée nécessaire au traitement de l'instruction.

Le schéma ci-dessous illustre le principe de l'adressage indexé.



Adressage implicite

Dans ce mode d'adressage, l'opérande est indiqué par le code opération de l'instruction. Cette instruction a une longueur de un octet et permet de modifier le contenu d'un registre de 8 bits ou 16 bits.

Ex. INX : incrémenter le contenu du registre d'index

Adressage indirect

L'adressage indirect consiste à adresser une position de la mémoire dans laquelle est stockée l'adresse effective de la donnée.

Cet adressage présente de la souplesse au niveau de la programmation. Cependant il ralentit l'exécution des instructions puisqu'il nécessite deux accès à la mémoire.

.3. Elaboration du programme de détermination des paramètres

.3.1. Présentation de la bibliothèque mathématique

Comme nous l'avons signalé en introduction, l'organe de calcul fait appel à la bibliothèque mathématique de MOTOROLA conçu de manière à exécuter sur micro-ordinateur à base du MC 6800, les différentes opérations en virgule flottante.

Un nombre quelconque est représenté en virgule flottante de 24 bits, soit 16 bits pour la mantisse et 8 bits pour l'exposant.

Le 15^e bit de la mantisse représente le bit de signe, la virgule décimale vient juste après ce bit.

Le 7^e bit de l'exposant représente le bit de signe.

.3.2. Caractéristique de la bibliothèque mathématique

a) La mantisse est de 16 bits soit 4 caractères hexadécimaux et l'exposant est de 8 bits soit 2 caractères hexadécimaux.

b) Le format de cette virgule flottante est compatible avec l'architecture du MC 6800.

c) L'exécution est rapide

d) Les nombres négatifs sont complémentés à 2

16 bits de la mantisse complémentés à 2

8 bits de l'exposant complémentés à 2

e) Disposition d'un nombre en mémoire

0 : le plus significatif byte de la mantisse

1 : le moins significatif byte de la mantisse

2 : L'exposant

f) Les nombres normalisés ont les deux premiers bits de la mantisse différents.

g) Dans les nombres normalisés, le plus significatif byte de la mantisse détermine si le nombre est positif, négatif, ou nul.

h) Pour multiplier un nombre par 2, on additionne 1 à l'exposant pour diviser un nombre par 2, on soustrait 1 à l'exposant.

Exemple de représentation d'un nombre en virgule flottante de 24 bits

	MANTISSE	EXPOSANT	
EX1 1 (DECIMAL)	0,100 0000 0000 0000	0000 0001	40 00 01 (en hexa)
EX2 2 (DECIMAL)	0,100 0000 0000 0000	0000 0010	40 00 02
EX3 π	0,110 0100 1000 0111	0000 0010	648702
GX4 5040 (DECIMAL)	0,110 1110 1100 0000	0000 1101	4EC00D (en hexa)

.3.3. Algorithme des opérations utilisées pour la détermination des paramètres

FPPADD : addition en virgule flottante.

L'argument 1 est additionné à l'argument 2 et le résultat occupe la place de l'argument 1.

Algorithme : a) si un argument est nul, l'autre est redonné comme résultat
b) si les exposants sont différents, la mantisse de l'argument ayant le plus petit exposant est déplacé vers la droite jusqu'à ce que la différence des exposants soit nulle.
S'il y a plus de 15 déplacements à faire, le plus grand argument est donné comme résultat. Le dernier bit décalé servira à l'arrondissement du même nombre.

c) s'il y a moins de 15 décalages à faire à l'un des arguments, le résultat sera la somme bit à bit des mantisses et l'exposant du résultat sera égal au plus grand exposant

d) le résultat final est décalé jusqu'à ce que les deux bits de poids fort de la mantisse soient différents (opérations de normalisation).

FPPSUB : Soustraction en virgule flottante

L'argument 2 est soustrait de l'argument 1 et le résultat occupe la place de l'argument 1.

Algorithme : l'argument 2 est complémenté à 2 et le même algorithme que pour l'addition est utilisé.

FPPMUL : Multiplication en virgule flottante

L'argument 1 est multiplié par l'argument 2 et le résultat normalisé occupe la place de l'argument 1

Algorithme :

- a) les arguments sont convertis en nombres positifs
- b) l'exposant du résultat est la somme des exposants
- c) les mantisses sont multipliées bit par bit, les 16 bits les plus significatifs forment la mantisse du résultat.
- d) les 16 bits du résultat sont arrondis à 15 bits.
- e) le signe du résultat sera calculé en tenant compte des signes des arguments.

FPPDIV : Division en virgule flottante

L'argument 1 est divisé par l'argument 2 et le résultat remplace l'argument 1.

Algorithme :

- a) les arguments sont convertis en deux nombres positifs.
- b) si le diviseur est nul, le résultat est le plus grand nombre positif écrit en virgule flottante de 24 bits.
- c) les 16 bits du quotient sont arrondis à 15.
- d) le signe du résultat sera calculé compte tenu des signes des arguments.

FPPCPY : Cette opération déplace un nombre en virgule flottante d'une position mémoire à une autre.

Algorithme :

- a) on charge l'accumulateur B par l'adresse du nombre à déplacer.
- b) on charge l'accumulateur A par l'adresse de la position mémoire où le nombre sera logé.

FPPCMP : Comparaison de deux nombres en virgule flottante.

- a) on charge les accumulateurs A et B par les adresses des deux nombres à comparer
- b) l'opération FPPSUB est appliqué à ces deux nombres
- c) le plus significatif byte du résultat est stocké dans l'accumulateur A et sera testé pour voir l'état du nombre trouvé.
- d) le registre d'état nous renseigne si le résultat est positif négatif ou nul.

.3.4. Fonctions Spéciales

Fonctions spéciales

Dans le but de réduire la longueur du programme (qualité recherchée en microinformatique) nous avons établi des sous programmes de toutes les séquences répétitives qui seront appelées par le programme principal. Ces fonctions font appel aux différentes opérations de la bibliothèque mathématique.

FPPSIN : l'adresse de l'argument X est stockée dans la position mémoire 3F. En fin d'exécution de ce programme, le résultat est stocké dans les positions mémoires C6, C7, C8 (2 bytes pour la mantisse et 1 byte pour l'exposant).

En fait ce programme effectue le calcul de l'expression suivante :

$$x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!}$$

l'ordre élevé de cette série est ignoré car les angles sont inférieurs à π

FPPSPAI : Ce programme permet le calcul ^{de} la valeur prise par l'expression ci-dessous à l'instant $T = T_i$

$$\text{SIN} (\pi(TL - T_i) / (TL - T_c))$$

Pour cela l'adresse de l'argument TI est stockée dans la position mémoire d'adresse 40. Ce programme fait appel au programme FPPSIN ; donc une fois la quantité $(TL-TI)/(TL-TC)$ calculée; son adresse doit être stockée dans la cellule mémoire 3F. Le résultat sera disponible dans C6,C7,C8.

FPPSPBI : Ce programme permet le calcul de la valeur prise par l'expression ci-dessous à l'instant $T = TI$ pour $RN = RN_i$.

Pour ce faire, on stocke au préalable les adresses des arguments RN_i et T_i respectivement dans les positions mémoires 43, 40. Après exécution du programme, le résultat est écrit dans les positions mémoires EA,EB,EC.

$$BI = RN_i \left[\frac{(TL+TC)}{2} + TI \right]^2.$$

FPPSP (AB-CD): On transfère les arguments A,B,C,D respectivement dans les positions mémoires D5,D8,DB,DE. L'exécution de ce programme de calcul de (AB-CD) donne un résultat dans les positions mémoire D5,D6,D7.

FPPGX : Ce programme calcule l'expression $(E-X) \sin(X-C) - (D-X) \sin(X-B)$. Les arguments E,C,D,B,X sont stockés respectivement dans les cellules mémoires d'adresse, 93, 99, 90, 9C, A5.

Le résultat de l'opération est disponible dans les positions mémoires B_1, B_2, B_3 .

VI.3.4. Programme Principal

Ce programme utilise les données inscrites en virgule flottante dans les positions mémoires 5A à 84 de la RAM.

Après exécution du programme, les résultats sont stockés dans le tableau des résultats réservé à cet effet (voir page 83).

Chaque donnée et résultat occupe 3 bytes (2 bytes pour la mantisse et un byte pour l'exposant.)

PROGRAMME PRINCIPAL DE DETERMINATION
DES PARAMETRES DE TS, TA, RA

		ORG	12	
				<i>réserver 3 bytes pour</i>
0003		RMB	3	
0003		RMB	3	π
0003		RMB	3	6 1/2
0003		RMB	3	8
		ORG	\$ 2A	
0003		RMB	3	24
0003		RMB	3	32
0003		RMB	3	48
0003		RMB	3	72
0003		RMB	3	120
0003		RMB	3	120
0003		RMB	3	5040
0005		RMB	5	
				<i>réserver 5 bytes pour mémoire de travail</i>
88 D5	FPP ADD	EQU	\$ 88D5	
88 FD	FPP SUB	EQU	\$ 88FD	
89 EA	FPP DIV	EQU	\$ 89EA	
89 79	FPP MUL	EQU	\$ 8979	
88 5B	FPP CPY	EQU	\$ 885B	
88 3A	FPP CMP	EQU	\$ 883A	
8ADC	FPP SPGX	EQU	\$ 8ADC	
8B 45	FPP SPSIN	EQU	\$ 8B45	
86 C9	FPP SP(RB-CD)	EQU	\$ 86C9	
8B DD	FPP SP RI	EQU	\$ 8BDD	
8C 13	FPP SP BI	EQU	\$ 8C13	
		ORG	5000	
CE 4000	LDX	# \$ 4000		mantisse de 1
DF 15	STX	\$ 15		stocker mantisse dans mémoire 15
86 01	LDA A	# \$ 01		exposant de 1
97 17	STA A	# \$ 17		exposant dans 17
CE 6487	LDX	# \$ 6487		mantisse de π
DF 1B	STX	\$ 1B		stocker mantisse dans 1B.

86	02	LDA	A	#	\$	02
97	1D	STA	A	\$		1D
CE	6000	LDX	#	\$		6000
DF	1E	STX		\$		1E
86	03	LDA	A	#	\$	03
97	20	STA	A	\$		20
CE	4000	LDX	#	\$		4000
DF	21	STX		\$		21
86	04	LDA	A	#	\$	04
97	23	STA	A	\$		23
CE	6000	LDX	#	\$		6000
DF	2A	STX		\$		2A
86	05	LDA	A	#	\$	05
97	2C	STA	A	\$		2C
CE	4000	LDX	#	\$		4000
DF	2D	STX		\$		2D
86	06	LDA	A	#	\$	06
97	2F	STA	A	\$		2F
CE	6000	LDX	#	\$		6000
DF	30	STX		\$		30
86	06	LDA	A	#	\$	06
97	32	STA	A	\$		32
CE	4800	LDX	#	\$		4800
DF	33	STX		\$		33
86	07	LDA	A	#	\$	07
97	35	STA	A	\$		35
CE	7800	LDX	#	\$		7800
DF	36	STX		\$		36
86	07	LDA	A	#	\$	07
97	38	STA	A	\$		38
CE	5A00	LDX	#	\$		5A00
DF	39	STX		\$		39
86	0A	LDA	A	#	\$	0A
97	3B	STA	A	\$		3B
CE	4ECO	LDX	#	\$		4ECO
DF	3C	STX		\$		3C
86	0D	LDA	A	#	\$	0D
97	3E	STA	A	\$		3E

Calcul de BS et CS

C6	6F	LDA	B	#	\$	6F	pointer T32
86	87	LDA	A	#	\$	87	pointer mémoire de copie
BD	885B	JSA				FPPCPY	transfert de T32
C6	6C	LDA	B	#	\$	6C	pointer T31
86	8A	LDA	A	#	\$	8A	pointer mémoire de copie
BD	885B	JSA				FPPCPY	transfert de T32.
C6	87	LDA	A	#	\$	87	pointer T32.

BD 887D
 C6 63
 86 8D
 BD 885B
 C6 60
 86 90
 BD 885B
 C6 8D
 BD 887D
 86 8A
 C6 90
 BD 88EA
 C6 6C
 86 93
 BD 885B
 C6 8D
 BD 897A
 C6 60
 86 8D
 BD 885B
 C6 87
 BD 897A
 C6 93
 BD 887D
 C6 90
 BD 89EA

JSR FPPSUB
 LDA B # 63
 LDAA # 8D
 JSR FPPCPY
 LDAB # 60
 LDAA # 90
 JSR FPPCPY
 LDA B # 8D
 JSR FPPSUB
 LDAA # 8A
 LDAB # 90
 JSR FPPDIV
 LDA B # 6C
 LDAA # 93
 JSR FPPCPY
 LDAB # 8D
 JSR FPPMUL
 LDAB # 60
 LDAA # 8D
 JSR FPPCPY
 LDAB # 87
 JSR FPPMUL
 LDAB # 93
 JSR FPPSUB
 LDAB # 90
 JSR FPPDIV

calcul de TS1 - TS2
 pointer T2
 pointer mémoire de copie
 transfert de T2
 pointer T1
 pointer mémoire de copie
 transfert de T1
 pointer T2
 calcul de T1 - T2
 pointer TS1 - TS2
 pointer T1 - T2
Calcul de BS
 pointer TS1
 pointer mémoire de copie
 transfert de TS1
 pointer T2
 calcul de T2 * TS1
 pointer T3
 pointer mémoire de copie
 transfert de T3
 pointer TS2
 calcul de T1 * TS2
 pointer T2 * TS1
 calcul de T2 * TS1 - T1 * TS2
 pointer T1 - T2
Calcul de CS

Calcul de A, B, C, D, E, A1, A2,

C6 5D
 86 90
 BD 885B
 C6 5A
 86 93
 BD 885B
 C6 90
 BD 887D
 C6 8A
 86 90
 BD 885B
 C6 93
 BD 897A
 C6 1B
 86 93
 BD 885B
 C6 90
 BD 89EA
 C6 75

LDAB # 5D
 LDAA # 90
 JSR FPPCPY
 LDAB # 5A
 LDAA # 93
 JSR FPPCPY
 LDAB # 90
 JSR FPPSUB
 LDAB # 8A
 LDAA # 90
 JSR FPPCPY
 LDAB # 93
 JSR FPPMUL
 LDAB # 1B
 LDAA # 93
 JSR FPPCPY
 LDAB # 90
 JSR FPPDIV
 LDAB 75

pointer TC
 pointer mémoire de copie
 transfert de TC
 pointer TL
 pointer mémoire de copie
 transfert de TL
 pointer TC
 calcul de TL - TC
 pointer BS
 pointer mémoire de copie
 transfert de BS
 pointer TL - TC
 calcul de BS (TL - TC)
 pointer π (P)
 pointer mémoire de copie
 transfert de π
 pointer BS (TL - TC)
 calcul de A
 pointer TS4

06 00
0D 005B
C6 31
06 06
0D 005B
C6 06
06 90
0D 007A
C6 72
06 35
0D 006B
06 96
C6 33
0D 005B
06 90
C6 99
0D 007A
C6 0A
06 99
0D 005B
C6 69
06 9C
0D 005B
C6 99
06 00
0D 007A
C6 9C
0D 000E
C6 96
06 9C
0D 005B
C6 9C
06 00
0D 007A
C6 0A
06 9C
0D 005B
C6 06
06 9F
0D 005B
C6 9C
0D 007A
C6 0D
06 9C
0D 000E
C6 0E

LDA A # 90
JSR FPPCPY
LDA B # 98
LDA A # 96
JSR FPPCPY
LDA B # 96
LDA A # 90
JSR FPPMUL
LDA B # 72
LDA A # 98
JSR FPPCPY
LDA A # 96
LDA A # 98
JSR FPPCPY
LDA A # 93
LDA B # 93
JSR FPPMUL
LDA B # 8A
LDA A # 99
JSR FPPCPY
LDA B # 69
LDA A # 9C
JSR FPPCPY
LDA B # 99
JSR FPPMUL
LDA B # 8D
LDA A # 99
JSR FPPCPY
LDA B # 9C
JSR FPPADD
LDA B # 96
LDA A # 9C
JSR FPPCPY
LDA B # 9C
LDA A # 99
JSR FPPMUL
LDA B # 8A
LDA A # 9C
JSR FPPCPY
LDA B # 66
LDA A # 9F
JSR FPPCPY
LDA B # 9C
JSR FPPMUL
LDA B # 8D
LDA A # 9C
JSR FPPCPY
LDA B # 9E

pointer mémoire de copie
transfert de T54
pointer A
pointer mémoire de copie
transfert de A
pointer A
pointer T54
Calcul de D = A.T54
pointer T54

pointer mémoire de copie
pointer A

Calcul de E = A.T59.
pointer 05
pointer mémoire de copie

pointer T4

pointer C5

Calcul de C = A(0074 + C5)
pointer 05

pointer T3

calcul de 05.T3
pointer C5

pointer T3

BD 88D5
 CG 96
 BG 9F
 BD 885B
 CG 9F
 BG 9C
 BD 897A
 CG 9C
 BG 9F
 BD 885B
 CG 8A
 BG A2
 BD 88
 CG 5A
 BG A8
 BD 885B
 BG A2
 CG A5
 BD 897A
 CG 8D
 BG A5
 BD 885B
 BG A2
 CG A5
 BD 88D5
 CG 9F
 BG A5
 BD 885B
 CG 99
 BG A8
 BD 885B
 BG A5
 CG A8
 BD 887D
 97 37
 BD 8845
 CG 99
 BG AB
 BD 885B
 CG 9F
 BG AE
 BD 885B
 CG AB
 BD 887D
 CG C6
 BD 897A
 CG 8F
 BG A5

JSR FPPADD
 LDAB # \$ 96
 LDAA # \$ 9F
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ 9F
 LDAA # \$ 9C
 JSR FPPMUL
 LDAB # \$ 9C
 LDAA # \$ 9F
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ 8A
 LDAA # \$ A2
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ 5A
 LDAA # \$ A5
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ A2
 LDAB # \$ A5
 JSR FPPMUL
 LDAB # \$ 8D
 LDAA # \$ A5
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ A2
 LDAB # \$ A5
 JSR FPPADD
 LDAB # \$ 9F
 LDAA # \$ A5
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ 99
 LDAA # \$ AB
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ A5
 LDAB # \$ AB
 JSR FPPSUB
 STAA \$ 3F
 JSR FPPSIN
 LDAB # \$ 99
 LDAA # \$ AB
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ 9F
 LDAA # \$ AE
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ AB
 JSR FPPSUB
 LDAB # \$ C6
 JSR FPPMUL
 LDAB # \$ 8F
 LDAA # \$ A5

calcul de BS.TB + CS
pointeur A.

calcul de B
pointeur B

transfert de B (B = A4)
pointeur BS

pointeur TL

pointeur CS

calcul de A2
pointeur A3

pointeur C

pointeur E
pointeur mémoire de copie

pointeur A1

pointeur E
calcul de (A1 - E)
pointeur sin (A1 - C)
calcul de GA1.
pointeur A1

```

BD 885B
CG A2
BG AB
BD 885B

```

```

JSR      FPPCPY
LDAB # $ A2
LDAA # $ AB
JSR      FPPCPY

```

pointeur A2

Calcul de GA2

```

CG A2
BG AB
BD 885B
BD 8ADC
CG AE
BG BD
BD 865B

```

```

LDAB # $ A2
LDAA # $ AB
JSR      FPPCPY
JSR      FPPCPY
LDAB # $ AE
LDAA # $ BD
JSR      FPPCPY

```

pointeur A2

calcul de GA2 (résultat de B1)

pointeur GA1

pointeur mémoire de copie

Calcul de GA1 + GA2

```

BG BD
CG AB
BD 897A

```

```

LDAA # $ BD
LDAB # $ AB
JSR      FPPMUL

```

pointeur GA1

pointeur GA2

calcul de GA1 + GA2 (résultat BD)

Calcul de $T_0 = X/A$ par la méthode de dichotomie.

```

BG BD
CG I2
BD 883A
2F 01
3F
2D 3A

```

```

LDAA # $ BD
LDAB # $ I2
JSR      FPPCMP
BLE      BOUC1
SWI
BOUC1 BLT      BOUC2

```

si si inférieur ou égal à zéro

branchement si positif.

branchement si négatif

Calcul de $X = (A2 + GA1 + A1 + GA2) / (GA1 + GA2)$

```

CG AE
BG B1
BD 885B
CG A2
BG B4
BD 885B
CG B1
BD 897A
CG AB
BG B7
BD 885B
CG 3F
BG BA
BD 885B
CG B7
BD 897A

```

```

LDAB # $ AE
LDAA # $ B1
JSR      FPPCPY
LDAB # $ A2
LDAB # $ B4
JSR      FPPCPY
LDAB # $ B1
JSR      FPPMUL
LDAB # $ AB
LDAA # $ B7
JSR      FPPCPY
LDAB # $ 3F
LDAA # $ BA
JSR      FPPCPY
LDAB # $ B7
JSR      FPPMUL

```

pointeur GA1

pointeur A2

pointeur GA2

pointeur A1

C6 B4
 BD 88D5
 86 B1
 C6 B7
 BD 88D5
 86 BA
 C6 B1
 BD 89EA
 20 55
 CE 0010
 DF 41
 86 9F
 C6 A2
 BD 88D5
 CE 9F
 6A 02
 C6 9F
 86 A5
 BD 885B
 BD 8ADC
 DE 41
 09
 DF 41
 27 35

BOUC2

ITR

LDAB # \$ B4
 JSR FPPADD
 LDAA # \$ B1
 LDAB # \$ B7
 JSR FPPADD
 LDAA # \$ BA
 LDAB # \$ B1
 JSR FPPDIV
 BRA BOUC3
 LDX # \$ 10
 STX \$ 41
 LDAA # \$ 9F
 LDAB # \$ A2
 JSR FPPADD
 LDX # \$ 9F
 DEC 2,X
 LDAB # \$ 9F
 LDAA # \$ A5
 JSR FPPCPY
 JSR FPPSPBX
 LDX \$ 41
 DEX
 STX \$ 41
 BEQ BOUC3

Calcul de $A1 \cdot GA2 + A2 \cdot GA1$

calcul de $X = \frac{A1 \cdot GA2 + A2 \cdot GA1}{GA1 + GA2}$

pointer A1
pointer A2

décrémenter l'exposant de $A1 + A2$
pointer $(A1 + A2) / 2$
pointer mémoire de copie

calcul de $GX = 6(A1 + A2) \rightarrow$ de B1

branchement si égale à zéro.

Calcul de $GX + GA2$

C6 B1
 86 B4
 BD 885B
 C6 AE
 86 B7
 BD 885B
 C6 B4
 BD 897A
 86 B7
 C6 12
 BD 883A
 2E 09
 C6 A5
 86 A2
 BD 885B
 20 CF
 C6 A5
 86 9F
 BD 885B
 C6 B1
 86 AE

BOUC4

LDAB # \$ B1
 LDAA # \$ B4
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ AE
 LDAA # \$ B7
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ B4
 JSR FPPMUL
 LDAA # \$ B7
 LDAB # \$ 12
 JSR FPPCPY
 BOT BOUC4
 LDAB # \$ A5
 LDAA # \$ A2
 JSR FPPCPY
 BRA ITR
 LDAB # \$ A5
 LDAA # \$ 9F
 JSR FPPCPY
 LDAB # \$ B1
 LDAA # \$ AE

pointer GX
pointer mémoire de copie

pointer GA2

Calcul de $GX + GA1$

branchement si > 0

pointer X

pointer GX

00 005B	JSR	FPPCPY	
20 AF	BRB	ITR	
C6 A5	BOUC3	LDRB # \$A5	pointeur X
06 A2		LDRR # \$A2	pointeur mémoire de copie (A2)
00 005B	JSR	FPPCPY	
C6 06		LDRB # \$06	pointeur A
00 00EA	JSR	FPPDIV	Calcul de TO = X/A
C6 A2		LDRB # \$A2	pointeur TO
06 00		LDRR # \$00	
00 005B	JSR	FPPCPY	transfert de TO des tableaux des résultats

Calcul de AS = (T55 - TO) / SIN(X - B)

C6 7E	LDRB # \$7E	pointeur T55	
06 9F	LDRR # \$9F	pointeur mémoire de copie	
00 005B	JSR	FPPCPY	transfert de T55
C6 A2	LDRB # \$A2	pointeur TO	
00 007D	JSR	SUB	Calcul de (T55 - TO) dans 9F
06 35	LDRR # \$35	pointeur X	
C6 9C	LDRB # \$9C	pointeur B	
00 007D	JSR	FPPSUB	Calcul de X - B
9F 9F	STAR	\$9F	adresse adress de (X - B) pour calcul de sin(x)
00 0045	JSR	FPPSIN	calcul de sin(X - B)
06 9F	LDRR # \$9F		
C6 C6	LDRB # \$C6		
00 00EA	JSR	FPPDIV	calcul de AS

transfert de AS dans table des résultats

C6 0F	LDRB # \$0F	pointeur AS	
06 93	LDRR # \$93	pointeur mémoire de copie	
00 005B	JSR	FPPCPY	transfert de AS de tableau des résultats

Calcul de DT = (TO - CS) / BS - TL

C6 8D	LDRB # \$8D	pointeur CS	
06 9C	LDRR # \$9C		
00 005B	JSR	FPPCPY	
06 A2	LDRR # \$A2	pointeur TO	
C6 9C	LDRB # \$9C	pointeur CS	
00 007D	JSR	FPPSUB	Calcul de TO - CS
C6 8A	LDRB # \$8A	pointeur BS	
06 9F	LDRR # \$9F		
00 005B	JSR	FPPCPY	
06 A2	LDRR # \$A2		
C6 9F	LDRB # \$9F		
00 00EA	JSR	FPPDIV	Calcul de TO - CS / BS
C6 5A	LDRB # \$5A	pointeur TL	

86 9F	LDA A# 9F	pointeur mémoire de copie
BD 883B	JSR FPPCPY	
86 A2	LDA A# 8A2	
CG 8E	LDA B# 9F	
BD 887D	JSR FPPSUB	Calcul de DT

transfert de DT dans table des résultats

CG A2	LDA B# 8A2	
86 96	LDA A# 96	
BD 885B	JSR FPPCPY	transfert de DT dans tableau des résultats (96)

Calcul de TSM

CG 5A	LDA B# 55A	pointeur TL
86 99	LDA A# 999	pointeur mémoire de copie
BD 885B	JSR FPPCPY	
CG 96	LDA B# 996	pointeur DT
86 9C	LDA A# 99C	
BD 885B	JSR FPPCPY	transfert de DT
CG 99	LDA B# 999	
BD 8805	JSR FPPADD	calcul de TL+DT
CG 5D	LDA B# 95D	pointeur TC
86 99	LDA A# 999	
BD 885B	JSR FPPCPY	transfert de TC
CG 9C	LDA B# 99C	pointeur TL+DT
BD 887D	JSR FPPSUB	Calcul de TC-TL-DT
CG 9D	LDA B# 99D	pointeur TO
86 9C	LDA A# 99C	
BD 885B	JSR FPPCPY	
CG 99	LDA B# 999	pointeur TC-TL-DT
BD 897A	JSR FPPMUL	Calcul de TO (TC-TL-DT)
CG 2A	LDA B# 92A	pointeur 24
86 9F	LDA A# 99F	pointeur mémoire de copie
BD 88	JSR FPPCPY	transfert de 24
86 9C	LDA A# 99C	pointeur (TC-TL-DT)
CG 9F	LDA B# 99F	pointeur 24
BD 89EA	JSR FPPDIV	Calcul de TO (TC-TL-DT)/24
CG 99	LDA B# 999	pointeur TC-TL-DT
86 A2	LDA A# 8A2	
BD 885B	JSR FPPCPY	
CG 9F	LDA B# 99F	pointeur 24
BD 887D	JSR FPPSUB	Calcul de TC-TL-DT-24
CG 8D	LDA B# 88D	pointeur CS
86 AB	LDA A# 8AB	
BD 885B	JSR FPPCPY	
CG A2	LDA B# 8A2	pointeur TC-TL-DT-24
BD 897A	JSR FPPMUL	Calcul de CS (TC-TL-DT-24)
CG 9F	LDA B# 99F	pointeur 24
BD 89EA	JSR FPPDIV	calcul de CS/(TC-TL-DT-24)/24

CG A8
 BG 9C
 BD 887D
 CG 8D
 BG A2
 BD 885B
 CG 99
 BD 887D
 BG A2
 CG A2
 BD 897A
 CG 5D
 BG A5
 BD 889B
 CG 9F
 BD 887D
 BG A5
 CG A5
 BD 897A
 BG A2
 CG A5
 BD 887D
 CG 8A
 BG A5
 BD 885B
 CG A2
 BD 897A
 CG 3D
 BG A2
 BD 885B
 BG A5
 CG A2
 BD 896A
 BG 9C
 CG A3
 BD 88D5
 CG 96
 BG 9F
 BD 885B
 CG 99
 BD 88D5
 CG 96
 BG A5
 BD 885B
 CG 1B
 BG AB
 BD 885B
 CG A5

LDA B# 3 A8 pointer TC (TC - TL - DT - 24) / 24
 LDA A# 3 9C pointer TC (TC - TL - DT) / 24
 JSR FPPSUB Calcul de TO (TC - TL - DT) / 24 + CS (TL + DT - TC + 24) / 24
 LDA B# 3 5D pointer TC
 LDA A# 3 A2
 JSR FPPCPY
 LDA B# 3 99 pointer TC - TL - DT
 JSR FPPSUB Calcul de TL + DT
 LDA A# 3 A2
 LDA B# 3 A2
 JSR FPPMUL Calcul de (TL + DT) ²
 LDA B# 3 5D pointer TC
 LDA A# 3 A5
 JSR FPPCPY
 LDA B# 3 9F pointer 24
 JSR FPPSUB Calcul de TC - 24
 LDA A# 3 A5
 LDA B# 3 A5
 JSR FPPMUL calcul de (TC - 24) ²
 LDA A# 3 A2 pointer (TL + DT) ²
 LDA B# 3 A5 pointer (TC - 24) ²
 JSR FPPSUB
 LDA B# 3 8A pointer 8B
 LDA A# 3 A5
 JSR FPPCPY
 LDA B# 3 A2 pointer ((TL + DT) ² - ((TC - 24) ²))
 JSR FPPMUL Calcul de BS ((TL + DT) ² - (TC - 24) ²)
 LDA B# 3 3D pointer 4B
 LDA A# 3 A2
 JSR FPPCPY
 LDA A# 3 A5
 LDA B 3 A2
 JSR FPPDIV Calcul de BS ((TL + DT) ² - (TC - 24) ²) / AS
 LDA A# 3 9C
 LDA B# 3 A5
 JSR FPPADD Calcul de BS () / AS + CS () / 24 + TC () / 24
 LDA E# 3 96 pointer DT
 LDA A# 3 9F
 JSR FPPCPY
 LDA B# 3 99 pointer TC - TL - DT
 JSR FPPADD Calcul de TC - TL
 LDA B# 3 96 pointer DT
 LDA A# 3 A5
 JSR FPPCPY
 LDA B# 3 1B pointer 71
 LDA A# 3 AB
 JSR FPPCPY
 LDA B# 3 AB pointer DT

BD 837A	JSR	FPP MUL	Calcul de DT * PI
CG 8F	LDA B # 8 8F		pointer TC - TL
BD 83EA	JSR	FPP DIV	Calcul de DT. PI / TC - TL
CG 1B	LDA B # 8 1B		pointer 11
8G AB	LDA A # 8 AB		
BD 835B	JSR	FPP CPY	
CE 00AB	LDX # 8 AB		
6A 0Z	DEC	Z, X	Calcul de 1/2
8G AB	LDA A # 8 AB		pointer 1/2
CG AB	LDA B # 8 AB		
BD 83D5	JSR	FPP ADD	Calcul de (DT. PI / TC - TL) + PI/2 = X
9F 3F	STA A 8 3F		stocker X ds 3F pour calculer SINX.
BD 8345	JSR	FPP SIN	Calcul de SINX (résultat ds CG)
CG 15	LDA B # 8 15		pointer 1
8G AB	LDA A # 8 AB		
BD 835B	JSR	FPP CPY	
CG CG	LDA B # 8 CG		pointer SINX.
BD 83D5	JSR	FPP ADD	Calcul de SINX + 2.
CG 8F	LDA B # 8 8F		pointer TC - TL
BD 837A	JSR	FPP MUL	Calcul de (TC - TL) (SINX + 2)
CG 93	LDA B # 8 93		pointer 93
BD 837A	JSR	FPP MUL	Calcul de 93 (TC - TL) (SINX + 2)
CG 1B	LDA B # 8 1B		pointer PI
8G AB	LDA A # 8 AB		
BD 835B	JSR	FPP CPY	
CG 2A	LDA B # 8 2A		pointer 24
BD 837A	JSR	FPP MUL	Calcul de 24 * PI
CG AB	LDA B # 8 AB		
8G AB	LDA A # 8 AB		
BD 83EA	JSR	FPP DIV	Calcul de 93 (TC - TL) (SINX + 2) / (24 * PI)
CG AB	LDA B # 8 AB		
8G 9C	LDA A # 8 9C		
BD 83D5	JSR	FPP ADD	Calcul de TSM

transfert de TSM dans table des résultats

CG 9C	LDA B # 8 9C	
8G 99	LDA A # 8 99	
BD 835B	JSR	FPP CPY. Transfert de TSM.

Calcul des Coefficients A2, A3, A4

CG CF	LDA B # 8 CF	pointer T32	
8G 9F	LDA A # 8 9F		
BD 835B	JSR	FPP CPY	
CG 9C	LDA B # 8 9C	pointer TSM	
BD 837D	JSR	FPP SUB	Calcul de A2 = T32 - TSM
CG 7Z	LDA B # 8 7Z	pointer T33	

06 A2
 0D 885B
 C6 9C
 0D 887D
 C6 75
 06 A5
 0D 885B
 C6 9C
 0D 887D

Calcul de AKA

C6 5D
 06 AB
 0D 885B
 C6 21
 06 AB
 0D 885B
 C6 AB
 0D 887D
 C6 AB
 06 AE
 0D 885B
 C6 AB
 06 AB
 0D 897A
 C6 AE
 0D 897A
 C6 2D
 06 AB
 0D 885B
 06 AB
 C6 AB
 0D 887D
 C6 AB
 06 AE
 0D 885B
 06 AB
 C6 AB
 0D 897A
 C6 AE
 0D 897A
 C6 AB
 0D 88D5
 C6 33
 06 AB
 0D 885B
 06 AB
 C6 AB
 0D 89EA

LDAA # 8A2
 JSR FPPCPY
 LDAB # 89C
 JSR FPPSUB : calcul de A3
 LDAB # 875 pointer TS4
 LDAA # 8A5 pointer m/moire de copie.
 JSR FPPCPY
 LDAB # 89C
 JSR FPPSUB : calcul de A4

 LDAB # 85B pointer TC
 LDAA # 8A8
 JSR FPPCPY
 LDAB # 829 pointer 8
 LDAA # 8AB
 JSR FPPCPY
 LDAB # 8AB
 JSR FPPSUB
 LDAB # 8AB pointer (8-TC)
 LDAA # 8AE
 JSR FPPCPY
 LDAA # 8AB
 LDAB # 8AB
 JSR FPPMUL calcul de $(8-TC)^2$
 LDAB # 8AE
 JSR FPPMUL : calcul de $(8-TC)^3$
 LDAB # 82D pointer 2D
 LDAA # 8AB pointer memoire de copie
 JSR FPPCPY
 LDAA # 8AB pointer TC
 LDAB # 8AB pointer 32
 JSR FPPSUB calcul de TC-32
 LDAB # 8AB pointer TC-32
 LDAA # 8AE
 JSR FPPCPY
 LDAA # 8AE
 LDAB # 8AE
 JSR FPPMUL : calcul de $(TC-32)^2$
 LDAB # 8AE
 JSR FPPMUL : calcul de $(TC-32)^3$
 LDAB # 8AB
 JSR FPPADD : calcul de $(TC-32)^3 + (8-TC)^3$
 LDAB # 833 pointer 48.
 LDAA # 8AB
 LDAB # 8AB
 JSR FPPCPY
 LDAA # 8AB pointer (TC-32)
 LDAB # 8AB
 JSR FPPDIV : calcul de AKA.

```

Calcul de B2, B3, A4, B4
CG 21          LDA B# 8 B4          pointer B
BB 885B        LDA B# 8 21
CG 68          JSR          FPPCPY
BB 885C        LDA B# 8 B3          pointer T2
BB 885D        LDA A          BB
CG 6A          JSR          FPPCPY
BB 885E        LDA B# 8 B4          pointer B
CG 6C          JSR          FPPSUB: Calcul de T2-B
BB 885F        LDA B# 8 AB
CG 6E          JSR          FPPSUB
BB 8870        LDA B# 8 AB          Calcul (T2-B)2
CG 68          LDA A# 8 AB          pointer AKA
BB 8871        JSR          FPPADD: Calcul de B2
CG 66          LDA B# 8 66          pointer T3
BB 8872        LDA A# 8 AE
CG 64          JSR          FPPCPY
BB 8873        LDA B# 8 B4          pointer B
CG 62          JSR          FPPSUB: Calcul de T3-B
BB 8874        LDA A# 8 AE
CG 60          LDA B# 8 AE
BB 8875        JSR          FPPMUL: Calcul (T3-B)2
CG 58          LDA B# 8 AE          pointer AKA
BB 8876        JSR          FPPADD: Calcul de B3 ds AE
CG 56          LDA B# 8 69
BB 8877        LDA A# 8 B1
CG 54          JSR          FPPCPY
BB 8878        LDA B# 8 B4
CG 52          JSR          FPPSUB: Calcul de T4-B
BB 8879        LDA A# 8 B1
CG 50          LDA B# 8 B1
BB 887A        JSR          FPPMUL: Calcul de (T4-B)2
CG 48          LDA B# 8 AB          pointer AKA
BB 887B        JSR          FPPADD: Calcul de B4

```

Calcul de DELTA et TAM
transfert de A3, B4, A4, B3

```

CG A2          LDA B# 8 A2          pointer A3
BB 88          LDA A# 8 B3
CG 80          JSR          FPPCPY
BB 885B        LDA B# 8 B1          pointer B4
CG 78          LDA A# 8 B3
BB 885C        JSR          FPPCPY
CG 76          LDA B# 8 A3          pointer A4
BB 885D        LDA A# 8 B3
CG 74          JSR          FPPCPY
BB 885E        LDA B# 8 A4          pointer B4
CG 72          LDA A# 8 B3
BB 885F        JSR          FPPCPY
CG 70          LDA B# 8 A4          pointer B4
BB 8860        LDA A# 8 B3

```

BD 885B	LDA	FPPCPY	
BD 8	JSR	FPPSP (A8-C8): calcul de A3.B4 - A4.B3	
CG DS	LDA B# S DS	pointeur A3.B4 - A4.B3	
8C E1	LDA A# S E1		
BD 885B	JSR	FPPCPY	
CG 78	LDA B# S 78		
8C E4	LDA A# S E4		
BD 885B	JSR	FPPCPY	
CG E1	LDA B# S E1		
BD 897A	JSR	FPPMUL: calcul de T21. A3.B4 - B3.A4	

transfert de A4, B2, B4, A2

CG A5	LDA B# S A5	pointeur A4	
8C DS	LDA A# S DS		
BD 885B	JSR	FPPCPY	
CG AB	LDA B# S AB	pointeur B2	
8C D8	LDA A# S D8		
BD 885B	JSR	FPPCPY	
CG B1	LDA B# S B1	pointeur B4	
8C DB	LDA A# S DB		
BD 885B	JSR	FPPCPY	
CG 9F	LDA B# S 9F	pointeur A2	
8C DE	LDA A# S DE		
BD 885B	JSR	FPPCPY	
BD	JSR	FPP(A8-C8): calcul de A4.B2 - B4.A2 = 2 ^e terme B2L	
CG DS	LDA B# S DS	pointeur A4.B2 - B4.A2	
8C E7	LDA A# S E7		
BD 885B	JSR	FPPCPY	
CG 78	LDA B# S 78	pointeur TAB	
8C EA	LDA A# S EA		
BD 885B	JSR	FPPCPY	
CG E7	LDA B# S E7		
BD 897A	JSR	FPPMUL: calcul TAB (A4.B2 - B4.A2) = 2 ^e TAM	
CG E4	LDA B# S E4	pointeur T22 (A2.B4 - B3.A4)	
BD 88D5	JSR	FPPADD: calcul (1 ^{er} TAM + 2 ^e TAM)	
8C E1	LDA A# S E1		
CG E7	LDA B# S E7		
BD 88D5	JSR	FPPADD: calcul de (1 ^{er} DELTA + 2 ^e DELTA)	

transfert de A2, B3, B2, A3 pointeur B2

CG 9F	LDA B# S 9F	pointeur A2	
8C DS	LDA A# S DS	pointeur B3	
BD 88	JSR	FPPCPY	
CG AE	LDA B# S AE	pointeur B3	
8C DB	LDA A# S DB		
BD 885B	JSR	FPPCPY	

CG AB	LDA B # B AB pointer B2
RG DB 5B	LDA A # B D8
BD 88 5B	JSR FPPCPY
CG A2	LDA B # B A2 pointer A3
RG DE	LDA A # B 5E
BD 88 5B	JSR FPPCPY
BD 88C9	JSR FPPSP (AB - CD): Calcul $(A2 \cdot B3 - B2 \cdot A3) = 3 \text{ DEL}$
CG D5	LDA B # B D5
RG E4	LDA A # B E4
BD 88 5B	JSR FPPCPY
CG 7E	LDA B # B 7E pointer TAM
RG E7	LDA A # B E7
BD 88 5B	JSR FPPCPY
CG E4	LDA B # B E4 pointer $(A2 \cdot B3 - B2 \cdot A3)$
BD 89 7A	JSR FPPMUL: calcul de TAM $(A2 \cdot B3 - B2 \cdot A3) = 3 \text{ TAM}$
CG EA	LDA B # B EA pointer $(1^\circ \text{TAM} + 2^\circ \text{TAM})$
BD 89 7A	JSR FPPMUL
RG E1	LDA A # B E1 $(1 + 2^\circ \cdot \text{DELTA})$
CG E4	LDA B # B E4 (3°DELTA)
BD 88 D5	JSR FPPCPY Calcul de DELTA
RG E7	LDA A # B E7
CG E1	LDA B # B E1 pointer DELTA.
BD 89 EA	JSR FPP DIV: Calcul de TAM

transfert de TAM

CG E7	LDA B # B E7 pointer TAM.
RG 9C	LDA A # B 9C
BD 88 5B	JSR FPPCPY

Calcul de AA

CG 7B	LDA B # B 7B pointer TAM
RG D5	LDA A # B D5
BD 88 5B	JSR FPPCPY
CG B1	LDA B # B B1 pointer B4
RG D8	LDA A # B D8
BD 88 5B	JSR FPPCPY
CG AE	LDA B # B AE pointer B3
RG DB	LDA A # B DB
BD 88 5B	JSR FPPCPY
CG 7E	LDA B # B 7E pointer TAM
RG DE	LDA A # B DE
BD 88 5B	JSR FPPCPY
BD 88 C9	JSR FPPSP (AB - CD)
CG D5	LDA B # B D5 pointer $(TAM \cdot B4 - B3 \cdot TAM)$
RG E4	LDA A # B E4
BD 88 5B	JSR FPPCPY

CG 7E	LDA B# 3 7E	pointeur TR4
8G 05	LDA A# 3 05	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG A8	LDA B# 3 A8	pointeur B2
8G 08	LDA A# 3 08	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG 81	LDA B# 3 81	pointeur B4
8G 08	LDA A# 3 08	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG 78	LDA B# 3 78	pointeur TR2
8G 0E	LDA A# 3 0E	
BD 885B	JSR	FPPCPY
BD 88C9	JSR	FPPSP(AB-CD)
CG 05	LDA B# 3 05	pointeur(TA4.B2 - B4.TA2) = 1°.AA.
8G E7	LDA A# 3 E7	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG E4	LDA B# 3 E4	pointeur(TA8.B4 - B8.TA4) = 2°.AA.
BD 8805	JSR	FPPADD : calcul de (1°.AA + 2°.AA)
CG 78	LDA B# 3 78	pointeur TR2
8G 05	LDA A# 3 05	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG AE	LDA B# 3 AE	pointeur B8
8G 08	LDA A# 3 08	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG A8	LDA B# 3 A8	pointeur B3
8G 08	LDA A# 3 08	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG 78	LDA B# 3 78	
8G 0E	LDA A# 3 0E	
BD 885B	JSR	FPPCPY
BD 88C9	JSR	FPPSP(AB-CD)
CG 05	LDA B# 3 05	
8G E4	LDA A# 3 E4	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG E7	LDA B# 3 E7	
BD 8805	JSR	FPPCPY : calcul de (1+2+3) AA
CG E1	LDA B# 3 E1	pointeur DELTA
BD 88EA	JSR	FPPDIV : calcul de AA
CG A2	LDA B# 3 A2	pointeur A3
8G 05	LDA A# 3 05	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG 7E	LDA B# 3 7E	pointeur TR4
8G 08	LDA A# 3 08	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG 78	LDA B# 3 78	pointeur TR3
8G 08	LDA A# 3 08	
BD 885B	JSR	FPPCPY
CG A5	LDA B# 3 A5	pointeur A4

86 DE
8D 885B
8D 88C9
C6 D5
86 E7
8D 885B
C6 78
86 D5
8D 885B
C6 A5
86 D8
8D 885B
C6 7E
86 8B
8D 885B
C6 9F
86 DE
8D 885B
8D 88C9
C6 D5
86 EA
8D 885B
C6 E7
8D 88D5
C6 9F
86 D5
8D 885B
C6 7B
86 D8
8D 885B
C6 A2
86 D8
8D 885B
C6 78
86 DE
8D 885B
8D 88C9
C6 D5
86 E7
8D 885B
C6 EA
8D 88D5
C6 E7
8D 89EA

LDA A# 8 DE
JSR FPPCPY
JSR FPPSP(AB-CD): calcul de $(T44.03 - T83.A4) = ALP1.$
LDA B# 8 D5
LDA A# 8 E7
JSR FPPCPY
LDA B# 8 78 pointer T82
LDA A# 8 D5
JSR FPPCPY
LDA B# 8 A5 pointer A4
LDA A# 8 D8
JSR FPPCPY
LDA B# 8 7E pointer T84
LDA A# 8 D8
JSR FPPCPY
LDA B# 8 9F pointer A2
LDA A# 8 DE
JSR FPPCPY
JSR FPPSP(AB-CD): calcul $(T82.A4 - T86.A2) = ALP2$
LDA B# 8 D5
LDA A# 8 EA
JSR FPPCPY
LDA B# 8 E7
JSR FPPADD: calcul de $ALP1 + ALP2.$
LDA B# 8 9F pointer A2
LDA A# 8 D5
JSR FPPCPY
LDA B# 8 7B pointer T83
LDA A# 8 D8
JSR FPPCPY
LDA B# 8 A2 pointer A3
LDA A# 8 D8
JSR FPPCPY
LDA B# 8 78 pointer T82
LDA A# 8 DE
JSR FPPCPY
JSR FPPSP(AB-CD): calcul $(A2.T83 - A3.T82) = ALP3$
LDA B# 8 D5 pointer ALP3.
LDA A# 8 E7
JSR FPPCPY
LDA B# 8 EA pointer ALP1 + ALP2.
JSR FPPADD calcul de $ALP1 + ALP2 + ALP3$
LDA B# 8 E1 pointer DELTA
JSR FPPDIV: Calcul de ALPHA

transfert de ALPHA dans table des résultats

CG E7	LDA B # B E7	pointeur ALPHA
86 A2	LDA A # B A2	
8D 885B	JSR	FPPCPY

transfert de AA et de AKA dans table des résultats

CG B4	LDA B # B B4	pointeur AA
86 9F	LDA A # B BF	
8D 885B	JSR	FPPCPY
CG AB	LDA B # B AB	pointeur AKA
86 A5	LDA A # B A5	
8D 885B	JSR	FPPCPY

Calcul des paramètres de Rn
Calcul de A3

CG C6	LDA B # B C6	pointeur T3
87 40	STA B - B 40	
8D 88DD	JSR	FPPSPAI : calcul de A3
CG C6	LDA B # B C6	pointeur A3
86 A8	LDA A # B A8	
8D 885B	JSR	FPPCPY : Transfert de A3

Calcul de A4

CG C9	LDA B # B C9	pointeur T4
87 40	STA A B 40	sauvegarder adresse de T4 de 40
8D 88DD	JSR	FPPSPAI : calcul de A4 → de C6
CG C6	LDA B # B C6	pointeur A4
86 AB	LDA A # B AB	
8D 885B	JSR	FPPCPY

Calcul de B3

CG C6	LDA B # B C6	pointeur T3
87 40	STA B B 40	
CG B1	LDA B # B B1	pointeur AN3
87 43	STA B B 43	
8D 8C13	JSR	FPPSPBI : calcul de B3
CG EA	LDA B # B EA	
86 AE	LDA A # B AE	
8D 885B	JSR	FPPCPY : Transfert de B3 de AE

Calcul de B4

C6 69
 D7 40
 C6 84
 D7 43
 BD 885B
 C6 EA
 86 B1
 BD 885B

LDAB # \$ 69 pointer T4
 STAB \$ 40
 LDAB # \$ 84 pointer RN4
 STAB 43
 JSR FPPSPF Calcul de B4 (résultat dans EA)
 LDAB # \$ EA pointer B4
 LDAA # \$ B1
 JSR FPPCPV: Transfert de B4 de B1

Calcul de DELTA = (B3.A4 - B4.A3)

C6 AE
 86 D5
 BD 885B
 C6 AB
 86 D8
 BD 885B
 C6 B1
 86 DB
 BD 885B
 C6 A8
 86 DE
 BD 885B
 BD 88C9
 C6 D5
 86 B4
 BD 885B

LDAB # \$ AE pointer B3
 LDAA # \$ D5
 JSR FPPCPV
 LDAB # \$ AB pointer A4
 LDAA # \$ D8
 JSR FPPCPV
 LDAB # \$ B1 pointer B4
 LDAA # \$ DB
 JSR FPPCPV
 LDAB # \$ A8 pointer A3
 LDAA # \$ DE
 JSR FPPCPV
 JSR FPP(AB_CD): calcul de (B3.A4 - B4.A3)
 LDAB # \$ D5
 LDAA # \$ B4
 JSR FPPCPV: Transfert de DELTA

Calcul de AN et BN

C6 84
 86 D5
 BD 885B
 C6 AE
 86 D8
 BD 885B
 C6 B1
 86 DB
 BD 885B
 C6 B1
 86 DE
 BD 885B
 BD 88C9
 86 D5
 C6 B4
 BD 89EA
 C6 D5
 86 B7
 BD 885B

LDAB # \$ B4 pointer RN4
 LDAA # \$ D5
 JSR FPPCPV
 LDAB # \$ AE pointer B3
 LDAA # \$ D8
 JSR FPPCPV
 LDAB # \$ B1 pointer AN3
 LDAA # \$ DB
 JSR FPPCPV
 LDAB # \$ B1 pointer B4
 LDAA # \$ DE
 JSR FPPCPV
 JSR FPP(AB_CD): Calcul de (RN4B3 - AN3.B4) → D5
 LDAA # \$ D5
 LDAB # \$ B4 pointer DELTA
 JSR FPPDIV: Calcul de AN → D5
 LDAB # \$ D5
 LDAA # \$ B7
 JSR FPPCPV: Transfert AN dans B7.

Calcul de BN.

C6 A0	LDAB # \$A0	pointer R3
86 D5	LDAA # \$D5	
BD 885B	JSR FPPCPY	
C6 B4	LDAB # \$B4	pointer AN4
86 D8	LDAA # \$D8	
BD 885B	JSR FPPCPY	
C6 AB	LDAB # \$AB	pointer A4
86 DB	LDAA # \$DB	
BD 885B	JSR FPPCPY	
C6 B1	LDAB # \$B1	pointer AN3
86 DE	LDAA # \$DE	
BD 885B	JSR FPPCPY	
BD 8BC9	JSR FPP (AB_CD) : calcul (AB.RN4 - A6.RN3) → D5	
C6 B4	LDAB # \$B4	
86 D5	LDAA # \$D5	
BD 89EA	JSR FPPDIV : calcul de BN : résultat dans B5	
C6 D5	LDAB # \$D5	
86 AB	LDAA # \$AB	
BD 885B	JSR FPPCPY : transfert de B5 de Tableau des résultats	
C6 B7	LDAB # \$B7	pointer AN
86 A8	LDAA # \$A8	
BD 885B	JSR FPPCPY : transfert de AN de tableau des résultats.	
00 00	END	

SOUS PROGRAMME DE CALCUL DE SINX

FPPSIN

C6	IE	LDAB	#	\$ IE	pointer 6
86	C0	LDAA	#	\$ C0	
BD	8858	JSR		FPPCPY	
D6	9F	LDAB	#	\$ 9F	pointer l'angle X
86	C8	LDAA	#	\$ C8	pointer mémoire de copie
BD	885B	JSR		FPPCPY	
C6	C8	LDAB	#	\$ C8	pointer l'angle
86	C6	LDAA	#	\$ C6	
BD	885B	JSR		FPPCPY	
C6	C3	LDAA	#	\$ C3	
86	C8	LDAB	#	\$ C8	
BD	897A	JSR		FPPMUL	Calcul de x ²
C6	C8	LDAB	#	\$ C8	
86	CC	LDAA	#	\$ CC	
BD	885B	JSR		FPPCPY	
C6	CC	LDAB	#	\$ CC	
86	D2	LDAA	#	\$ D2	
BD	885B	JSR		FPPCPY	
86	C3	LDAA	#	\$ C3	
C6	C6	LDAB	#	\$ C6	
BD	897A	JSR		FPPMUL	Calcul de x ³
C6	C3	LDAB	#	\$ C3	
86	C9	LDAA	#	\$ C9	
BD	885B	JSR		FPPCPY	Transfert de x ³
86	C3	LDAA	#	\$ C3	pointer x ³
C6	C0	LDAB	#	\$ C0	pointer 6
BD	8846	JSR		FPPDIV	
C6	C3	LDAA	#	\$ C3	
86	C6	LDAB	#	\$ C6	
BD	887D	JSR		FPPSUB	Calcul de $x - \frac{x^3}{6}$
86	CC	LDAA	#	\$ CC	pointer x ¹
C6	C9	LDAB	#	\$ C9	pointer x ³
BD	887A	JSR		FPPMUL	Calcul de x ⁶
C6	36	LDAB	#	\$ 36	pointer 120
86	C3	LDAA	#	\$ C3	
BD	885B	JSR		FPPCPY	
C6	CC	LDAB	#	\$ CC	pointer x ⁵
86	CF	LDAA	#	\$ CF	
BD	885B	JSR		FPPCPY	
86	CC	LDAA	#	\$ CC	
C6	C3	LDAB	#	\$ C3	
BD	8846	JSR		FPPDIV	Calcul de $\frac{x^6}{120}$
C6	CC	LDAB	#	\$ CC	
86	C6	LDAA	#	\$ C6	
BD	8805	JSR		FPPADD	Calcul de $x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120}$
C6	3C	LDAB	#	\$ 3C	pointer 5040

FPPSIN (suite)

```

86 C3          LDA A #BC9
8D 885B       JSR      FPPDSV  Transfert de 5040
86 CF          LDA A # 8CF      pointer x²
C6 D2         LDA B # 8D2
8D 897A       JSR      FPPMUL : calcul de x⁴
C6 C3         LDA B # 8C3
8D 8845       JSR      FPPDIV  calcul de  $\frac{x^4}{5040}$ 
86 C6         LDA A # 8C6
C6 CF         LDAB # 8CF      pointer  $\frac{x^4}{5040}$ 
8D 887D       JSR      FPPSUB :
39           RTS          calcul de  $x - \frac{x^3}{6} + \frac{x^5}{120} - \frac{x^7}{5040}$ 
                    résultat dans C6

```

sous programme de calcul de: $\sin(\pi(TL-TI)/(TL-TC))$

FPPSPA1

```

C6 5D         LDA B # 85B      pointer TC
86 E1         LDA A # 8E1
8D 885B       JSR      FPPCPY
C6 5A         LDAB # 85A      pointer TL
86 E4         LDAA # 8E4
8D 885B       JSR      FPPCPY
C6 E1         LDAB # 8E1
8D 887D       JSR      FPPSUB  calcul de TL-TC
C6 5A         LDAB # 85A      pointer TL
86 E1         LDAA # 8E1
8D 885B       JSR      FPPCPY
D6 40         LDAB # 40      pointer TI
8D 887D       JSR      FPPSUB  calcul de TL-TI
C6 E4         LDAB # 8E4      pointer TL-TC
8D 8845       JSR      FPPDIV
C6 1B         LDAB # 81B      pointer n
86 E4         LDAA # 8E4
8D 885B       JSR      FPPCPY
C6 E1         LDAB # 8E1
8D 897A       JSR      FPPMUL : calcul de n.  $\frac{TL-TI}{TL-TC}$ 
97 3F         STA A # 3F
8D 8845       JSR      FPPSIN : calcul de  $\sin\left(\pi \frac{TL-TI}{TL-TC}\right) \rightarrow C6$ 
39           RTS

```

SOUS PROGRAMME DE CALCUL DE : $RN_i = (Ti - (TC+TL)/2) * 2$

FPPSPBI

C6 3A	LDAB # \$5A	pointer TL
86 E7	LDA A # \$E7	
BD 885B	JSR FPPCPY	
C6 5D	LDAB # \$5D	pointer TC
86 EA	LDA A # \$EA	
BD 885B	JSR FPPCPY	
C6 E7	LDAB # \$E7	
BD 88D5	JSR FPPADD : calcul de TC + TL.	
CE 00EA	LDX # \$EA	
6A 02	DEC 2,X	décroître (TC+TL) → (TC+TL)/2
D6 40	LDAB \$40	pointer T _i
86 EA	LDA A # \$EA	
BD 887D	JSR FPPSUB : calcul de $(TL+TC)/2 - Ti$	
C6 EA	LDAB # \$EA	
BD 897A	JSR FPPMUL : calcul de $(Ti - (TL+TC)/2) * 2$	
C6 49	LDAB # \$49	pointer Ri
86 EA	LDA A # \$EA	
BD 897A	JSR FPPMUL : calcul de Ri	
39	RTS	

Résultat dans EA.

SOUS PROGRAMME DE CALCUL DE : $A \cdot B - C \cdot D$

FPPSP(AB-CD)

86 DB	LDA A # \$DE	pointer C
C6 DE	LDAB # \$DE	pointer D
BD 897A	JSR FPPMUL	calcul de C*D
86 D5	LDA A # \$D5	pointer A
C6 D8	LDAB # \$D8	pointer B
BD 897A	JSR FPPMUL	calcul de A*B
C6 DB	LDAB # \$DB	
BD 887D	JSR FPPSUB	calcul de $(A \cdot B - C \cdot D)$
RTS	RTS	

Résultat dans D5

SOLUS PROGRAMME DE CALCUL DE : $G_X = (E-X)\sin(X-C) - (D-X)\sin(X-B)$

FPPSPGX

C6	98	LDAB	# \$ 99	pointer C
86	B4	LDA A	# \$ B4	
BD	885B	JSR	FPPCPY	
C6	A5	LDAB	# \$ A5	pointer X=(A1+A2)/2
86	B1	LDA A	# \$ B1	
BD	885B	JSR	FPPCPY	
C6	B4	LDAB	# \$ B4	
BD	887D	JSR	FPPSUB	calcul de (X-C)
97	3F	STAA	\$ 3F	
BD	8845	JSR	FPPSIN	calcul de SIN(X-C)
C6	A5	LDAB	# \$ A5	pointer X
86	B4	LDA A	# \$ B4	
BD	885B	JSR	FPPCPY	
C6	93	LDAB	# \$ 93	pointer E
86	B1	LDA A	# \$ B1	
BD	885B	JSR	FPPCPY	
C6	B4	LDAB	# \$ B4	
BD	887D	JSR	FPPSUB	Calcul de (E-X)
C6	C6	LDAB	# \$ C6	
BD	897A	JSR	FPPMUL	Calcul de (E-X) sin(X-C)
C6	9C	LDAB	# \$ 9C	pointer B
86	B7	LDA A	# \$ B7	
BD	885B	JSR	FPPCPY	
C6	A5	LDAB	# \$ A5	pointer X
86	B4	LDA A	# \$ B4	
BD	885B	JSR	FPPCPY	
C6	B7	LDAB	# \$ B7	
BD	887D	JSR	FPPSUB	calcul de (X-B)
97	3F	STAA	\$ 3F	
BD	8845	JSR	FPPSIN	calcul de sin(X-B)
C6	A5	LDAB	# \$ A5	pointer X
86	B7	LDA A	# \$ B7	
BD	885B	JSR	FPPCPY	
C6	90	LDAB	# \$ 90	pointer D
86	B4	LDA A	# \$ B4	
BD	885B	JSR	FPPCPY	
C6	B7	LDAB	# \$ B7	
BD	887D	JSR	FPPSUB	calcul de (D-X)
C6	C6	LDAB	# \$ C6	
BD	897A	JSR	FPPMUL	calcul de (D-X) sin(X-B)
C6	B4	LDA A	# \$ B1	
86	B1	LDAB	# \$ B4	
BD	887D	JSR	FPPSUB	calcul de GX
39		RTS		

RESULTAT DANS B1

TABLEAU DES DONNEES

RAM	
ADRESSE	POSITION MEMOIRE
00	réservées pour
01	bibliothèques
11	mathématiques
10	
11	vide
15	40 SVG ^a
16	00 1
17	01
18	40 SVG
19	00 2
1A	02
1B	64 SVG
1C	87 π (PI)
1D	02
1E	60 SVG
1F	00 6
20	03
21	40 SVG
22	00 8
23	04

RAM	
ADRESSE	POSITION MEMOIRE
2A	60 SVG
2B	00 24
2C	05
2D	40 SVG
2E	00 32
2F	06
30	60 SVG
31	00 48
32	06
33	48 SVG
34	00 72
35	07
36	78 SVG
37	00 120
38	07
39	5A SVG
3A	00 720
3B	0A
3C	4E SVG
3D	C0 5040
3E	0D

RAM	
ADRESSE	POSITION MEMOIRE
3F	SVG. REC. ACCEPTER
40	
41	ALLIAGE
42	Reg. d'Index
43	SVG. REC. REC.
5A	TL
5D	TC
60	T1
63	T2
66	T3
69	T4
6C	T5
6F	T6
72	T7
75	T8
78	T9
7B	T10
7E	T11
81	RNS
84	RN4

^a D'UNE MANIÈRE

TABLEAU DES RESULTATS

RAM	
ADRESSE	POSITION MEMOIRE
8A	BS
8D	CS
90	TO
93	AS
96	DT
99	TSM
9C	TAM
9F	RA
A2	ALPHA
A5	AKA
A8	AN
AB	BN

PARAMETRES DE TS

PARAMETRES DE TA

PARAMETRES DE AN

- ANNEXE -

Existence et nombre de solution de l'équation $G(x) = 0$ dans le domaine $[A1, A2]$.

$$\text{posons : } A' = \frac{t_3 - t_L}{t_c - t_L} \pi \quad ; \quad B' = \frac{t_4 - t_L}{t_c - t_L} \pi$$

$$C' = \frac{T_3(t_3) - (bt_L + c)}{b} \times \frac{\pi}{t_c - t_L}$$

$$y = -\frac{\pi}{t_c - t_L} S_T + B'$$

$$D' = \frac{T_3(t_4) - (bt_L + c)}{b} \times \frac{\pi}{t_c - t_L}$$

Alors :

$$G(x) = 0, x \in [A1, A2] \Leftrightarrow \cotg y = \frac{1 - \cos(A' - B')}{\sin(A' - B')} + \frac{C' - D'}{\sin(A' - B')} \times \frac{1}{[D' - y + y]} ; y \in [B' - A', B']$$

$$\text{En posant } \alpha = \frac{1 - \cos(A' - B')}{\sin(A' - B')} ; \beta = \frac{C' - D'}{\sin(A' - B')} ; \gamma = D' - B'$$

L'équation du second membre de l'équivalence peut se mettre sous la forme :

$$\cotg(y) = f(y) \quad y \in [B' - A', B']$$

$$\text{avec } f(y) = \alpha + \beta \frac{1}{\gamma + y}$$

on vérifie que $\alpha < 0$; $\beta < 0$ et $\gamma < -B'$

Les solutions de l'équation $G(x) = 0$ dans l'intervalle $[A1, A2]$ correspondent aux points d'intersection des courbes $(y \rightarrow \cotg y)$ et $(y \rightarrow f(y))$;

La résolution graphique de $\cotg y = f(y)$ permet de constater les cas suivants :

1^{er} cas: $\beta < 0$
 $B' < -\gamma < \pi$ } \Rightarrow il existe au plus une solution dans l'intervalle $[B' - \pi, B']$

2^e cas: $\beta > 0$
 $B' < -\gamma < \pi$ } \Rightarrow il existe au plus deux solutions dans $[B' - \pi, B']$

3^e cas: $\beta < 0$
 $-\gamma > \pi$ } \Rightarrow il existe au plus une solution dans l'intervalle $[B' - \pi, B']$

4^e cas: $\beta > 0$
 $-\gamma > \pi$ } \Rightarrow au plus une solution dans $[B' - \pi, B']$

Ainsi dans tous les cas l'équation $\Theta(x) = 0$, admet au plus deux solutions dans $[A_1, A_2]$.

- BIBLIOGRAPHIE -

- A.ABDELLAOUI : Télédétection électromagnétique infrarouge
(rapport scientifique)
- F.BECKER : Farth Observations from space -MAY 78-
(Problématique de la télédétection e.m)
- M.DREYFUS : FORTRAN IV
{ DUNOD }
- D.GIROD : Au coeur des microprocesseurs
R.DUBOIS (EYROLLES)
- Cl.PARIOT : Introduction au microprocesseurs et au micro-ordinateur
(DUNOD)
- G.J.R.Soer : A mathematical model for the simulation of the daily
behaviour of crop surface temperature and actual eva-
potranspiration
(THE TERGRA MODEL)
- MC6800. Microprocessor.
Applications Manual
(MOTOROLA)