

36/82

Université des Sciences et de la Technologie
Houari BOUMEDIENE

1 ed

—oOo—

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE



SIMULATION D'UN REACTEUR NUCLEAIRE

PWR 900 MWe

Proposé et suivi par :

Mr H. TEDJINI : Dr Ingénieur

Mlle M. AMINI : Dr Ingénieur

Etudié par :

A. LARABI

M. EL MOALLEM

JUIN 82

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université des Sciences et de la Technologie
Houari BOUMEDIENE

—oOo—

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

INGENIORAT D'ETAT EN ELECTRONIQUE

SIMULATION D'UN REACTEUR NUCLEAIRE

PWR 900 MWe

Proposé et suivi par :

Mr H. TEDJINI : Dr Ingénieur

Mlle M. AMINI : Dr Ingénieur

Etudié par :

A. LARABI

M. EL MOALLEM

JUIN 82

-o- REMERCIEMENTS -o-

Nous tenons à remercier M. B SANSAL Responsable de la Division "5" pour nous avoir reçu dans sa Division.

Nous tenons aussi à remercier Mlle. AMINI ainsi que M. TEDJINI pour l'intérêt qu'ils ont prêté à notre travail et les conseils qu'ils nous ont prodigués.

Nous remercions M. TOUMI pour ses critiques et sa compréhension.

Nos remerciements vont aussi à M. ZEGOUR du C.E.R.I. ainsi que le groupe du Centre de Calcul et particulièrement à MM. BENDAIFALLAH et BADACHE.

Enfin, nous exprimons notre gratitude aux personnes qui ont participées à la réalisation matérielle de cette Thèse et plus particulièrement à :

Mlles. NACERA et FAZIA

MM. A. KOUFFA et N. LARABI

M. ABDELKADER le Directeur de l'E.M.C. pour nous avoir aidé avec beaucoup de compréhension et de gentillesse à résoudre le problème de frappe.

M. ALI-LARABI membre de l'A.P.C de DRARIA

M. B. MOKRANE Directeur d'Ecole (Oued Roumane)

M. LAAZIB et M. ABDI pour le tirage.

Que tous les professeurs qui ont contribué à notre formation trouvent ici notre profonde reconnaissance.

-o- DEDICACES -o-

- A la mémoire de mon grand-père
- A mes parents
- A tous mes frères et soeurs
- A ma fiancée, et sa famille
- A mon ami Mohamed
- A tous ceux qui me sont chers

AEDELKADER

- A la mémoire de mon père
- A ma mère
- A mes frères et soeurs
- A mes amis et en particulier Djamel

MOHAMED

-o- TABLE DES MATIERES -o-

INTRODUCTION

Chapitre I - PRESENTATION DE LA SIMULATION

- I - Généralités
- II - Rappels et définitions
- III - Notions d'état

Chapitre II - DESCRIPTION DU REACTEUR NUCLEAIRE A EAU PRESSURISE

- II- Description technique
- II - Régulation de la centrale

Chapitre III - - MODELE DU REACTEUR

- I - Modele neutronique
- I - 1- Rappels sur la neutronique
 - a- Fission
 - b- Réaction en chaine
 - c- Puissance neutronique
 - d- temps de vie et durée de vie moyenne d'un neutron
 - e- Notion sur la réactivité
 - f- Neutrons prompts et retardés.
- II- 2- EQUATIONS CINETIQUES
- II- - MODELE THERMIQUE
- III- - SIMPLIFICATION DU MODELE MATHEMATIQUE PROPOSE
- IV- - LINEARISATION DES EQUATIONS DU SYSTEME

Chapitre IV

ETUDE DU SYSTEME EN BOUCLE OUVERTE

- INTRODUCTION

- I - STABILITE DU SYSTEME
- II - DETERMINATION DE LA COMMANDE
- III - TRAITEMENT NUMERIQUE
- IV - RESULTATS SUR LES TRANSITOIRES
- V - ANALYSES DES COURBE
- VI - CONCLUSIONS PRATIQUES SUR LES DEUX METHODES DE CALCUL

INTRODUCTION

Le travail présenté est relatif à l'étude des systèmes à l'aide de la simulation numérique. Notre contribution a porté essentiellement sur la simulation d'un réacteur nucléaire P.W.R. (pressurized Water réactor).

La simulation numérique nécessite la représentation du système réel par un modèle mathématique établi à partir des lois de la physique. Ainsi le concepteur qui ne dispose pas de réacteur nucléaire peut mettre à profit cette technique de simulation pour étudier le comportement dynamique du réacteur.

Généralement avant de commander un système, il est nécessaire de faire une étude en boucle ouverte c'est à dire sans lui imposer de contre réaction externe. Ceci, dans le but d'appréhender le système pour différentes valeurs de ses états.

Notre étude se compose de deux parties:

Dans une première partie, la description générale du réacteur nucléaire P.W.R. nous sert à élaborer un modèle mathématique en vue de la réalisation d'un code de simulation numérique. Ce modèle ne donne pas une description assez fine du processus par contre il permet une appréhension globale de celui-ci.

Dans une 2eme partie, l'étude directe en boucle ouverte consiste à observer la réponse des états du réacteur à un échelon et une rampe de commande des barres de contrôle.

Ce mémoire comprend quatre chapitres.

Le premier chapitre définit la simulation ainsi que la représentation d'état d'un système.

Le deuxième chapitre présente la centrale nucléaire et donne un aperçu sur sa régulation.

Le troisième chapitre donne un modèle mathématique du primaire de la centrale et propose un modèle linéaire simplifié.

Le quatrième chapitre : propose 2 méthodes de résolution des équations différentielles linéaires.

- a - La méthode de CRANCK NICHOLSON
- b - La méthode de RANGE KUTPA.

Présente l'interprétation des résultats et la comparaison entre les 2 méthodes.

Enfin la conclusion fait la synthèse du travail présenté :

.../...

H A P I T R E I

PRESENTATION DE LA SIMULATION

I - G E N E R A L I T E S

II - R A P P E L S E T D E F I N I T I O N S

III - N O T I O N S D ' E T A T

PRESENTATION DE LA SIMULATION

I - GENERALITES

De nombreux problèmes posés par la technique moderne peuvent difficilement être appréhendés globalement par l'esprit humain ou résolus complètement par des méthodes mathématiques simples.

La simulation se présente alors comme un moyen efficace d'approche, de compréhension, voire même de résolution à ces problèmes.

L'utilisation de cette méthode de travail est sans cesse favorisée par le perfectionnement des outils de calcul analogique, numérique et hybride ainsi que par les progrès réalisés dans le domaine de la modélisation mathématique dont les équations sont résolues par une méthode de calcul appropriées.

Le phénomène simulé étant un phénomène physique dont nous possédons une certaine connaissance expérimentale et théorique.

La simulation sera élaborée à partir d'hypothèses issues de cette connaissance et la validité de cette simulation sera assurée lorsque les résultats pourront être confrontés, de façon satisfaisante avec ceux que nous fournit l'observation expérimentale du phénomène.

nous considérons alors que la simulation est capable, par interpolation, avec prudence par extrapolations, de représenter l'ensemble des comportements du phénomène étudié d'une manière générale, nous pouvons concevoir la simulation de deux manières différentes.

Les équations représentatives du phénomène ayant été introduite dans le calculateur, a un groupe de données correspondra un ensemble de résultats qui seront analysés à postériori.

- Après introduction dans le calculateur des équations et des données initiales au fur et à mesure que les résultats relatifs à un phénomène dépendant du temps nous sont communiqués, il nous est possible d'interagir avec le calculateur par modification de certains paramètres, comme dans la réalité, il est possible de modifier le comportement d'une installation ou d'une machine par des actions de pilotage, le deuxième type de simulation et dit (en temps réel).

UTILISATION DE LA SIMULATION COMME MOYEN DE FORMATION

La transmission de la connaissance relative à des phénomènes complexes est longue et délicate lorsqu'elle n'utilise qu'une analyse théorique de ces phénomènes.

L'apprentissage expérimental permet une meilleure appréhension du comportement des systèmes étudiés, et ainsi une compréhension plus rapide et plus profonde des phénomènes qui s'y produisent, cependant cet apprentissage n'est pas possible lorsqu'il met en cause des installations trop complexes où les interactions des multiples phénomènes qui s'y produisent interdisent l'analyse de chacun de ces phénomènes ou bien lorsque ces installations sont mauvaises, leur utilisations peut présenter des dangers (Avion, Centrale nucléaire).

- Aspect mathématique de la simulation

Le but des études de simulation est l'analyse de certains processus réels (naturel ou technologique) en faisant appels aux moyens mathématiques, ceci nécessite la formulation d'un modèle mathématique représentant le processus étudié et pour cela on doit passer par trois étapes :

- Elaboration des modèles mathématiques
- Vérification et résolutions des équations
- Instrument pour la génération de données.

- Choix du type de calculateur (analogique ou numérique)

Compte tenu du problème posé, notre choix serait le calculateur numérique et pour le langage choisit, c'est le langage FORTRAN qui a eu notre préférence, car c'est le langage le mieux adapté à la simulation sur l'ensemble des langages disponibles.

II - RAPPELS ET DEFINITIONS

1 - LES SYSTEMES

1-1 - I n t r o d u c t i o n

Les concepts de simulation, modèle et système, sont intrinsèquement liées, la simulation étant d'une façon générale une méthode pour étudier les systèmes, à l'aide de modèle schématiquement, on peut dire que la simulation est une manipulation de modèle, et le modèle, une représentation du système.

1 -2- DEFINITION D'UN SYSTEME

Il s'agit d'un ensemble composé de parties ordonnées, ces parties ont chacune leurs lois et une certaine indépendance; par contre le tout a ses lois propres, car il existe entre les parties des liens, des relations identifiables, au moins pour quelques-une d'entre elles, et qui s'enchainent souvent l'une de l'autre.

.../...

Un système n'existe pas seul dans le vide mais dans un milieu, il est souvent soumis à des contraintes, et pour atteindre le but voulu son fonctionnement doit être contrôlé.

De cette définition générale, on constate que plusieurs conditions doivent être réalisées pour avoir un système.

- La connaissance des composants
- La connaissance des lois propres de chacun
- La connaissance des lois d'interaction qui déterminent son but

2 - LES MODELES

2 - 1 - D é f i n i t i o n

La conception d'un modèle de système est fondamentalement la même.

C'est une représentation de système, réel ou imaginé, dans le but d'expliquer et de prédire certains aspects de son comportement, cette représentation n'est pas en tous points identique au système si elle l'était, le modèle serait sans intérêt, car il serait aussi simple de travailler directement sur le système.

En fait, le modèle est un système formel construit, c.à.d. une image plus ou moins fidèle du système réel.

Cette différence tient à plusieurs causes, les lois que suit un système, peuvent ne pas être toutes connues, par ailleurs, dans la pratique, même pour celles qui sont connues, on ne sait pas encore toutes les exprimer, en suite le modèle peut ne reproduire que les composants et les relations du système nécessaires au but poursuivi.

Un même système peut être représenté par différents modèles qui ont chacun un but particulier, un modèle n'est donc ni vrai, ni faux, sa valeur se juge à la contribution qu'il apporte dans l'explication du système représenté, c'est un outil de travail permettant l'étude des phénomènes complexes.

Si le système n'est pas réel, le modèle joue le même rôle de simplification et de substitutions, dans ce cas, la distinction entre le système imaginé et son modèle est moins importante, en ce sens que le modèle peut représenter la plupart des aspects du système.

D'ailleurs, le système peut être conçu d'une façon suffisamment simple, pour être incorporé en totalité dans un modèle, dont le rôle est surtout de découvrir toutes les implications des données.

Le modèle est construit pour découvrir les résultats obtenus; dans différentes hypothèses, en un mot pour être manipulé.

3 - NOTION D' ETAT

- Paramétrisation des relations entrées sorties

On sait que les propriétés d'un processus physique P dépendent d'un certain nombre de grandeurs $q_1 \dots q_r$ liées par un ensemble de relations, si parmi ces grandeurs, dites terminales on distingue des grandeurs $u_1 u_2 \dots u_m$ dites d'entrées et des grandeurs $y_1 \dots y_p$ dites de sortie (ce qui revient à dire que l'on a affaire à un processus orienté), le processus peut être défini par des relations de la forme.

$$\begin{matrix} g: & \left\{ \begin{matrix} u_1, u_2 \dots \dots \dots u_m, y_1 \dots \dots y_p \\ g_k & \left(\begin{matrix} u_1 & \dots \dots \dots u_m, y_1 \dots \dots y_p \end{matrix} \right) = 0 \end{matrix} \right. \end{matrix}$$

ou globalement

$$g (u, y) = 0 \quad (1)$$

Ces relations qui sont dites " relations entrées-sorties " du processus P, sont fréquemment utilisées dans l'étude " classique " des systèmes asservis linéaires, soit sous forme d'équations différentielles.

$$f (y \dot{y} \dots \dots y^{(n)}, u, \dot{u} \dots \dots u^{(m)}) = 0 \quad (2)$$

soit sous forme de fonction de transfert.

$$Y (p) = F (p) . U (p) \quad (3)$$

Ces relations devraient permettre de déterminer d'une manière univoque le comportement du système sur tout intervalle (tot 1) connaissant les commandes appliquées $u (tot 1)$.

On sait toutefois qu'il n'en n'est pas ainsi et que, pour un système défini par (2) par exemple et pour une entrée $u (tot 1)$ donnée, on peut associer une infinité de trajectoires de sorties selon les conditions initiales prévalent au moment de l'application de la commande.

Il importe donc , pour assurer l'unicité indispensable des relations causales $u \rightarrow y$ d'adjoindre aux équations causales précédentes un ensemble de paramètres $x (to)$ que l'on appellera " vecteur d'état " du processus a l'instant to . donc on a

$$y (tot) = A (x (to) . U (tot)) \quad (4 ')$$

Bien évidemment , de plus, le vecteur d'état $X (to)$ qui résume tout le passé à l'instant to évolue lui aussi avec le temps selon une équation analogue à l'équation (4)

$$X (t) = X (X (to) . U (tot))$$

.../...

2 - FORME DE L'EQUATION D'ETAT

Dans le cas des systèmes dynamiques, où X est de dimension finie on a la forme suivante

$$\dot{X} = f (X (t), U (t), t) \quad (4)$$

et parallèlement on a

$$Y = h (X (t), U (t), t)$$

L'équation (4) représentant un système différentiel vectoriel du premier ordre f étant une fonction continue satisfaisante des conditions de lipshitz et h est une fonction univoque.

Toutes les conditions mentionnées lors de la définition de l'état sont en effet satisfaites.

Si le système est linéaire, si f et h sont linéaires en U et X les équations précédentes se mettent sous la forme suivante:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= A X + B U \\ Y &= C X + D U \end{aligned} \quad (5)$$

- Remarques

- 1 - Si le vecteur d'état X est de dimension n, si le système a m entrées U et p sorties Y, les matrices et vecteurs figurant dans l'équations (5) sont de dimensions respectives :


$$\begin{array}{llll} A : n_n & B : n_m & C : p_n & D : p_m \\ X : n_1 & U : m_1 & Y : p_1 & \end{array}$$

- 2 - La linéarité n'implique pas la stationnarité, dans le cas le plus général de système variant les matrices A....D peuvent dépendre du temps.

Dans le cas des systèmes invariants (défini par exemple par une équation différentielle à coefficients constants ou par une fonction de transfert) les matrices A....D sont des matrices constantes.

Une équation d'état définie par (4) se présente comme un système différentiel du premier ordre, si par conséquent on peut mettre un système donné sous une forme qui ne fait apparaître que des blocs du 1er ordre, on aura immédiatement une représentation d'état en prenant simplement comme variables les sorties de ces blocs.

...../...

 H A P I T R E II

 DESCRIPION DU REACTEUR NUCLEAIRE A EAU PRESSURISE

- I - DESCRIPTION TECHNIQUE
- II - REGULATION DE LA CENTRALE



Chapitre II

Description du réacteur nucléaire à eau pressurisé.

I - DESCRIPTION TECHNIQUE

Les réacteurs nucléaires P.W.R. (Pressurized Water Réactor) appartiennent à la filière eau ordinaire à cycle indirect.

Le schéma de principe d'une centrale P.W.R. est donné par la fig 1.

La centrale est constituée de 2 boucles primaires et secondaire la boucle primaire contient le coeur où se trouve le combustible qui est généralement de l'uranium, un pressuriseur pour maintenir la pression du modérateur constante 155 bars, d'une pompe primaire pour faire circuler le fluide caloporteur, dont le rôle est d'évacuer la chaleur fournie par le combustible vers le générateur de vapeur et du primaire du générateur de vapeur.

Le modérateur dans ce type de réacteur sert ainsi de fluide caloporteur et les éléments combustibles se présentent sous forme de pastilles empilées dans des crayons cylindriques.

La boucle secondaire est constituée du secondaire du générateur de vapeur, de la turbine qui fait tourner un alternateur, d'un condenseur, d'une pompe secondaire qui sert à renvoyer l'eau du condenseur vers le générateur de vapeur.

II - REGULATION DE LA CENTRALE

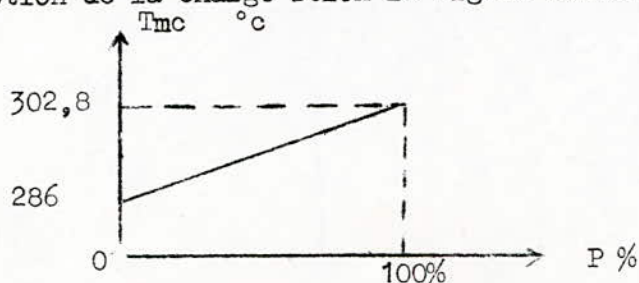
Le rôle du système de régulation de la centrale est d'ajuster la puissance fournie par la chaudière nucléaire à la puissance demandée par le groupe turbo-alternateur (puissance électrique).

Comme il existe une relation biunivoque entre la température primaire et puissance nucléaire, la régulation de la température se fera par l'intermédiaire des barres de contrôles.

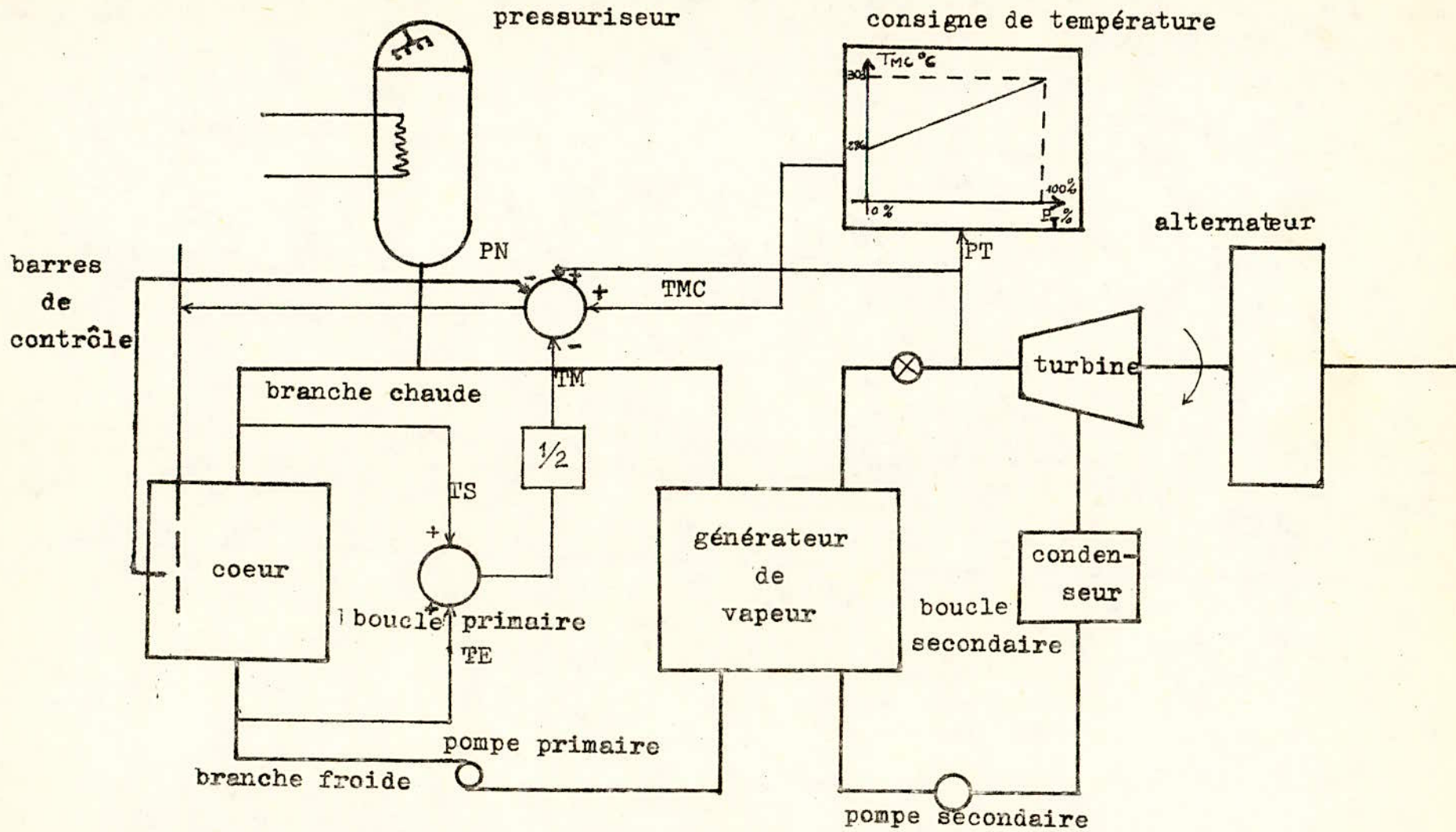
A cet effet, il suffit d'agir sur la position des barres de contrôle qui produit une variation de la réactivité qui agit directement sur le système et également la puissance nucléaire.

Donc un système de régulation est nécessaire pour asservir la puissance nucléaire à la puissance du réseau.

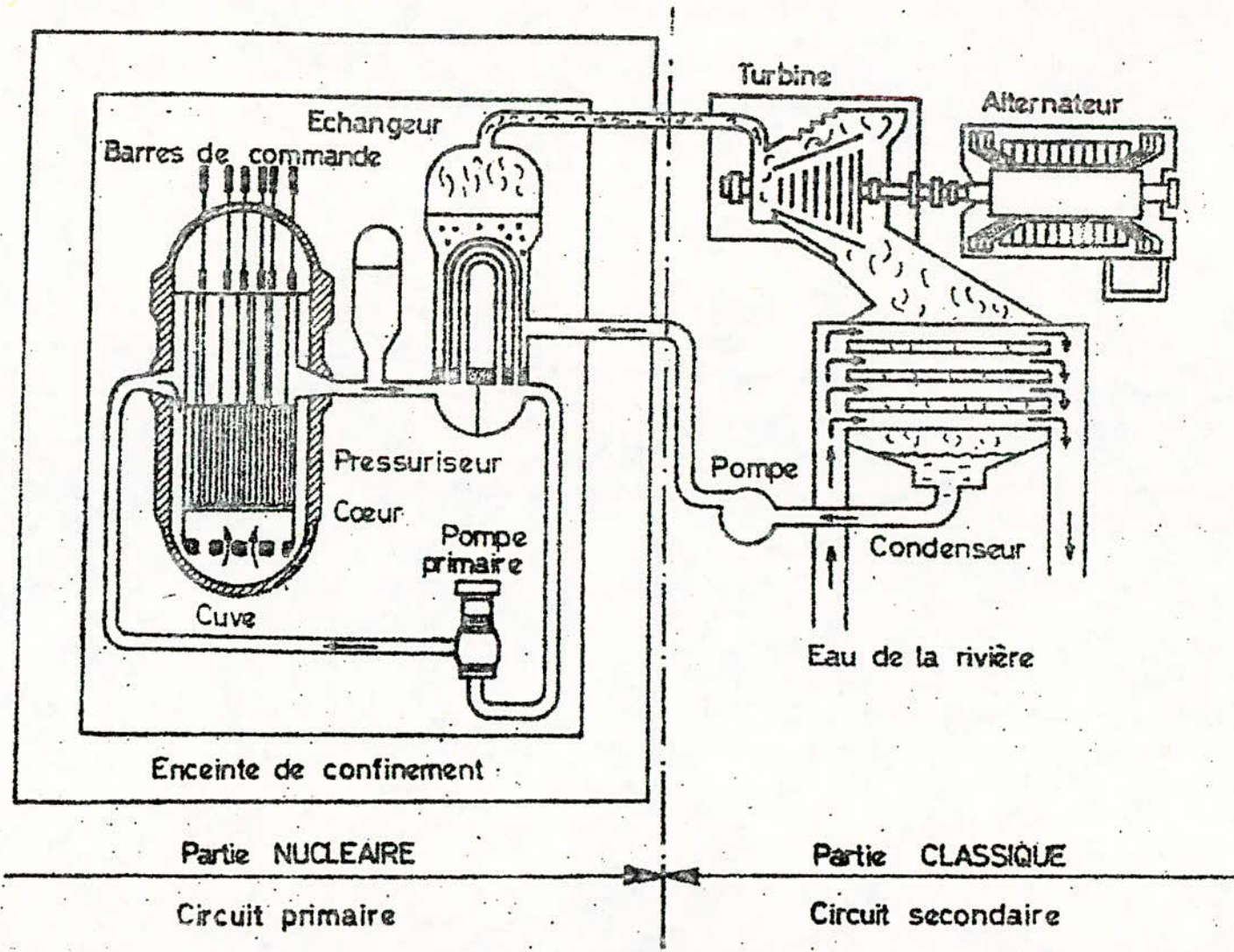
Le dispositif de régulation est prévu pour ajuster la température du modérateur à une température de consigne variable en fonction de la charge selon la figure suivante.



-o- Fig 1: SCHEMA SYNOPTIQUE D'UN REACTEUR NUCLEAIRE -o-



7



SCHEMA DE PRINCIPE D'UNE TRANCHE NUCLEAIRE P.W.R 900

CHAPITRE III

MODELE DU REACTEUR

I - MODELE NEUTRONIQUE

I - 1 - Rappels sur la neutronique

Les équations cinétiques, fondamentales pour l'étude du réacteur en fonctionnement, peuvent être introduites simplement à partir du phénomène de la fission nucléaire.

a - La fission

Le phénomène de la fission peut être décrit simplement de la manière suivante :

Quand un neutron est absorbé par un noyau fissile (U 235 par ex) ce dernier se transforme en noyau instable qui se scinde en deux noyaux avec émission de 2 à 3 neutrons avec dégagement d'une énergie très importante (200 Mev environ).

Ce type d'interaction particulière neutron - noyau est appelé réaction de fission.

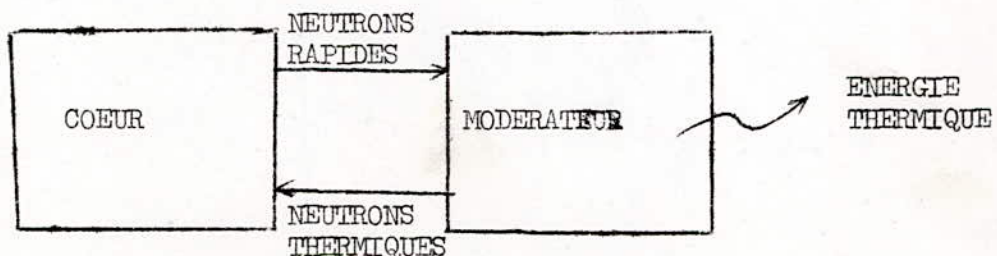
b - Réaction en chaîne

Les neutrons émis au moment de la fission se situent dans une bande d'énergie centrée sur 2 Mev.

Le niveau d'énergie moyen des noyaux de la matière à une température de 20° c se situe autour de 0,025 eV, c'est pour cela que ces neutrons sont appelés neutrons thermiques, à ce niveau d'énergie la probabilité d'être absorbée par un noyau d'U 235 est très grande.

Donc si au moins un neutron émis au cours de la fission, en perdant de l'énergie, arrive à devenir un neutron thermique il pourra provoquer une nouvelle fission d'un noyau d'uranium 235 et le cycle recommence.

C'est pour cela que cette réaction est appelée réaction en chaîne fig b.



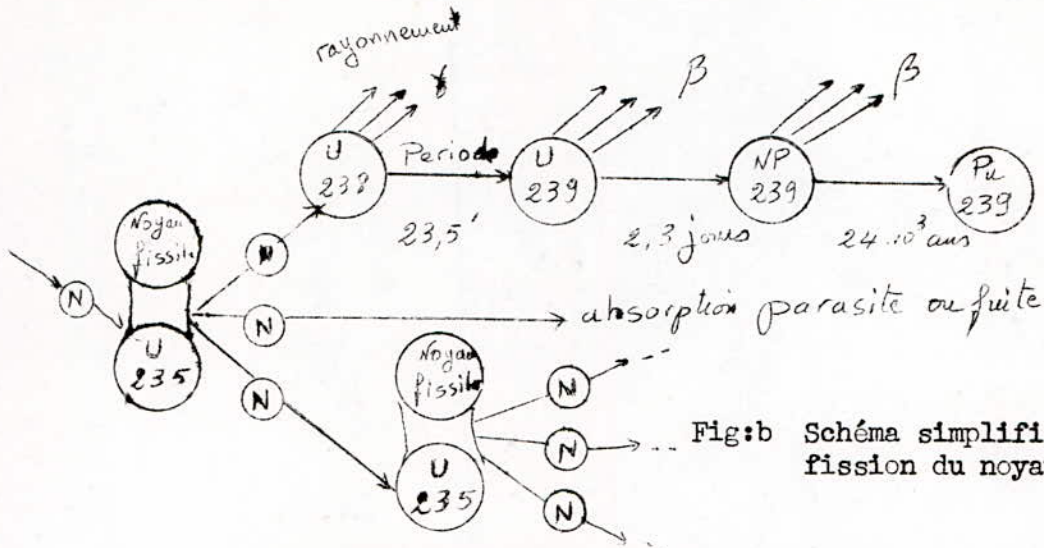


Fig: b Schéma simplifié de la fission du noyau U_{235}

Finallement le modérateur à un double role, il maintient la réaction en chaine en ralentissant les neutrons c.a.d. les transforme en neutrons thermiques, et transforme l'energie nucléaire en energie thermique.

c - Puissance neutronique

La fission d'un atome d'uranium (235) libère en moyenne une energie de 200 Mev ou de $3,2 \cdot 10^{-11}$ joules.

La fission de tous les noyaux des atomes contenus dans 1 g d'uranium 235 , en 24 heures, correspond à une puissance libérée de $0,97 \cdot 10^6$ W soit ≈ 1 Mw.

Cette puissance est appelée puissance neutronique.

Elle est proportionnelle au nombre de fissions, donc au nombre de neutrons présentés dans le coeur.

d - Temps de vie et durée de vie moyenne d'un neutron

Le temps moyen qui sépare 2 générations de neutrons dans le cas d'un milieu infini est par définition le temps de vie moyen des neutrons de ce milieu.

La durée de vie moyenne d'un neutron, dans le cas d'un milieu multiplicateur de dimension finie, est le temps θ qui s'écoule en moyenne entre sa naissance par fission et sa disparition donnant lieu à une nouvelle fission.

L'ordre de grandeur de la vie moyenne d'un neutron dans le cas :

- d'un réacteur à uranium naturel eau lourde est de 10^{-3} s.
- d'un réacteur à uranium enrichi en eau légère est de 10^{-4} à 10^{-5} s.

.../...

e - Notions sur la réactivité

Le nombre de neutrons varie d'une génération à l'autre après que le phénomène de fission ait eu lieu.

Un facteur de multiplication K peut être défini comme le rapport du nombre de neutrons d'une génération, au nombre de neutrons de la génération précédente.

Le facteur de multiplication permet de dire dans quel sens évolue la réaction en chaîne.

On distingue trois cas:

- Etat sous critique : $0 < K < 1$

de génération en génération, le nombre de neutrons diminue: la réaction s'arrête.

- Etat critique : $K = 1$

Le nombre de neutrons reste constant : la réaction en chaîne est stable.

- Etat sur critique : $K > 1$

Le nombre de neutrons ne cesse de croître : la réaction en chaîne diverge.

On définit la réactivité ρ par la formule suivante :

$$\rho = \frac{K - 1}{K}$$

durant le fonctionnement normal d'un réacteur, le facteur K est voisin de 1, d'où :

$$\rho \approx K - 1$$

L'unité utilisée pour la réactivité est le pcm (pour cent mille)

f - Neutrons prompts - Neutrons retardés :

Les neutrons libérés à chaque fission sont classés en neutrons prompts et neutrons retardés.

La plupart des neutrons ($\sim 99\%$) sont émis instantanément au moment de la fission : on les appelle neutrons prompts.

Le reste ($\sim 1\%$) des neutrons est émis après un retard pouvant atteindre plusieurs dizaines de secondes, ce sont des neutrons retardés émis lors de la désintégration des produits de fission obtenus.

.../...

On définit le facteur β comme la fraction des neutrons retardés par rapport à tous les neutrons émis.

pour l'uranium 235 $\beta = 0.065 = 650 \text{ pcm}$.

en classe généralement en six catégories les différents types de noyaux radioactifs issus de la fission, appelés noyaux précurseurs, parceque chacun de ces noyaux, en se désintégrant, est à l'origine de l'émission d'un neutron retardé.

Chaque groupe de neutrons ratardés est caractérisé par :

$$\beta_i = \frac{\text{Fraction emise à partir des noyaux précurseurs " i "}}{\text{fraction totale}}$$

on a donc :

$$\sum_{i=1}^6 \beta_i = \beta$$

1 - 2 EQUATIONS CINÉTIQUES

Soit θ la durée de vie moyenne d'une génération de neutrons prompts et " N " le nombre de neutrons de la génération à l'instant t, la nouvelle génération sera caractérisée, après un temps θ , par

$$K N (t) (1 - \beta) \quad \text{neutrons prompts}$$

en posant :

λ_i : probabilité de désintégration des noyeux précurseurs "i"
 $C_i (t)$: nombre de noyaux précurseurs "i" à l'instant "t".

$\sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i (t) \theta$: nombre de noyaux précurseurs qui se sont désintégrés pendant le temps θ = nombre de neutrons retardés apparus pendant θ .

$K N (t) \beta_i$: nombre de noyaux précurseurs "i" apparus lors des désintégrations des noyaux fissiles, pendant le temps θ .

D'où les équations suivantes :

$$N (t+\theta) = \underbrace{K \cdot N (t) (1 - \beta)}_{\text{Neutrons prompts}} + \underbrace{\sum_{i=1}^6 C_i (t) \cdot \theta \cdot \lambda_i}_{\text{neutrons retardés}}$$

$$C_i(t+\theta) = C_i(t) - \lambda_i C_i(t) \cdot \theta + N(t) \cdot K \cdot \beta_i \quad i = 1, \dots, 6$$

en rappelant que $\rho = K - 1$

et en faisant l'approximation $K(1 - \beta) = K - \beta$

car K est voisin de 1 et $\beta \ll 1$, on a :

$$N(t+\theta) - N(t) = (\rho - \beta) N(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) \cdot \theta$$

$$C_i(t+\theta) - C_i(t) = N(t) \cdot \beta_i - \lambda_i C_i(t) \cdot \theta \quad i=1, \dots, 6$$

et en passant à la limite

$$\frac{dN}{dt} = \left(\frac{\rho - \beta}{\theta} \right) \cdot N(t) + \sum_{i=1}^6 C_i(t) \cdot \lambda_i \quad (1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{N}{\theta} \beta_i - \lambda_i C_i \quad i = 1, \dots, 6 \quad (2)$$

Ces équations décrivent l'évolution du nombre de neutrons (donc de la puissance) moyenne sur le coeur du réacteur nucléaire.

A ces équations vient s'ajouter une 3ème équation définissant la réactivité ρ dont les principales variations sont :

- Le mouvement des barres de controles, dont le role est précisément d'agir sur la réactivité.

- L'effet de température agit sur la réactivité, à savoir que lorsque le niveau de température augmente dans le coeur la réactivité diminue en général.

Parmi les autres réactions internes du coeur, on retient seulement l'échauffement du combustible (effet DOPPLER) et l'échauffement du modérateur (effet de température).

Compte tenu des équations (1) et (2), et du fait que la puissance nucléaire est proportionnelle à la densité neutronique les équations cinétiques retenus sont :

$$\frac{dP_n}{dt} = \left(\frac{\rho - \beta}{\theta} \right) P_n + \sum_{i=1}^6 C_i \cdot \lambda_i$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\theta} P_n - \lambda_i C_i \quad i = 1, \dots, 6$$

.../...

et la réactivité totale est :

$$\rho = \rho_B - \alpha_u (T_u - T_{uo}) - \alpha_m (T_m - T_{mo})$$

ρ_B = réactivité des barres de contrôle.

α_u = Coefficient DOPPLER.

T_u = Température d'uranium (combustible).

T_{uo} = Valeur nominale de la température du combustible

α_m = Coefficient modérateur.

T_m = Température du modérateur

T_{mo} = Valeur nominale de la température du modérateur.

II - MODELE THERMIQUE

L'énergie générée au sein du crayon combustible migre à travers celui-ci, cette énergie est transmise au modérateur par l'intermédiaire de la gaine.

Les différents éléments du coeur sont caractérisés par leur chaleur massique (C), leur masse M et leur température moyenne T.

Les températures d'entrées et de sorties du fluide caloporteur sont respectivement T_e , T_s et le débit de l'eau dans le coeur est Q_m .

Les échanges de chaleur entre deux zones (1) dont la température est T_1 et (2) dont la température est T_2 séparées par une surface S_{12} sont proportionnelles à la différence de température ($T_1 - T_2$) et le facteur de proportionnalité étant l'admittance thermique globale $1/R_{12}$ où R_{12} est la résistance thermique entre la zone (1) et (2).

La variation de l'énergie d'un milieu = énergie produite
- transfert

On peut en déduire que le transfert thermique dans le coeur est caractérisé par la variation de l'énergie dans le combustible, puis la variation de l'énergie dans la gaine et enfin la variation de l'énergie dans le modérateur.

- La variation de l'énergie dans le combustible est égale à l'énergie nucléaire générée par les fissions au sein de l'uranium diminuée de l'énergie transmise par conduction à la gaine qui l'entoure.

D'où :

$$M_u C_u \frac{dT_u}{dt} = K \cdot P_n - \frac{1}{R_{ug}} (T_u - T_g)$$

K = facteur de conversion (Watt - calorie)

P_n = puissance nucléaire dans le coeur.

R_{ug} = Résistance thermique (uranium - gaine)

M_u = Masse de l'uranium.

C_u = Chaleur massique de l'uranium.

T_g = Température de la gaine

- La variation de l'énergie dans la gaine est égale à l'énergie cédée par le combustible à la gaine diminuée de l'énergie transmise par convection au modérateur.

On entend par convection la propagation d'énergie véhiculée par un fluide quelconque.

D'où :

$$M_u \cdot C_u \frac{dT_u}{dt} = \frac{1}{R_{ug}} (T_u - T_g) - \frac{1}{R_{gm}} (T_g - T_m)$$

R_{gm} = résistance thermique (gaine - modérateur).

- La variation de l'énergie dans le modérateur est égale à l'énergie que lui a cédée la gaine diminuée de l'énergie transmise au circuit primaire.

D'où :

$$M_m \cdot C_m \frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{R_{gm}} (T_g - T_m) - C_m Q_m (T_s - T_e)$$

On fait l'hypothèse que la température de l'eau croît linéairement dans le coeur quelque soit la cinétique on déduit que la température moyenne du modérateur est à tout instant égale à :

$$T_m = \frac{T_s + T_e}{2}$$

L'expérience montre que la variation de T_e est négligeable, on la supposera constante.

Finalement la thermique du coeur est régie par les trois équations suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} M_u \cdot C_u \frac{dT_u}{dt} = K P_n - K_{ug} (T_u - T_g) \quad (3) \\ M_g \cdot C_g \frac{dT_g}{dt} = K_{ug} (T_u - T_g) - K_{gm} (T_g - T_m) \quad (4) \\ M_m \cdot C_m \frac{dT_m}{dt} = K_{gm} (T_g - T_m) - Q_m C_m (T_s - T_e) \quad (5) \end{array} \right.$$

avec $T_m = \frac{T_s + T_e}{2}$

Où $K_{ug} = 1/R_{ug}$

$K_{gm} = 1/R_{gm}$

On remarque que la masse de la gaine est négligeable devant celle de l'uranium et du fluide primaire dans le coeur ce qui revient à négliger les constantes de temps liées aux échanges (combustible - gaine) devant les constantes de temps des transitoires que l'on va étudier.

D'où $K_{ug} (T_u - T_g) - K_{gm} (T_g - T_m) = 0$

Où on peut déterminer T_g en fonction de T_u et de T_m .

$$T_g = \frac{K_{ug}}{K_{ug} + K_{gm}} T_u + \frac{K_{gm}}{K_{gm} + K_{ug}} T_m$$

Et en remplaçant T_g par sa valeur dans (3) et (5) on aura :

$$M_u.C_u \frac{dT_u}{dt} = K.P_n - K_{um} (T_u - T_m)$$

$$M_m.C_m \frac{dT_m}{dt} = K_{um} (T_u - T_m) - C_m Q_m (T_s - T_e)$$

$$T_s = 2 T_m - T_e$$

$$K_{um} = \frac{K_{ug}.K_{gm}}{K_{ug} + K_{gm}} \quad \text{Représente le coefficient de transmission global du combustible vers le fluide primaire.}$$

Le modèle thermique devient en remplaçant T_s par sa valeur comme suit;

$$M_u.C_u \frac{dT_u}{dt} = K.P_n - K_{um} (T_u - T_m)$$

$$M_m.C_m \frac{dT_m}{dt} = K_{um} (T_u - T_m) - 2 Q_m C_m (T_m - T_e)$$

D'où le modèle du réacteur retenu est :

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dP_n}{dt} &= \frac{(\rho - \beta)}{\theta} P_n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{\beta_i}{\theta} P_n - \lambda_i C_i \quad i = 1, \dots, 6 \\ M_u.C_u \frac{dT_u}{dt} &= K P_n - K_{um} (T_u - T_m) \\ M_m.C_m \frac{dT_m}{dt} &= K_{um} (T_u - T_m) - 2 Q_m C_m (T_m - T_e) \\ T_m &= \frac{T_e + T_s}{2} \\ \rho &= \rho_0 - \alpha_u (T_u - T_{u0}) - \alpha_m (T_m - T_{m0}) \end{aligned} \right.$$

.../...

III - SIMPLIFICATION DU MODELE MATHEMATIQUE PROPOSE

Le modèle mathématique présenté dans le paragraphe précédent peut être simplifié en remarquant d'une part que l'on peut utiliser les équations cinétiques à 2 groupe de neutrons retardés dont l'un réunissant les précurseurs à désintégration lente, l'autre les précurseurs à désintégration rapide. ce qui diminue de 4 le nombre d'équations du système.

- Approximation à 2 groupes de neutrons retardés :
considérons le tableau suivant :

Groupe	β_i	λ_i	β_i/λ_i
1	0.00021	0.0124	0.01694
2	0.0014	0.00305	0.0459
3	0.00125	0.111	0.01126
4	0.00253	0.301	0.00841
5	0.00074	1.14	0.00065
6	0.00027	3.01	0.00009

Les constantes de désintégration sont calculées à l'aide des relations suivantes :

avec

$$\lambda_1 = \frac{\beta}{\sum_{i=1}^6 \beta_i/\lambda_i} \quad \beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$$

$$\text{et } \lambda_2 = \frac{\beta}{\sum_{i=4}^6 \beta_i/\lambda_i} \quad \beta_1 = \sum_{i=1}^3 \beta_i$$

$$\beta_2 = \sum_{i=4}^6 \beta_i$$

Donc les six groupes de neutrons retardés sont séparés en deux groupes d'où notre système simplifié est le suivant :

$$\frac{dP_n}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\Lambda} P_n + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i$$

$$\frac{dC_1}{dt} = \frac{\beta_1}{\Lambda} P_n - \lambda_1 C_1$$

$$\frac{dC_2}{dt} = \frac{\beta_2}{\Lambda} P_n - \lambda_2 C_2$$

$$M_u \cdot C_u \frac{dT_u}{dt} = K P_n - K_{um} (T_u - T_m)$$

$$M_m \cdot C_m \frac{dT_m}{dt} = K_{um} (T_u - T_m) - 2 C_m C_m (T_m - T_e)$$

IV - LINEARISATION DES EQUATIONS DU SYSTEME

On remarque que notre système n'est pas linéaire et que la non linéarité provient du produit $\rho \cdot P$.

Comme on a choisit de décrire notre système par la représentation d'état du type :

$$\dot{X} = A X + B U$$

La linéarisation du modèle retenu est nécessaire.

Pour la linéarisation d'un tel système on pose les hypothèses suivantes :

$$\delta P = P_n - P_o \Rightarrow P_n = P_o + \delta P.$$

$$\delta C_1 = C_1 - C_{1o} \Rightarrow C_1 = \delta C_1 + C_{1o}.$$

$$\delta C_2 = C_2 - C_{2o} \Rightarrow C_2 = \delta C_2 + C_{2o}.$$

$$\rho = \delta \rho + \rho_o$$

Où $P_o, C_{1o}, C_{2o}, \rho_o$ représentent respectivement les valeurs de la puissance et des précurseurs et de la réactivité pour lesquelles le système est à l'équilibre. (comme à l'équilibre $\rho_o = 0$)

Le système précédent devient :

$$\Rightarrow \delta \rho = \rho$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d \delta P_n}{dt} = \frac{\rho - \beta}{\theta} (\delta P_n + P_o) + \lambda_1 (\delta C_1 + C_{1o}) + \lambda_2 (\delta C_2 + C_{2o}) \\ \frac{d \delta C_1}{dt} = \frac{\beta_1}{\theta} (P_o + \delta P_n) - \lambda_1 (C_{1o} + \delta C_1) \\ \frac{d \delta C_2}{dt} = \frac{\beta_2}{\theta} (P_o + \delta P_n) - \lambda_2 (C_{2o} + \delta C_2) \end{array} \right.$$

En développant il vient :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d \delta P_n}{dt} = - \frac{\beta}{\theta} \delta P_n + \lambda_1 \delta C_1 + \lambda_2 \delta C_2 + \frac{\delta \rho \cdot P_n}{\theta} \\ \quad \quad \quad + \left(\left(\frac{\delta \rho - \beta}{\theta} \right) P_o + \lambda_1 C_{1o} + \lambda_2 C_{2o} \right) \\ \frac{d \delta C_1}{dt} = \frac{\beta_1}{\theta} \delta P_n - \lambda_1 \delta C_1 + \left(\frac{\beta_1}{\theta} P_o - \lambda_1 C_{1o} \right) \\ \frac{d \delta C_2}{dt} = \frac{\beta_2}{\theta} \delta P_n - \lambda_2 \delta C_2 + \left(\frac{\beta_2}{\theta} P_o - \lambda_2 C_{2o} \right) \end{array} \right.$$

En ce qui concerne les équations thermiques du coeur du réacteur elles sont linéaires du moment où on a supposé T_e constante et on pose :

$$\delta \theta_u = \theta_u - \theta_{u0}$$

$$\delta \theta_m = \theta_m - \theta_{m0}$$

$$\text{avec } \theta_u = \theta_u - \theta_{u0} \Rightarrow \theta_u = \theta_u + \theta_{u0}$$

$$\theta_m = \theta_m - \theta_{m0} \Rightarrow \theta_m = \theta_m + \theta_{m0}$$

d'où

$$M_u C_u \frac{d(\theta_u + \theta_{u0})}{dt} = K (P_0 + \delta P_0) - K_{um} (\theta_u + \theta_{u0} - \theta_m)$$

$$M_m C_m \frac{d(\theta_m + \theta_{m0})}{dt} = K_{um} (\theta_u + \theta_{u0} - \theta_m - \theta_{m0}) - 2Q_m C_m (\theta_m + \theta_{m0} - \theta_{u0})$$

en remplaçant θ_u par $\delta \theta_u + \theta_{u0}$

et θ_m par $\delta \theta_m + \theta_{m0}$ on aura :

$$M_u C_u \frac{d \delta \theta_u}{dt} = K (P_0 + \delta P_0) - K_{um} (\delta \theta_u + \theta_{u0}) + K_{um} (\delta \theta_m + \theta_{m0})$$

$$M_m C_m \frac{d \delta \theta_m}{dt} = K_{um} (\delta \theta_u + \theta_{u0} - \theta_m - \theta_{m0}) - 2Q_m C_m (\theta_m + \theta_{m0})$$

A l'équilibre on a :

$$\frac{dP}{dt} (P_0, C1_0, C2_0, \rho_0) = 0 \Rightarrow -\frac{\beta}{\theta} P_0 + \lambda_1 C1_0 + \lambda_2 C2_0 = 0$$

$$\frac{dC1}{dt} (P_0, C1_0, C2_0, \rho_0) = 0 \Rightarrow \frac{\beta_1}{\theta} P_0 - \lambda_1 C1_0 = 0$$

$$\frac{dC2}{dt} (P_0, C1_0, C2_0, \rho_0) = 0 \Rightarrow \frac{\beta_2}{\theta} P_0 - \lambda_2 C2_0 = 0$$

$$\frac{d\theta_u}{dt} (P_0, \theta_{u0}, \theta_{m0}) = 0 \Rightarrow K P_0 - K_{um} \theta_{u0} + K_{um} \theta_{m0} = 0$$

$$\frac{d\theta_m}{dt} (P_0, \theta_{u0}, \theta_{m0}) = 0 \Rightarrow K_{um} (\theta_{u0} - \theta_{m0}) - 2Q_m C_m \theta_{m0} = 0$$

Et en remplaçant δP_0 par $\delta P_0 - \alpha_u \delta \theta_u - \alpha_m \delta \theta_m$

on aura le système final suivant :

$$\begin{pmatrix} \dot{\delta P_n} \\ \dot{\delta C1} \\ \dot{\delta C2} \\ \dot{\delta \Theta_u} \\ \dot{\delta \Theta_m} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \beta/\theta & \lambda_1 & \lambda_2 & -\alpha_u Po/\theta & -\alpha_m Po/\theta \\ \beta/\theta & -\lambda_1 & 0 & 0 & 0 \\ \beta/\theta & 0 & -\lambda_2 & 0 & 0 \\ K/Mu C_n & 0 & 0 & -Kum/Mu Cu & Kum/Mu Cu \\ 0 & 0 & 0 & Kum/Mu C_m & -(Kum + 2C_m C_m) / M_m C_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta P_n \\ \delta C1 \\ \delta C2 \\ \delta \Theta_u \\ \delta \Theta_m \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} Po/\theta \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \delta/\beta$$

Où X est le vecteur d'état avec

$$X = \begin{pmatrix} \delta P_n \\ \delta C1 \\ \delta C2 \\ \delta \Theta_u \\ \delta \Theta_m \end{pmatrix}$$

Et U la commande avec $U = \delta/\beta$
 qui a la forme suivante

$$\dot{X} = A X + B U$$

Il suffit de remplacer tous les elements de la matrice A par leur valeurs numérique de même que les elements de la matrice B

$$A = \begin{pmatrix} -160 & 0,087 & 0,71 & -2025 & -20250 \\ 71,5 & -0,087 & 0 & 0 & 0 \\ 88,5 & 0 & -0,71 & 0 & 0 \\ 0,037 & 0 & 0 & -0,186 & 0,186 \\ 0 & 0 & 0 & 0,385 & -12,085 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 675 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

La commande U est la réactivité des barres de controle.

CHAPITRE IV

ETUDE DU SYSTEME EN BOUCLE OUVERTE

- INTRODUCTION
- I - STABILITE DU SYSTEME
- II - DETERMINATION DE LA COMMANDE
 - 1 - Echelon de commande de 10 %
 - 2 - Rampe de commande de 10 %
- III - TRAITEMENT NUMERIQUE
 - 1 - INTRODUCTION
 - 2 - Méthodes de résolution des systèmes d'équations différentielles
 - a - Méthode de CRANCK NICHOLSON
 - b - Méthode RANGE KUTTA
 - c - Organigrammes
- IV - Resultats sur les transitoires
- V - Analyse des courbes
 - a) Echelon de réactivité
 - b) Rampe de réactivité
- VI - conclusions pratiques sur les deux méthodes de calcul
 - a - CRANCK NICHOLSON
 - b - RANGE KUTTA
 - c - Comparaison entre les méthodes C.N. et R.K.

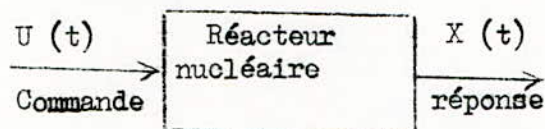
CHAPITRE IV

ETUDE DU SYSTEME EN BOUCLE OUVERTE

INTRODUCTION

Pour cette étude il s'agit de déterminer la fonction de commande qui amenera le système d'un état initial à l'état final souhaité.

Le système peut être présenté de la façon suivante :



Où $U (t)$ est la commande qui représente dans notre cas la variation de réactivité des barres de contrôle.

$X (t)$ la réponse du système

$$X (t) = \begin{pmatrix} \delta P_n \\ \delta C_1 \\ \delta C_2 \\ \delta Q_u \\ \delta Q_m \end{pmatrix}$$

Pour rester toujours dans le domaine de linéarité, il ne faut pas que les variations de charge dépassent + 10% de la puissance nucléaire.

Enfin pour voir l'évolution de notre système en tenant compte des considérations précédemment définie, on est amené à intégrer l'équation d'état suivante:

$$\dot{X} = A X + B U$$

Et pour cela on a prévu deux méthodes différentes

- CRANCK NICHOLSON
- RANGE KUTTA

.../...

I - STABILITE DU SYSTEME

Avant tout il faut étudier la stabilité du système c'est-à-dire déterminer les valeurs propres de la matrice A du système qui doivent être à partie réelles négatives pour que celui-ci soit stable. (λ)

$$A = \begin{pmatrix} -160 & 0,087 & 0,71 & -2025 & -20250 \\ 71,5 & -0,087 & 0 & 0 & 0 \\ 88,5 & 0 & -0,71 & 0 & 0 \\ 0,037 & 0 & 0 & -0,186 & 0,186 \\ 0 & 0 & 0 & 0,385 & -12,085 \end{pmatrix} \Rightarrow B = \begin{pmatrix} 675 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

- Les valeurs propres de cette matrice A sont à parties réelles négatives (voir annexe) donc notre système est stable.

Puisque nous étudions l'évolution du système pour une variation de + 10 % de la puissance, les valeurs correspondantes des précurseurs et de θ_u , θ_m sont calculées à partir des équations d'équilibre.

CALCUL DES C₁₀ :

$$\theta = 4 \cdot 10^{-5}$$

On a $P_n = 2700 \text{ Mw}$ à 100% de la puissance nucléaire

$$1^\circ) \frac{d C_1(t)}{dt} = \frac{\beta_1}{\theta} P_n - \lambda_1 C_1(t)$$

$$\text{A l'équilibre pour } \begin{cases} P_n = P_0 \\ C_1(t) = C_{10} \end{cases}$$

$$\frac{d C_1(t)}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{\beta_1 P_0}{\theta} - \lambda_1 C_{10} = 0 \Rightarrow$$

$$C_{10} = \frac{\beta_1 P_0}{\lambda_1 \theta} = 22,18 \cdot 10^5 \text{ Mw}$$

de la même manière on trouve

$$C_{20} = \frac{\beta_2 P_0}{\lambda_2 \theta} = 3,36 \cdot 10^5 \text{ Mw}$$

VALEUR DE T_{uo}, T_{mo}

$$\left. \begin{aligned} T_{uo} &= 700^\circ\text{c} \\ T_{mo} &= 302,8^\circ\text{c} \end{aligned} \right\} \text{ à 100\% de la puissance nucléaire.}$$

$$\theta_u = T_u - T_e = 700 - 284 = 527^\circ\text{c}$$

$$\theta_m = T_m - T_e = 302,8 - 284 = 18,8^\circ\text{c}$$

TABLEAU DES VARIATIONS DES VARIABLES D'ETATS

	Pn(Mw)	C1(Mw)	C2(Mw)	θu °c	θm °c
100%	2700	2218 10 ⁴	336 10 ³	527	17,649
90%	2430	1997 10 ³	302 994	464,3	15,88
	270	221800	33600	52,7	1,88

II - DÉTERMINATION DE LA COMMANDE

II - 1 - Echelon de commande + 10% de la puissance

La variation de charge correspond à un échelon de $\pm 10\%$ est déterminée à partir de la formule de réactivité globale.

$$\delta\rho = \delta\rho_B \pm \alpha_u \delta\theta_u \pm \alpha_m \delta\theta_m \quad (\text{selon l'échelon considéré})$$

à l'équilibre $\delta\rho = 0$

$$\delta\rho_B = \pm (\alpha_u \delta\theta_u + \alpha_m \delta\theta_m)$$

$$\delta\rho_B = \pm 214,5$$

En tenant compte de la réponse des différents éléments du système on peut prendre une rampe très raide, car généralement on ne trouve pas en pratique des échelons.

D'où l'équation de la rampe raide devient :

$$\delta\rho_B = U = \begin{cases} -214,5 & t = 0s \\ 0 & t = 5s \end{cases}$$

D'où

$$\delta\rho_B = \pm 42,9 t \pm 214,5$$

II - 2 - RAMPE DE + 10 % DE PUISSANCE

La variation de charge à un taux maximum de 5% /mm correspond aux besoins du réseau pour compenser les variations de charges journalière, cette vitesse ne doit pas provoquer la mise en service du système du contournement c'est-à-dire que la différence entre la température moyenne de sa valeur consigné ne doit pas dépasser 3°c pendant la réduction de puissance, cette pente correspond à la vitesse maximale autorisée.

- Détermination de l'équation de la rampe correspondante à une variation de charge de 5%/ mm.

Pour passer de 100% à 90% où de 90% à 100% avec un taux de 5%/mm il nous faut donc 2 mn (t = 120 s)

L'équation de la rampe sera

$$\delta \frac{P}{B} = U = \pm 1,7875 t \mp 214,5$$

.../...

III - TRAITEMENT NUMERIQUE

Il convient tout d'abord de rappeler que pour être de la plus grande utilité aux Ingénieurs, la solution des problèmes physiques régies par des équations différentielles doivent apparaître sous forme de graphiques représentant les variations des variables et de leurs dérivées par rapport à la variable indépendante, et ceci pour différentes valeurs des paramètres et des fonctions.

C'est-à-dire que la forme la plus directement utilisable par l'Ingénieur reste la famille des courbes continues tracées en fonction de la variable indépendante.

Or dans le calculateur numérique, toutes les variables dépendantes et indépendantes sont limitées à des valeurs discrètes.

De ce fait l'obtention de la famille des courbes recherchées par l'Ingénieur implique donc une interpolation des résultats numériques obtenus. Il est évident que chaque fois que le pas de calcul est petit plus le problème d'interpolation sera simple.

Il est bien évident que plus les valeurs successives de la variable indépendantes sont proches les unes des autres plus l'erreur introduite par le procédé de discrétisation est petite.

Donc il conviendra de choisir la méthode pratique de traitement d'un système donné sur calculateur arithmétique en tenant compte de la considération portant sur le temps de calcul, la précision et la facilité de programmation.

.../...

III - 2 - RESOLUTION NUMERIQUE DE L'EQUATION D'ETAT DU TYPE

$$\dot{X} = A X + B U$$

a - METHODE DE CRANCK NICHOLSON

La résolution du système d'équations différentielles linéaires par la méthode de CRANCK NICHOLSON et basée sur le développement en série de TAYLOR.

Considérons le système linéaire décrit par l'équation d'état.

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B U(t)$$

$$X(0) = X_0 \text{ état initial du système.}$$

Où $X(t) = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ est la solution du système à l'instant t

$U(t) = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ est le vecteur de commande à l'instant t .

$A(n,n)$ et $B(n,n)$ sont les matrices constantes du système .

Le développement en séries de TAYLOR est un développement infini, les différents termes du développement en séries devenant d'autant plus faible que leur ordre est plus élevé pour cette méthode le développement en séries à l'ordre deux est largement suffisant d'après des résultats pratiques qui vérifie qu'à partir de l'ordre trois les éléments sont négligeables.

Le développement en séries de TAYLOR de $x(t+h)$ en fonction de $x(t)$ à l'ordre deux est donné par :

$$x(t+h) = x(t) + h \dot{x}(t) + h/2 \ddot{x}(t) \quad (1)$$

de même que le développement en séries de TAYLOR de $x(t)$ en fonction de $x(t+h)$ est donné par :

$$x(t) = x(t+h) - h \dot{x}(t+h) + h/2 \ddot{x}(t+h) \quad (2)$$

La différence entre les deux équations 1 et 2 donne :

$$2(x(t+h) - x(t)) = h \dot{x}(t) + h/2 \ddot{x}(t) + h \dot{x}(t+h) - h/2 \ddot{x}(t+h) \quad (3)$$

Où .

$$\dot{X}(t) = A X(t) + B U(t)$$

$$X(t) = A X(t) + B U(t)$$

De même que

$$\dot{X}(t+h) = A X(t+h) + B U(t+h)$$

$$X(t+h) = A X(t+h) + B U(t+h)$$

En substituant on trouve :

$$\begin{aligned}
 2 (\dot{X}(t+h) - \dot{X}(t)) &= h (A X(t) + B U(t)) + h^2/2 (A \dot{X}(t) + B \dot{U}(t)) \\
 &+ h (A X(t+h) + B U(t+h)) - h^2/2 (A \dot{X}(t+h) + B \dot{U}(t+h)) \\
 &= h A X(t) + h B U(t) + h^2/2 A (A X(t) + B U(t)) \\
 &+ h^2/2 B \dot{U}(t) + h A X(t+h) + h B U(t+h) - h^2/2 A (A X(t+h)) \\
 &- h B U(t+h) - h^2/2 B \dot{U}(t+h)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (I - h/2 A + h^2/4 A^2) X(t+h) &= (I + h/2 A + h^2/4 A^2) X(t) + (h/2 B + h^2/4 A B) U(t) \\
 &+ (h/2 B - h^2/4 A B) U(t+h) + h^2/4 B \dot{U}(t) \\
 &- h^2/4 B \dot{U}(t+h).
 \end{aligned}$$

Finalement on trouve X(t+h) on fonction de X(t) :

$$\begin{aligned}
 X(t+h) &= (I - h/2 A + h^2/4 A^2)^{-1} \left[(I + h/2 A + h^2/4 A^2) X(t) + (h/2 B + h^2/4 A B) U(t) \right. \\
 &\left. + (h/2 B - h^2/4 A B) U(t+h) + h^2/4 B \dot{U}(t) - h^2/4 B \dot{U}(t+h) \right] \quad (4)
 \end{aligned}$$

L'équation(4) permet d'intégrer pas à pas le système

$$\dot{X} = A X + B U$$

connaissant U(t), U(t+h), U(t+h), U(t+h)

Dans notre étude on s'intéresse uniquement au cas où la commande U ait la forme suivante :

$$U = \begin{cases} \sum_{n=0}^m \alpha_n t^n & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad \text{Cas d'une rampe où d'un échelon.}$$

- PROPRIETE DE LA METHODE DE CRANCK NICHOLSON

L'une des propriétés essentielles de cette méthode est la possibilité d'étudier la stabilité de cette dernière.

A cet effet il faut déterminer les valeurs propres de la matrice (

$\Gamma = (I - h/2 A + h^2/4 A^2)^{-1} (I + h/2 A + h^2/4 A^2)$ qui doivent être à parties réelles inférieurs a 1.

On remarque bien que la stabilité de cette méthode dépend essentiellement du pas d'intégration h puisque Γ est fonction de h .

On montre aussi que cette méthode converge^{vers} la solution pour tout h quand $t \rightarrow \infty$ et pour toute entrée qui a la forme d'une rampe ou d'un échelon.

3) - DESCRIPTION DES SOUS PROGRAMMES UTILISEES PAR LA METHODE DE
C R A N C K N I C H O L S O N

Dans le programme principal A et B representant les matrices du système

$$\dot{X} = A X + B U$$

Le programme principal fait appel à des sous programmes pendant l'exécution pour différentes opérations:

Le S/P MULM

Ce sous programme effectue la multiplication de deux matrices et le résultat est stocké dans une autre matrice.

Le S/P MUL

Ce sous programme effectue la multiplication de tous les éléments d'un vecteur par la même constante "E" et le résultat est stocké dans un autre vecteur.

Le S/P MUL 1

Ce sous programme effectue la multiplication d'une matrice par un vecteur et le résultat est stocké dans un autre vecteur.

Le S/P MUL 2

Ce sous programme effectue la multiplication de tous les éléments d'une matrice par la même constante "E" et le résultat est stocké dans une autre matrice.

Le S/P SOM

Ce sous programme effectue la somme d'une matrice entière avec une matrice réelle et stock le résultat dans une autre matrice.

Le S/P SOM 1

Ce sous programme effectue la somme de deux vecteurs et stock le résultat dans un autre vecteur;

S/P SAM

Ce sous programme effectue la somme de deux matrices réelles et stock le résultat dans autre matrice.

S/P SUB

Ce sous programme effectue la différence d'une matrice réelle et d'une matrice entière et stock le résultat dans une autre matrice.

Le S/P SUB 1

Ce sous programme effectue la différence entre 2 vecteurs et stock le résultat dans un autre vecteur.

Le S/P INVMAT

Ce sous programme effectue l'inversion d'une matrice et stock le résultat dans une autre matrice.

Le S/P VAMAX

Ce sous programme permet la détermination du maximum des éléments d'un tableau.

Le S/P VAMIN

Ce sous programme permet de déterminer le minimum des éléments d'un tableau.

Le S/P COURBE

Ce sous programme permet de tracer les courbes, dans ce S/P il y a des spécifications dont les suivantes:

U représente l'échelle en ordonnée c'est-à-dire le nombre d'unité correspondant à chaque ligne.

IORIG est la ligne correspondante à l'origine des axes.

IPAS le temps entre 2 points.

IABS détermine la position en abscisse.

JORD détermine la position en ordonnée.

TAB(I) est une zone mémoire qui contient les valeurs de l'une des variables pour différentes itérations.

VALMAX est la valeur maximale des différentes itérations de la même variable.

VAMIN est la valeur minimale des différentes itérations de la même variable.

.../...

III - METHODE ITERATIVE DE RANGE KUTTA D'ORDRE IV POUR UN SYSTEME D'EQUATIONS DIFFERENTIELLES

a) - Position du problème

On supposera que le système d'équations différentielles à résoudre est donné sous la forme suivante :

$$\frac{dX^1}{dt} = f_1 (t, X^1, X^2, X^3, \dots, X^n)$$

$$\frac{dX^2}{dt} = f_2 (t, X^1, X^2, X^3, \dots, X^n)$$

$$\frac{dX^n}{dt} = f_n (t, X^1, X^2, X^3, \dots, X^n)$$

Avec les conditions initiales (solution particulière).

$$X_o^1 = X^1 (t_o)$$

$$X_o^2 = X^2 (t_o)$$

$$X_o^n = X^n (t_o)$$

Si cela n'était pas, on pourrait toujours ramener par un changement de variable approprié.

Lorsqu'on résout un système d'équations différentielles sur calculateur, on ne peut pas demander à ce dernier de donner une expression mathématique des fonctions en lui demande donc de les décrire point par point.

L'ordinateur trace un tableau donnant les valeurs des divers X^s pour les valeurs de la variable.

$$\begin{aligned} t &= t_o + dt \\ t &= t_o + 2 dt \\ &----- \\ t &= t_o + j dt \\ &----- \\ t &= t_o + M dt \end{aligned}$$

Pour cela, on peut utiliser la méthode de RANGE KUTTA. C'est un algorithme permettant d'approcher la somme de la série de TAYLOR.

Partant des valeurs de départ $X_o^1, X_o^2, \dots, X_o^3, \dots, X_o^n$

Cet algorithme permet de déterminer un lot de valeurs $X_1^1, X_1^2, X_1^3, X_1^4, \dots, X_1^n$,

correspondant à un accroissement h de la variable.

C'est-à-dire que connaissant $X_0^s = X_0$ (t_0)

On peut calculer $X_1^s = X_1$ (t_0+h)

On peut ainsi déterminer les fonctions X^s de proche en proche et faire imprimer les valeurs de X^s .

Correspondant à $t = t_0 + jdt$, j variant de 1 à M avec $dt = kh$.

B - Exposé de l'algorithme.

Connaissant $X_1^1, X_1^2, X_1^3, \dots, X_1^s, \dots, X_1^n$

correspondant à $t = t_0 + ih = t_i$ on détermine :

$$X_{i+1}^1, \dots, X_{i+1}^n$$

correspondant à $t = t_0 + (i+1)h = t_{i+1}$

par les formules :

$$X_{i+1}^1 = X_i^1 + h/6 (T_1^1 + 2T_2^1 + 2T_3^1 + T_4^1)$$

$$X_{i+1}^n = X_i^n + h/6 (T_1^n + 2T_2^n + 2T_3^n + T_4^n)$$

Avec $T_1^i = h f_1 (t_i, X_i^1, X_i^2, \dots, X_i^s, \dots, X_i^n)$

$$T_1^n = h f_n (t_i, X_i^1, \dots, X_i^s, \dots, X_i^n)$$

et $T_2^1 = h f_1 (t_i + 0.5h, X_i + 0.5T_1^1, X_i + 0.5T_1^2, \dots, X_i + 0.5T_1^n)$

$$T_2^n = h f_n (t_i + 0.5h, X_i + 0.5T_1^1, X_i + 0.5T_1^2, \dots, X_i + 0.5T_1^n)$$

et $T_3^1 = h f_1 (t_i + 0.5h, X_i + 0.5T_2^1, X_i + 0.5T_2^2, \dots, X_i + 0.5T_2^n)$

.../...

$$T_3^n = h f_n (t_i + 0.5h, X_{i+0.5}^1, X_{i+0.5}^2, \dots, X_{i+0.5}^n)$$

et enfin

$$T_4^1 = h f_1 (t_i + h, X_{i+T_3}^1, X_{i+T_3}^2, \dots, X_{i+T_3}^n)$$

$$T_4^n = h f_n (t_i + h, X_{i+T_3}^1, X_{i+T_3}^2, \dots, X_{i+T_3}^n)$$

On constate tout de suite que la difficulté de cette méthode réside dans le choix du pas d'intégration h , si on ne le prend pas assez faible, les formules d'approximation ci-dessus ne sont plus valables et si on le prend trop faible, le temps de calcul devient prohibitif.

CONCLUSION

Le choix du pas d'intégration est très important dans cette méthode.

DESCRIPTION DES S/P UTILISES PAR LA METHODE DE RANGE KUTTA

I - LE PROGRAMME PRINCIPAL

A, B représentent les matrices constantes du système

$$\dot{X} = AX + BU$$

Ce programme fait appel à des sous programmes durant son exécution.

S/P MIG 1

Ce sous programme permet de calculer les coefficients $T_1(j)$.

S/P MIG 2

Ce sous programme permet de calculer les coefficients $T_2(j)$.

S/P MIG 3

Ce dernier permet de calculer les coefficients $T_3(j)$.

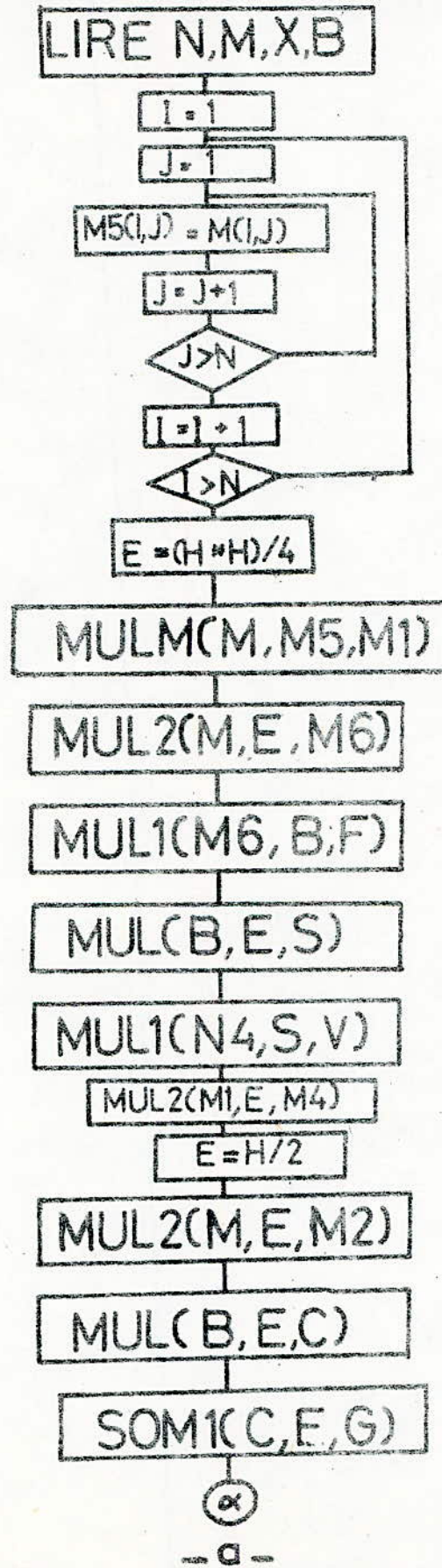
S/P MIG 4

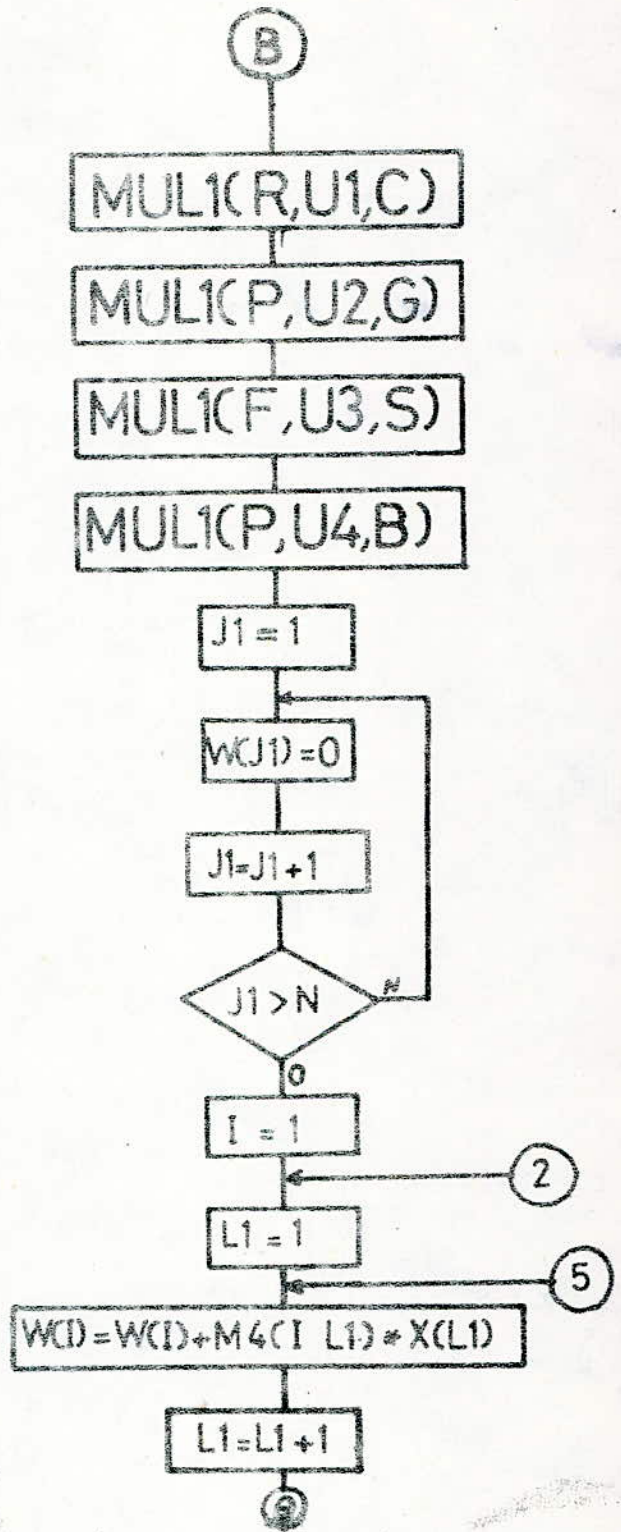
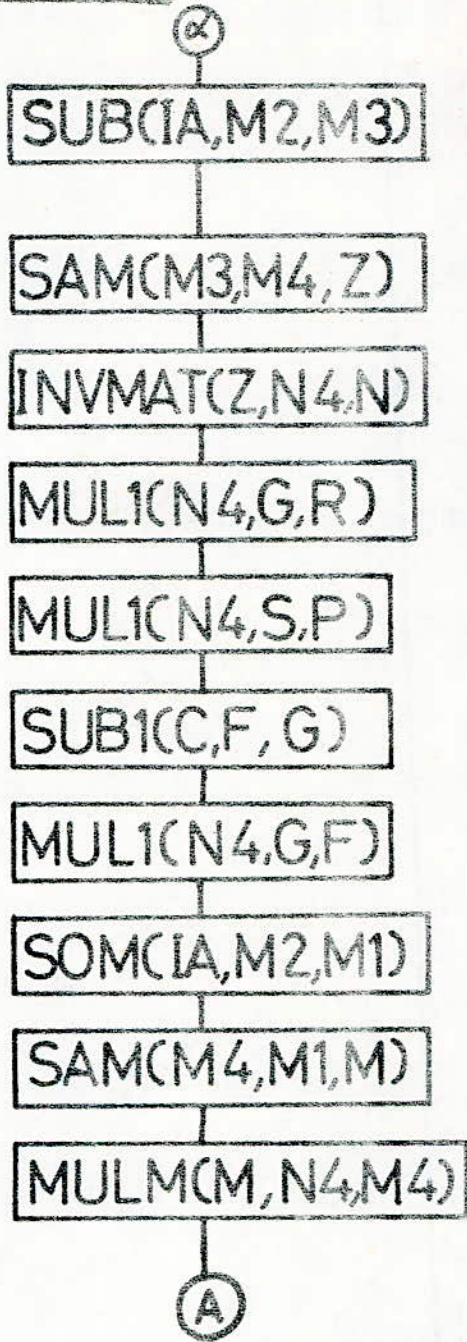
Ce dernier permet de calculer les coefficient $T_4(j)$.

TABLEAU DE VALEURES

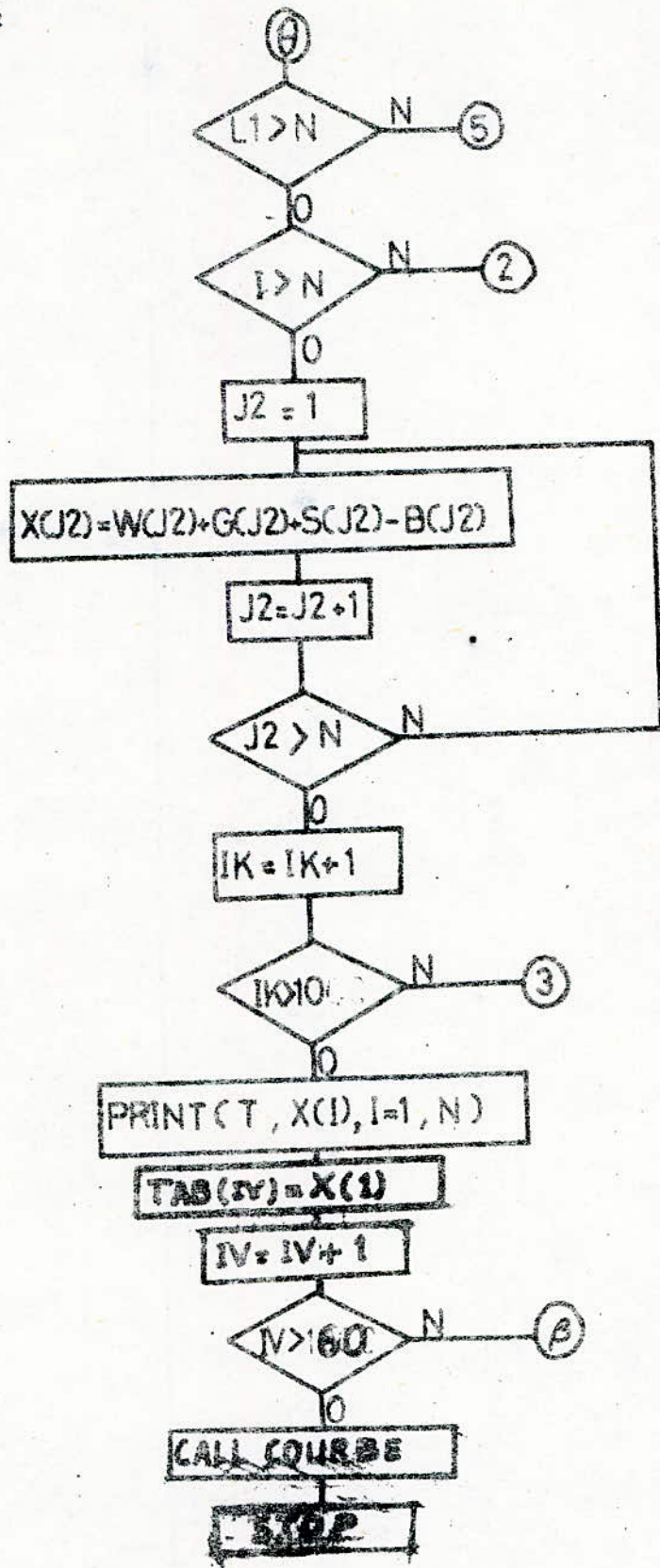
Symbole	Definition	Valeur	Unité
P_0	Puissance nucléaire nominale à 100%	2700	MW
β	Fraction totale des neutrons retardés	640	P.C.M
θ	Durée de vie moyenne d'un neutron	$4 \cdot 10^{-5}$	S
λ_1	Probabilité de désintégration des noyaux précurseurs (1)	0.087	S^{-1}
λ_2	Probabilité de désintégration des noyaux précurseurs (2)	0.71	S^{-1}
α_u	Coefficient Doppler	3	pcm/°C
α_m	Coefficient modérateur	30	pcm/°C
β_1	Fraction des neutrons retardés du groupe (1)	286	pcm
β_2	Fraction des neutrons retardés du groupe (2)	354	pcm
K	Coefficient d'échange (Watt-Cal)	0,25	Cal/°C.S
Mu	Masse du combustible	82,193	T
Cu	Calaleur massique du combustible	77,41	Cal/°C.S
Mm	Masse du modérateur	$10,59 \cdot 10^3$	Kg
Cm	Calaleur massique du modérateur	1	Cal/°C.S
Rum	Résistance thermique uranium-moderateur	$2,46 \cdot 10^{-3}$	$m^2 \text{°C.S/Cal}$
Rgm	Résistance thermique gaine-moderateur	$1,83 \cdot 10^{-3}$	$m^2 \text{°C.S/Cal}$
Rug	Résistance thermique uranium-gaine	$6,2 \cdot 10^{-4}$	$m^2 \text{°C.S/Cal}$
Qm	Débit de l'eau dans le coeur	$61,7 \cdot 10^3$	Kg/S
	Réactivité totale à l'équilibre	0	pcm
$\delta C1_0$	Variation de la puissance nominale du 1ère groupe des précurseurs de 10%	221800	MW
$\delta C2_0$	Variation de la puissance nominale du 2ème groupe des précurseurs de 10%	33600	MW
Tuo	Temperature nominale d'uranium à 100 %	700	°C
T_E	Temperature de l'eau primaire à l'entrée du coeur	284	°C
Ts	Temperature de l'eau primaire à la sortie du coeur	321,4	°C
Tmo	Temperature moyenne nominale du modérateur	302,8	°C

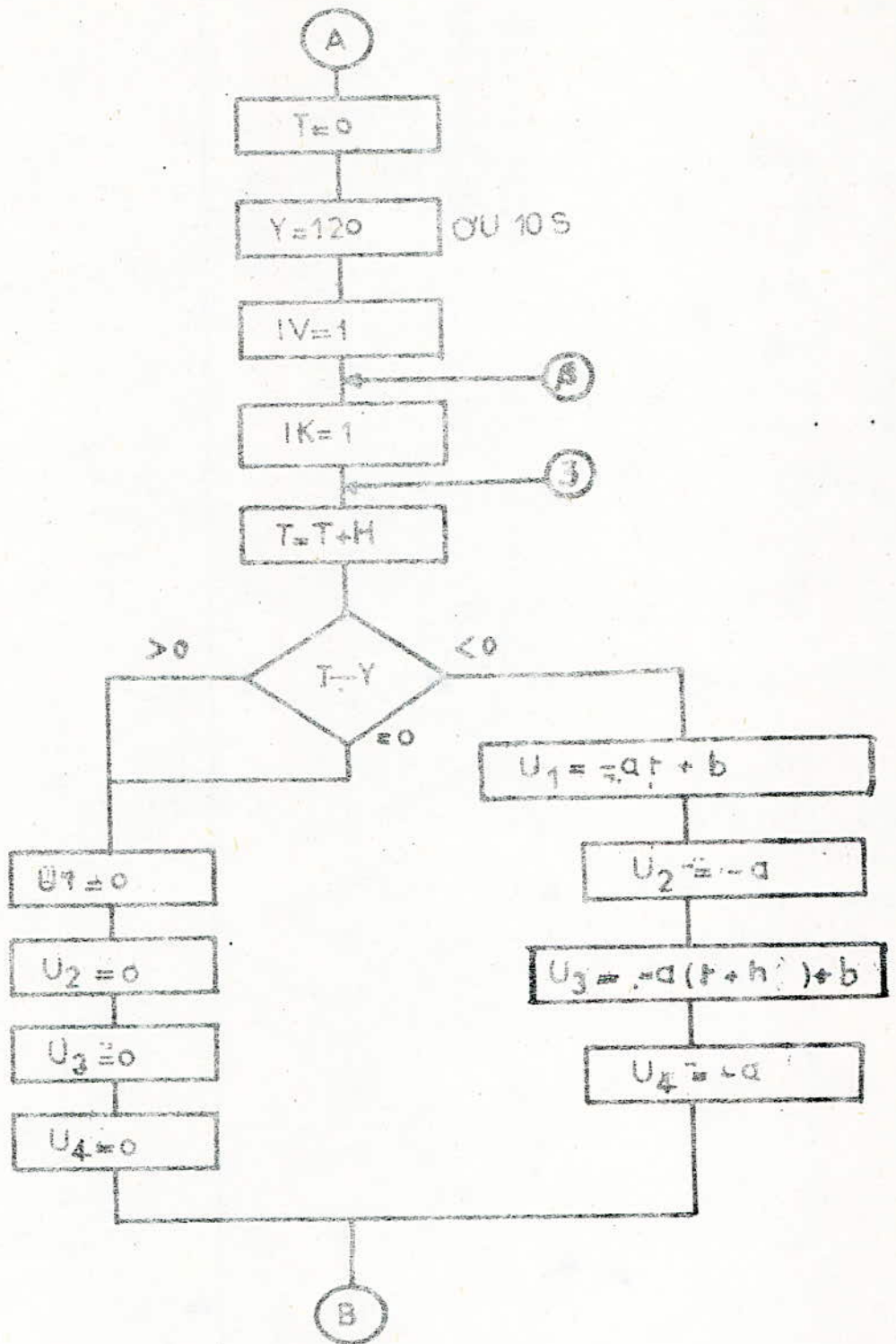
ORGANIGRAMME PRINCIPAL 1A
METHODE DE CRANCK NICOLSON



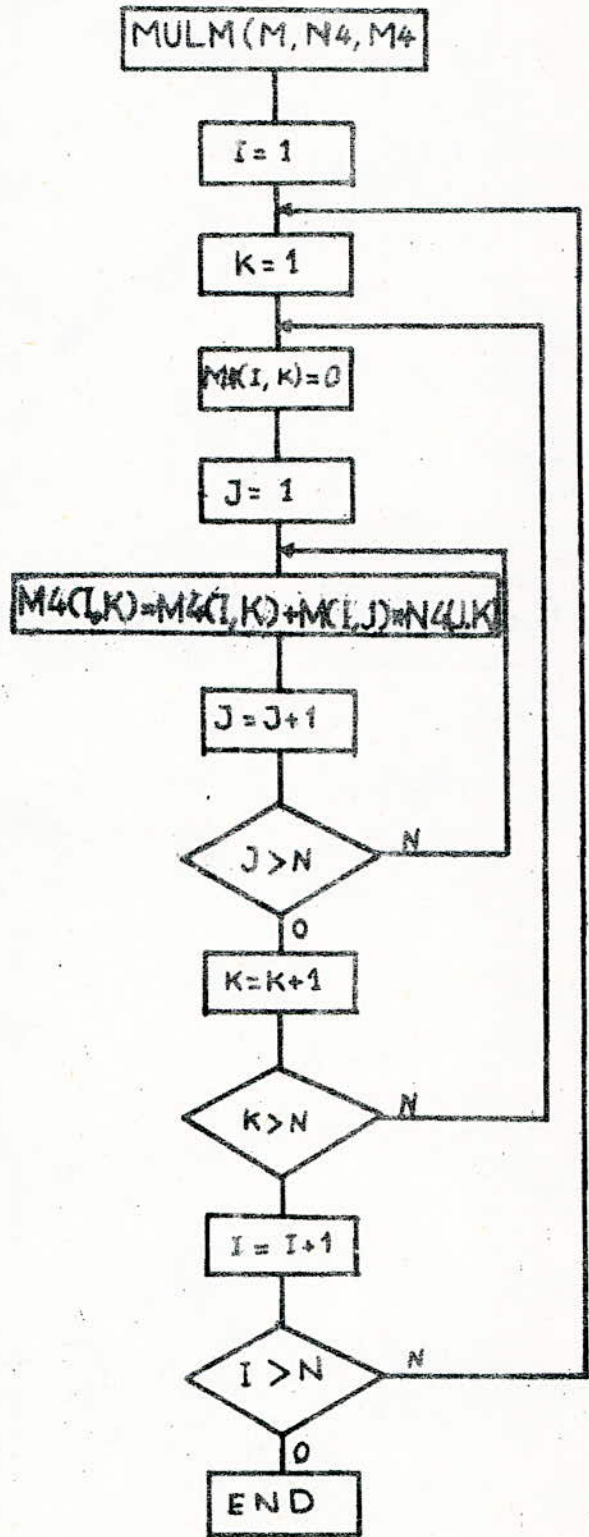
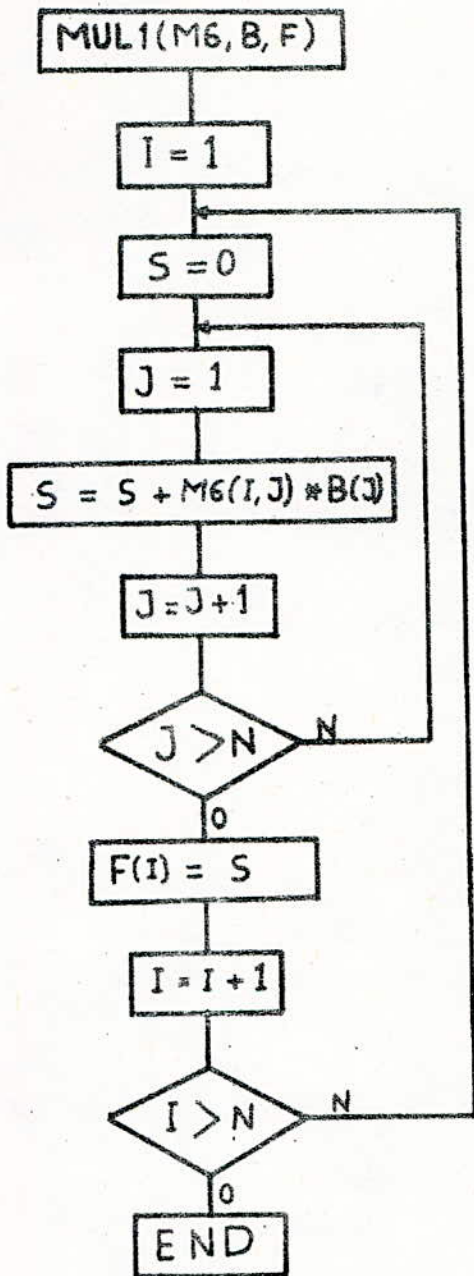


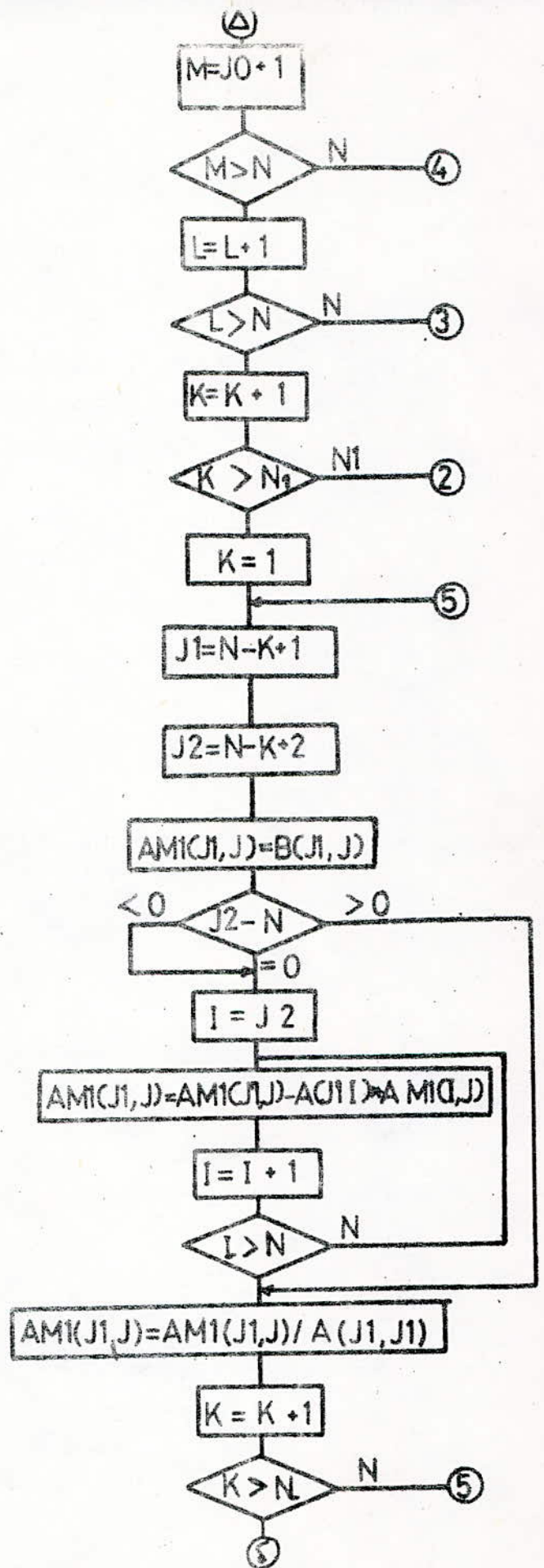
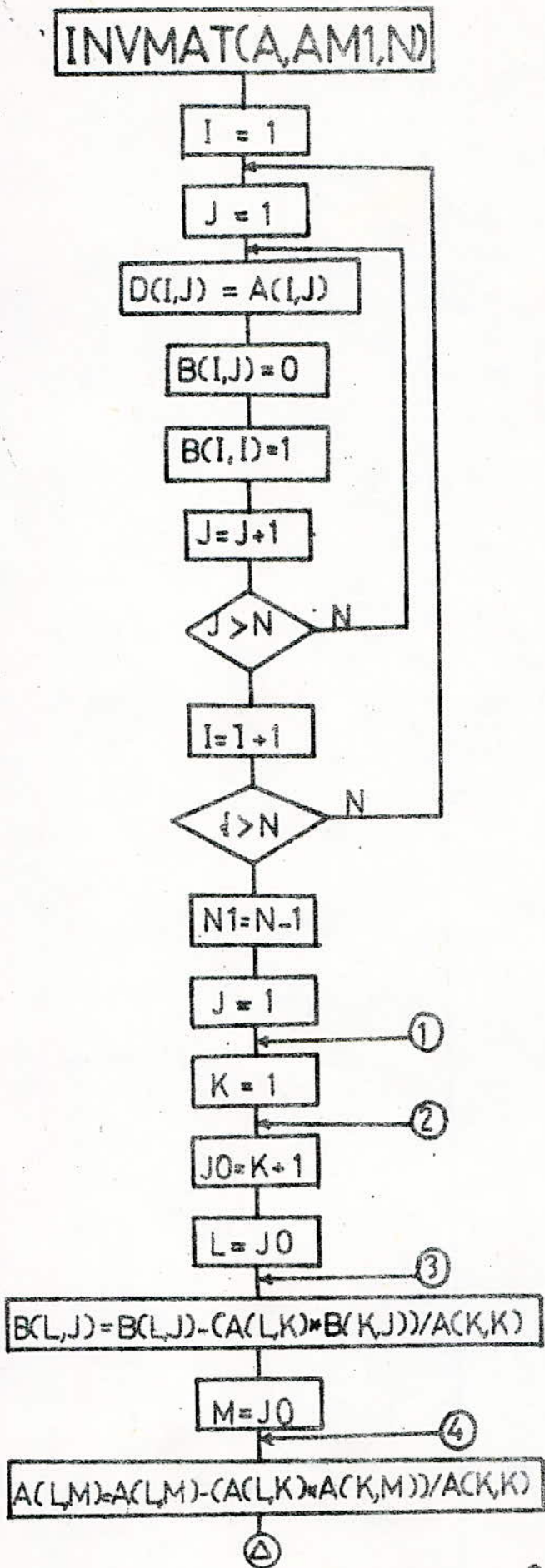
SUITE IA-2

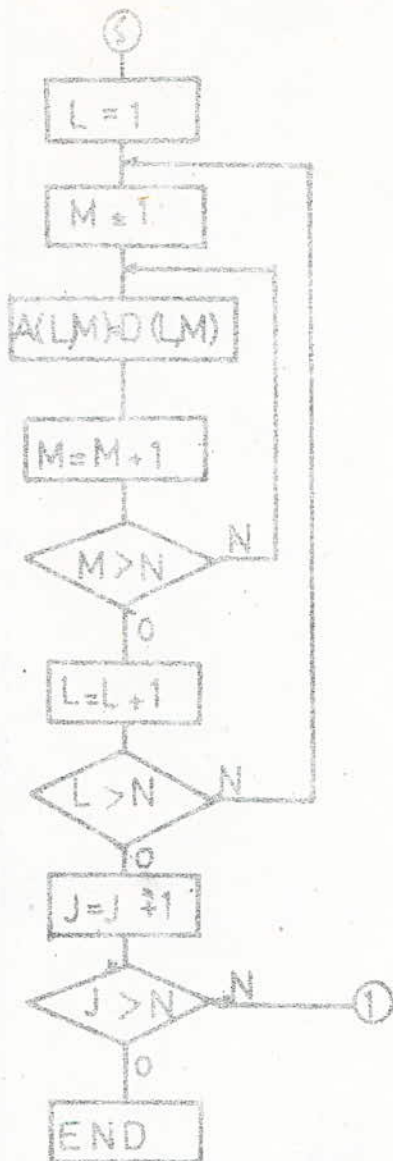


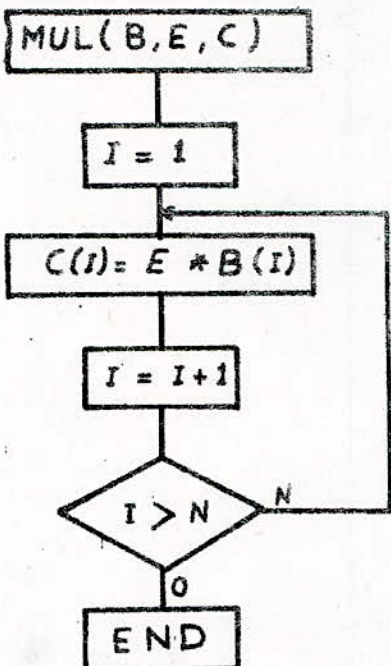
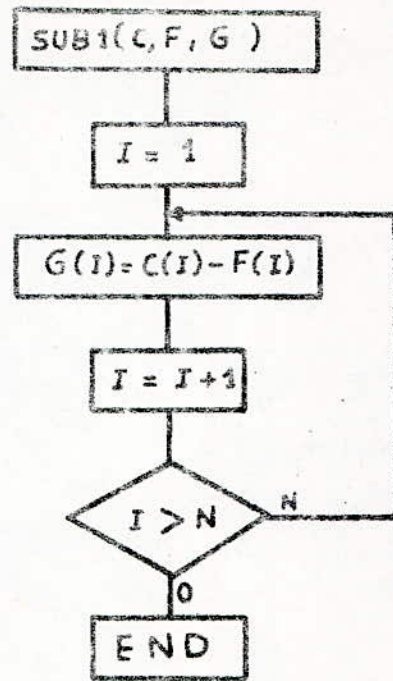
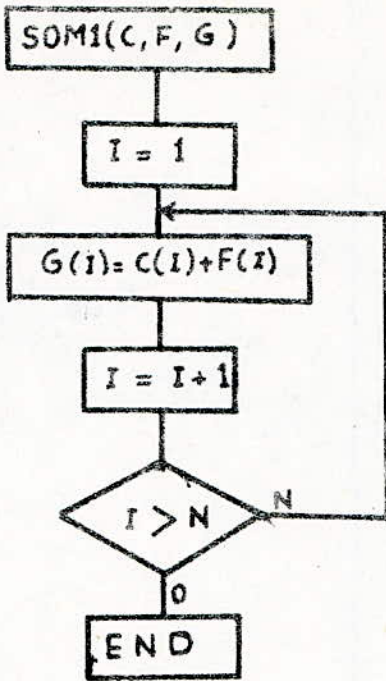


ORGANIGRAMMES DES SUBROUTINES









SAM(M3, M4, Z)

I = 1

J = 1

$Z(I, J) = M3(I, J) + M4(I, J)$

J = J + 1

J > N

I = I + 1

I > N

END

MUL2(M1, E, M4)

I = 1

J = 1

$M4(I, J) = E * M1(I, J)$

J = J + 1

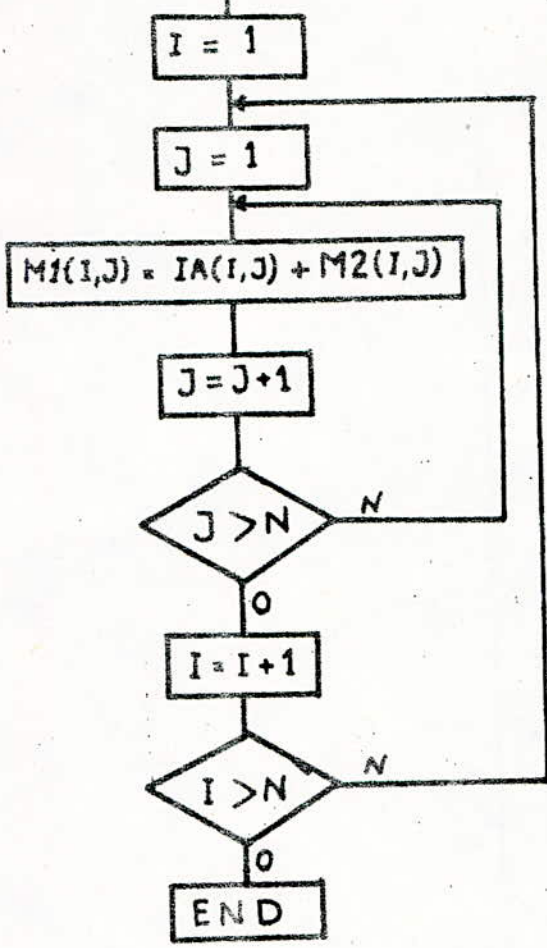
J > N

I = I + 1

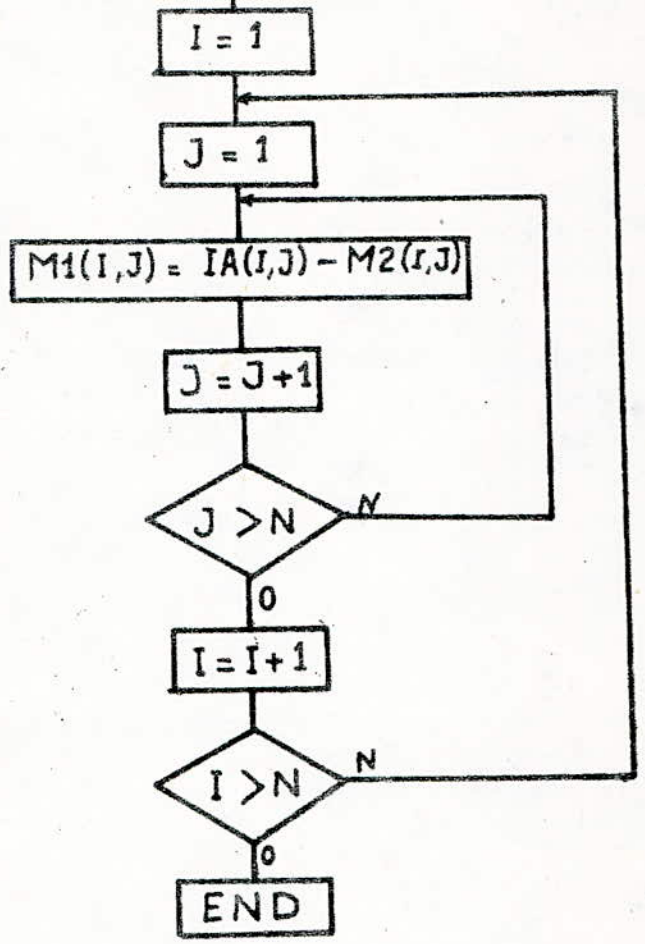
I > N

END

SOM(IA, M2, M1)

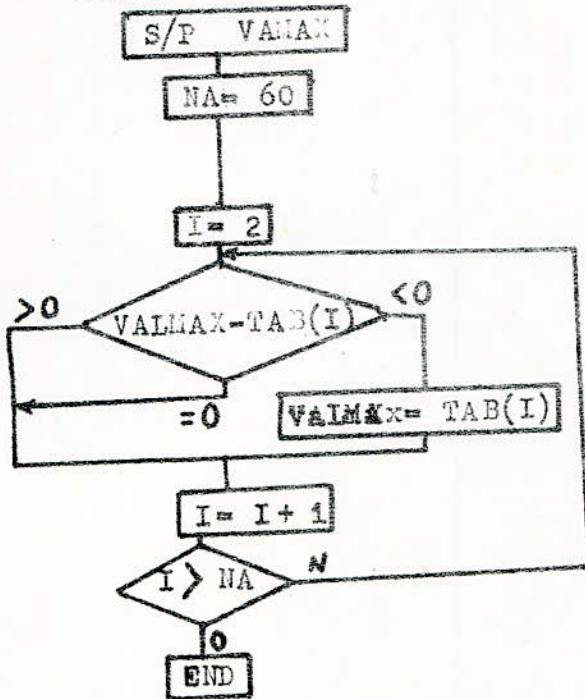


SUB(IA, M2, M1)



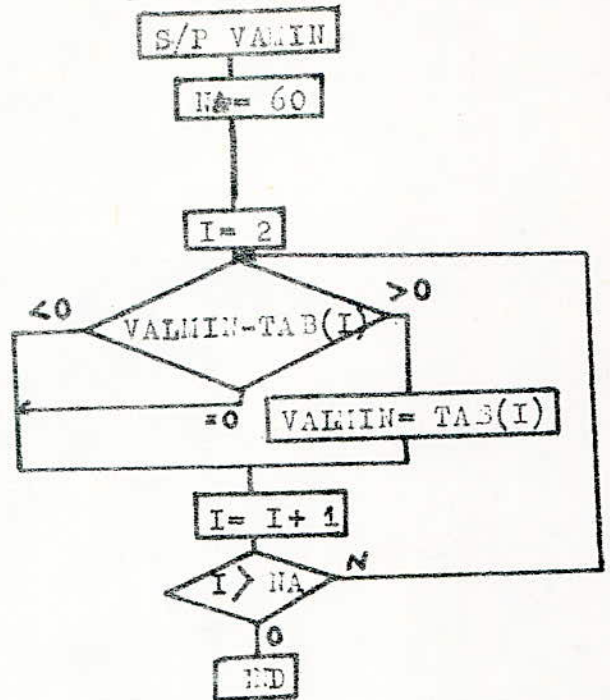
S/P POUR LA DETERMINATION

DU MAXIMUM

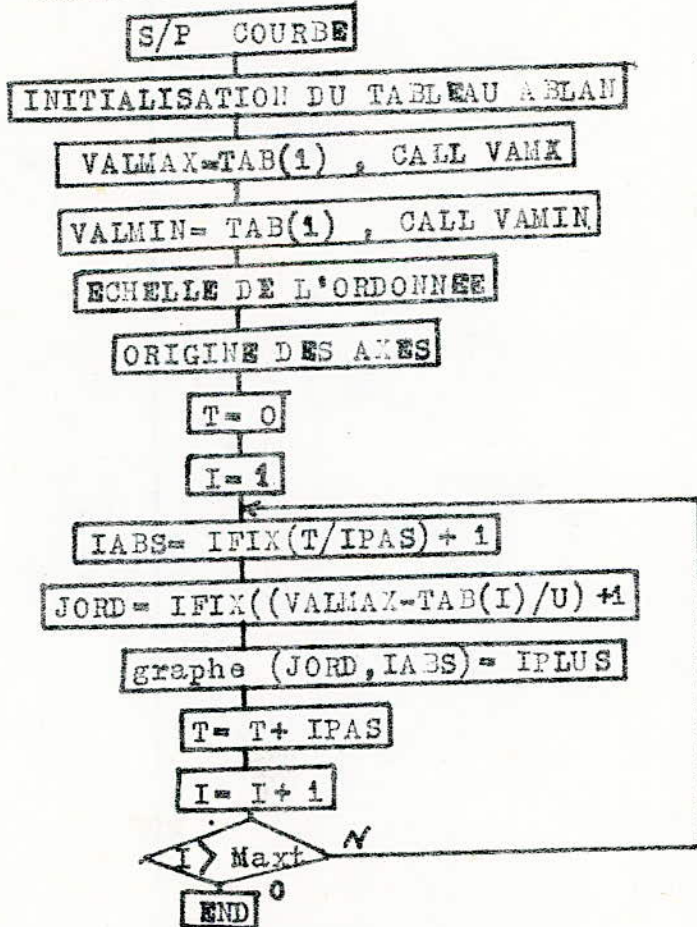


S/P POUR LA DETERMINATION

DU MINIMUM



S/P POUR LA TRACE DES COURBES



VARIATION DE LA COMMANDE EN FONCTION DU TEMPS

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 2

U

0.21450E+03+
0.20950E+03I
0.20450E+03I
0.19950E+03I
0.19450E+03I
0.18950E+03I
0.18450E+03I
0.17950E+03I
0.17450E+03I+
0.16950E+03I
0.16450E+03I
0.15950E+03I
0.15450E+03I
0.14950E+03I
0.14450E+03I
0.13950E+03I
0.13450E+03I
0.12950E+03I +
0.12450E+03I
0.11950E+03I
0.11450E+03I
0.10950E+03I
0.10450E+03I
0.99500E+02I
0.94500E+02I
0.89500E+02I +
0.84500E+02I
0.79500E+02I
0.74500E+02I
0.69500E+02I
0.64500E+02I
0.59500E+02I
0.54500E+02I
0.49500E+02I
0.44500E+02I +
0.39500E+02I
0.34500E+02I
0.29500E+02I
0.24500E+02I
0.19500E+02I
0.14500E+02I
0.95000E+01I
0.45000E+01I
0.50000E+00

+++++

-0.55000E+01I
-0.10500E+02I
-0.15500E+02I
-0.20500E+02I
-0.25500E+02I
-0.30500E+02I

.0

-L-

.250E+02

.390E+02 T

REPONSE DE LA PUISSANCE A UN ECHOLON DE REACTIVITE

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 2

DPUI(MW)

```

0.27000E+03+
0.26000E+03I
0.25000E+03I
0.24000E+03I
0.23000E+03I
0.22000E+03I
0.21000E+03I
0.20000E+03I
0.19000E+03I
0.18000E+03I
0.17000E+03I
0.16000E+03I
0.15000E+03I
0.14000E+03I
0.13000E+03I+
0.12000E+03I
0.11000E+03I
0.10000E+03I
0.90000E+02I
0.80000E+02I
0.70000E+02I
0.60000E+02I
0.50000E+02I
0.40000E+02I
0.30000E+02I
0.20000E+02I +
0.10000E+02I
0.0 I
0.10000E+02-
-----
-0.20000E+02I
-0.30000E+02I +
-0.40000E+02I
-0.50000E+02I
-0.60000E+02I +
-0.70000E+02I
-0.80000E+02I +
-0.90000E+02I
-0.10000E+03I
-0.11000E+03I
-0.12000E+03I +
-0.13000E+03I
-0.14000E+03I
-0.15000E+03I
-0.16000E+03I
-0.17000E+03I
-0.18000E+03I +
-0.19000E+03I
-0.20000E+03I
-0.21000E+03I
-0.22000E+03I

```

.0

-M-

.250E+02

.390E+02 T

REPONSE DE LA TEMPERATURE DU MODERATEUR A UN ECHELON DE REACT

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 2

DTM(DEG C)

0.18800E+03+
0.18400E+03I
0.18000E+03I
0.17600E+03I
0.17200E+03I
0.16800E+03I
0.16400E+03I+
0.16000E+03I
0.15600E+03I
0.15200E+03I
0.14800E+03I
0.14400E+03I
0.14000E+03I
0.13600E+03I
0.13200E+03I +
0.12800E+03I
0.12400E+03I
0.12000E+03I
0.11600E+03I
0.11200E+03I
0.10800E+03I
0.10400E+03I
0.10000E+03I +
0.96000E+02I
0.92000E+02I
0.88000E+02I
0.84000E+02I
0.80000E+02I
0.76000E+02I
0.72000E+02I
0.68000E+02I
0.64000E+02I +
0.60000E+02I
0.56000E+02I
0.52000E+02I
0.48000E+02I
0.44000E+02I
0.40000E+02I
0.36000E+02I
0.32000E+02I +
0.28000E+02I
0.24000E+02I
0.20000E+02I
0.16000E+02I
0.12000E+02I +
0.80000E+01I
0.40000E+01I
0.0 I
0.40000E+01I
0.80000E+01I

++++++

+++

++++++

.0

.250E+02

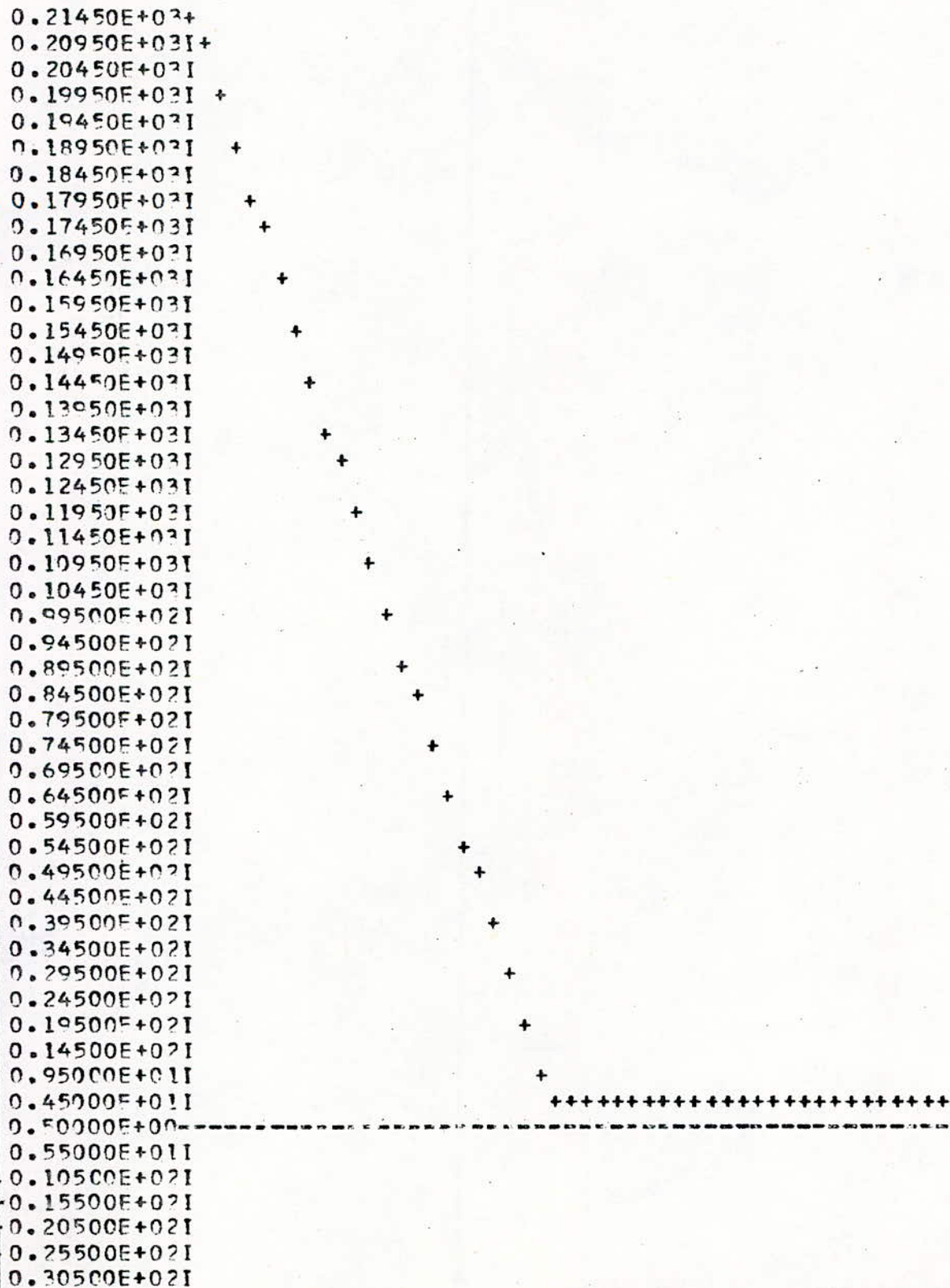
.390E+02 T

VARIATION DE LA COMMANDE EN FONCTION DU TEMPS

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 10

U



.0

.125E+03
-0-

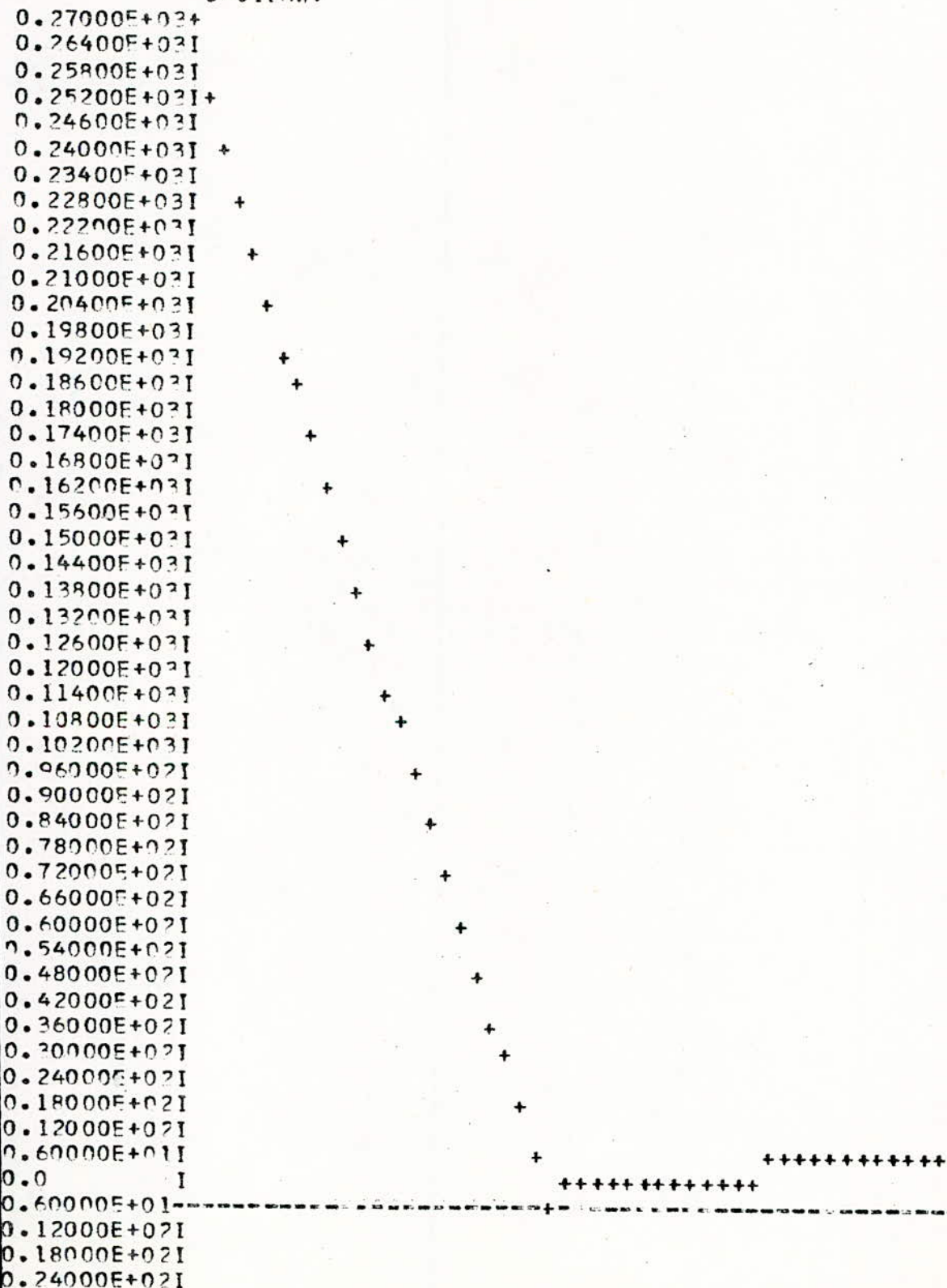
.195E+03 T

REPONSE DE LA PUISSANCE A UNE RAMPE DE REACTIVITE

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 10

DPUI(MW)



.0 .125E+03 .195E+03 T

REPONSE DE LA TEMPERATURE DU MODERATEUR A UNE RAMPE DEREACT

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 10

DTM(DEG C)

```

0.18800E+03+
0.18400E+03I
0.18000E+03I
0.17600E+03I
0.17200E+03I
0.16800E+03I+
0.16400E+03I +
0.16000E+03I
0.15600E+03I +
0.15200E+03I
0.14800E+03I +
0.14400E+03I
0.14000E+03I +
0.13600E+03I
0.13200E+03I +
0.12800E+03I +
0.12400E+03I
0.12000E+03I +
0.11600E+03I
0.11200E+03I +
0.10800E+03I
0.10400E+03I +
0.10000E+03I
0.96000E+02I +
0.92000E+02I +
0.88000E+02I
0.84000E+02I +
0.80000E+02I
0.76000E+02I +
0.72000E+02I
0.68000E+02I +
0.64000E+02I
0.60000E+02I +
0.56000E+02I +
0.52000E+02I
0.48000E+02I +
0.44000E+02I
0.40000E+02I +
0.36000E+02I
0.32000E+02I +
0.28000E+02I
0.24000E+02I +
0.20000E+02I +
0.16000E+02I
0.12000E+02I +
0.80000E+01I
0.40000E+01I
0.0 I
0.40000E+01-----
0.80000E+01I

```

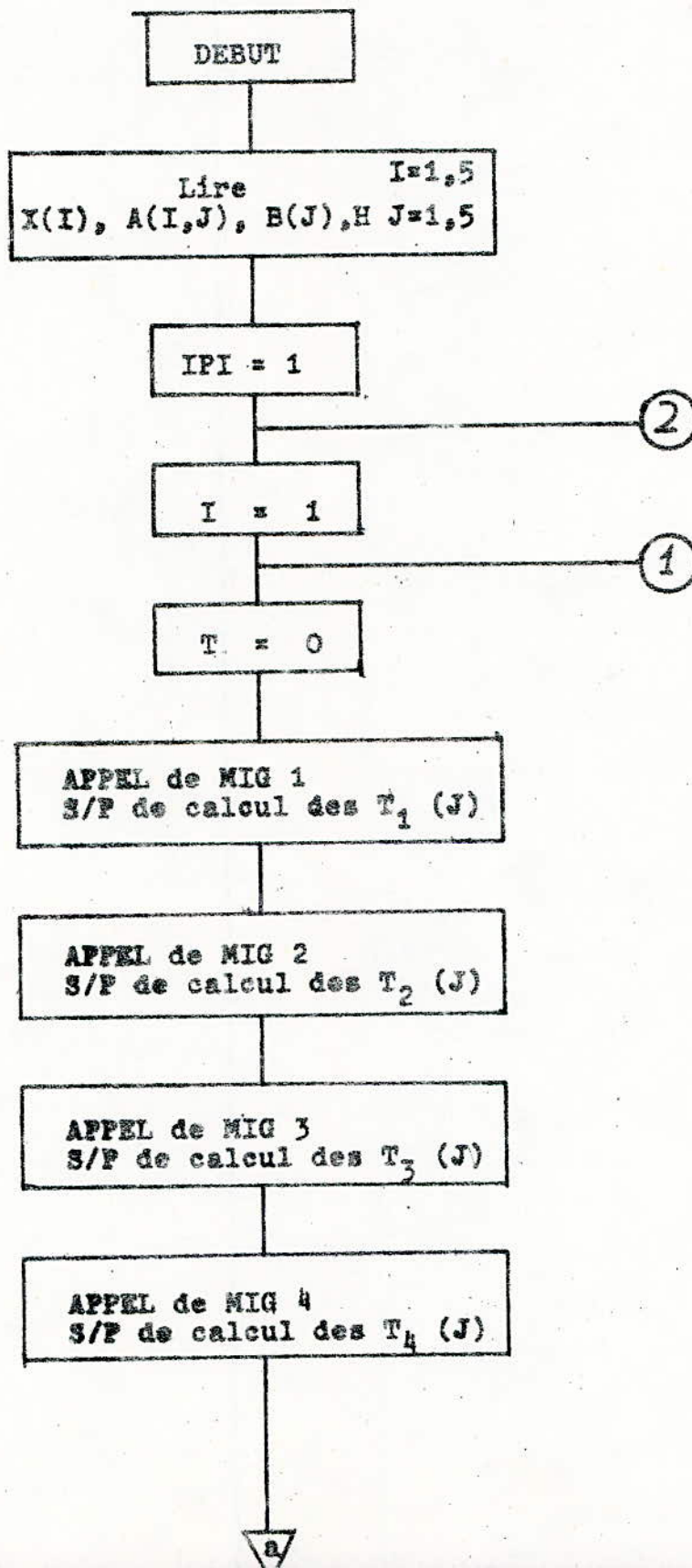
+++++

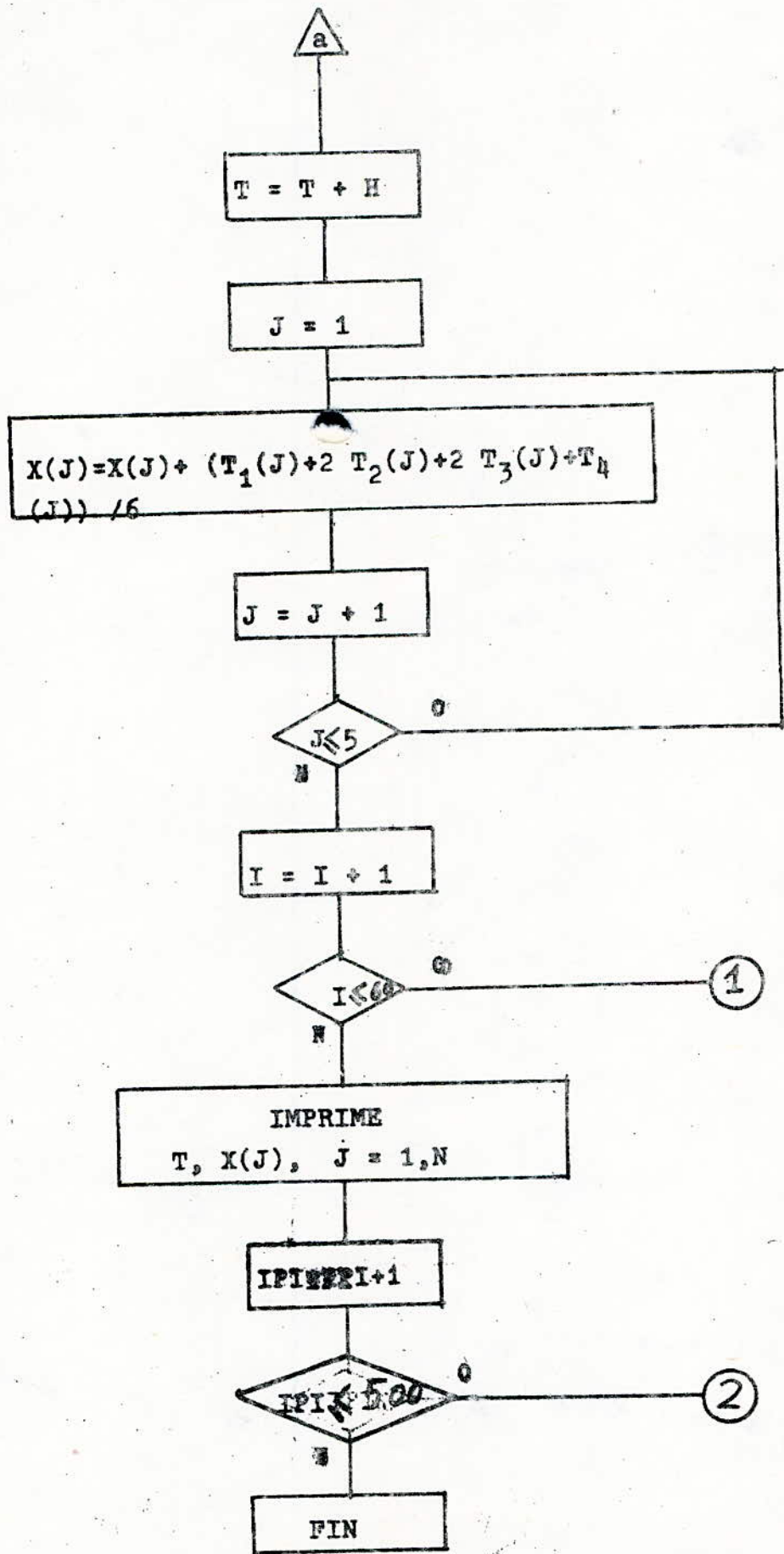
.0

-Q-.125E+03

.195E+03 T

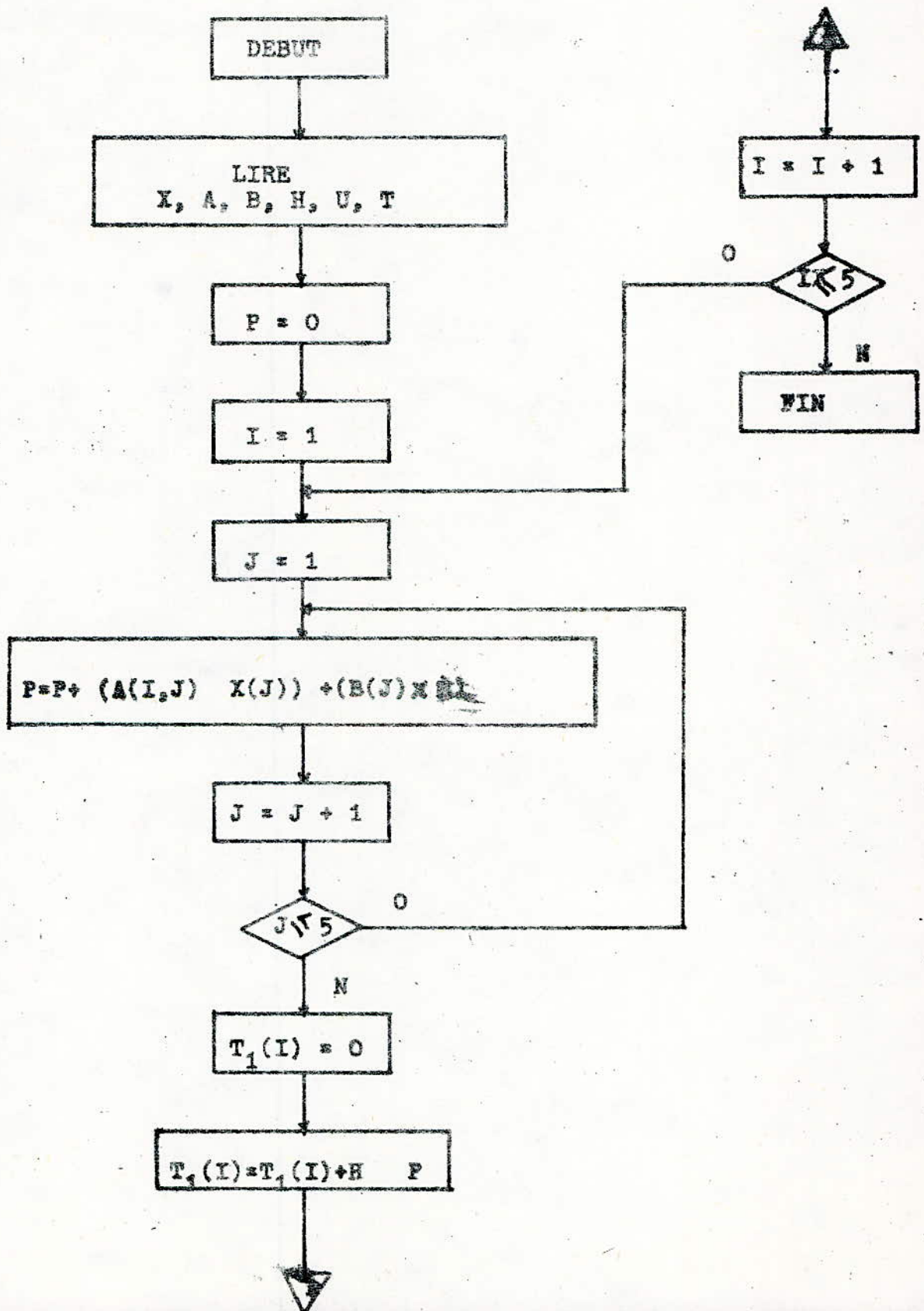
ORGANIGRAMME DU PROGRAMME PRINCIPAL





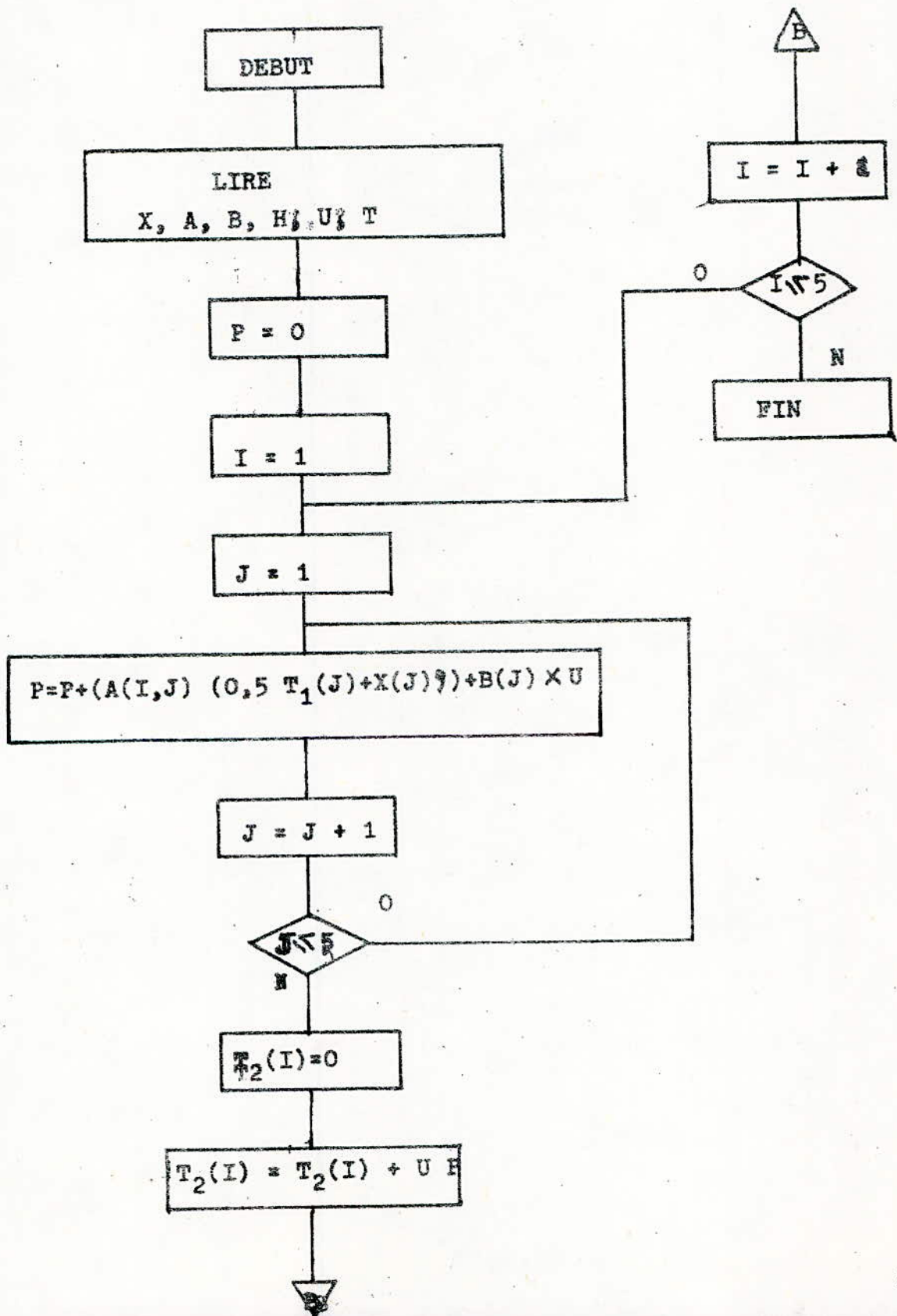
ORGANIGRAMME DU S/P MIG 1

CALUCUL DES $T_1(I)$



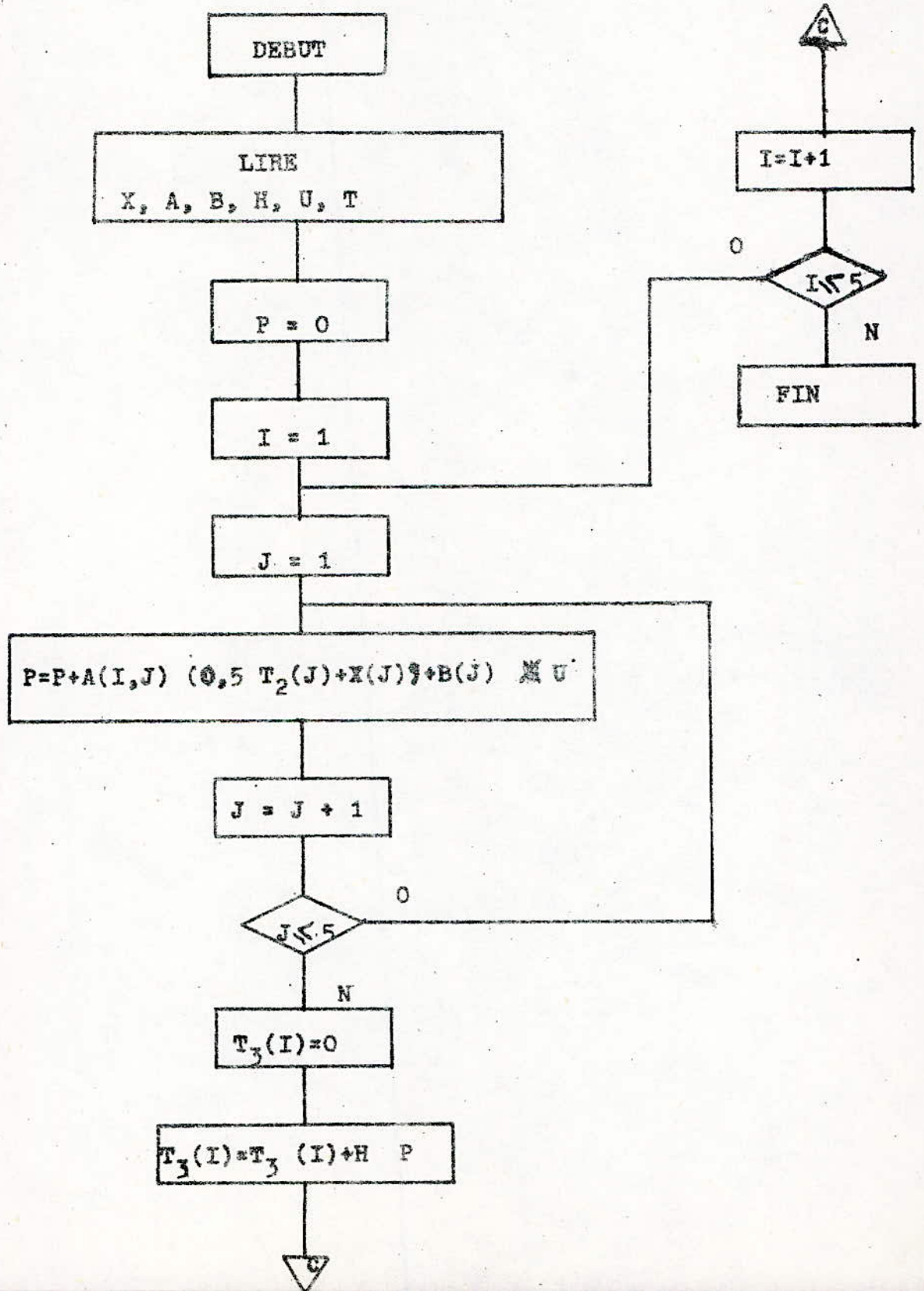
ORGANIGRAMME DU S/P MIG 2

CALCUL DES $T_2(I)$



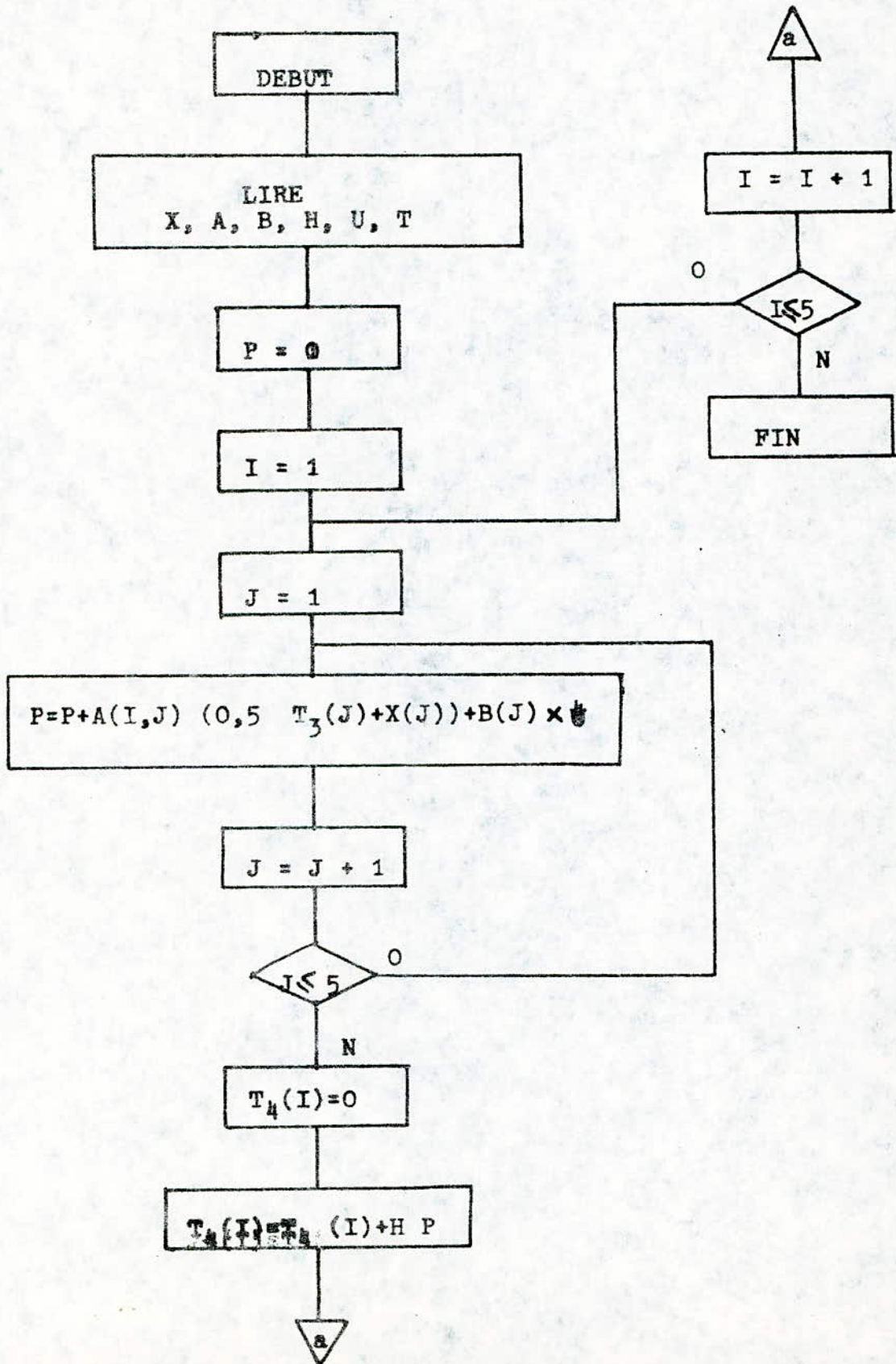
ORGANIGRAMME DU S/P MIG 3

CALCUL DES T_3 (E)



ORGANIGRAMME DU S/P MIG 4

CALCUL DES $T_h(I)$



ECHELON DE COMMANDE

PAS H=0.0134

U (PCM)

Value	Label
0.0	
-0.5000CE+01I	
-0.1000CE+02I	
-0.1500CE+02I	
-0.2000CE+02I	
-0.2500CE+02I	
-0.3000CE+02I	
-0.3500CE+02I	
-0.4000CE+02I	+
-0.4500CE+02I	
-0.5000CE+02I	
-0.5500CE+02I	
-0.6000CE+02I	
-0.6500CE+02I	
-0.7000CE+02I	
-0.7500CE+02I	
-0.8000CE+02I	
-0.8500CE+02I	+
-0.9000CE+02I	
-0.9500CE+02I	
-0.1000CE+03I	
-0.1050CE+03I	
-0.1100CE+03I	
-0.1150CE+03I	
-0.1200CE+03I	
-0.1250CE+03I	+
-0.1300CE+03I	
-0.1350CE+03I	
-0.1400CE+03I	
-0.1450CE+03I	
-0.1500CE+03I	
-0.1550CE+03I	
-0.1600CE+03I	
-0.1650CE+03I	
-0.1700CE+03I	+
-0.1750CE+03I	
-0.1800CE+03I	
-0.1850CE+03I	
-0.1900CE+03I	
-0.1950CE+03I	
-0.2000CE+03I	
-0.2050CE+03I	
-0.2100CE+03I	
-0.2150CE+03I	
-0.2200CE+03I	
-0.2250CE+03I	
-0.2300CE+03I	
-0.2350CE+03I	
-0.2400CE+03I	
-0.2450CE+03I	

0.0

0.2500 E+02

0.4900E+02 T

REPONSE DE PUISSANCE A UN ECHELON DE REACTIVITE

PAS H=0.0134

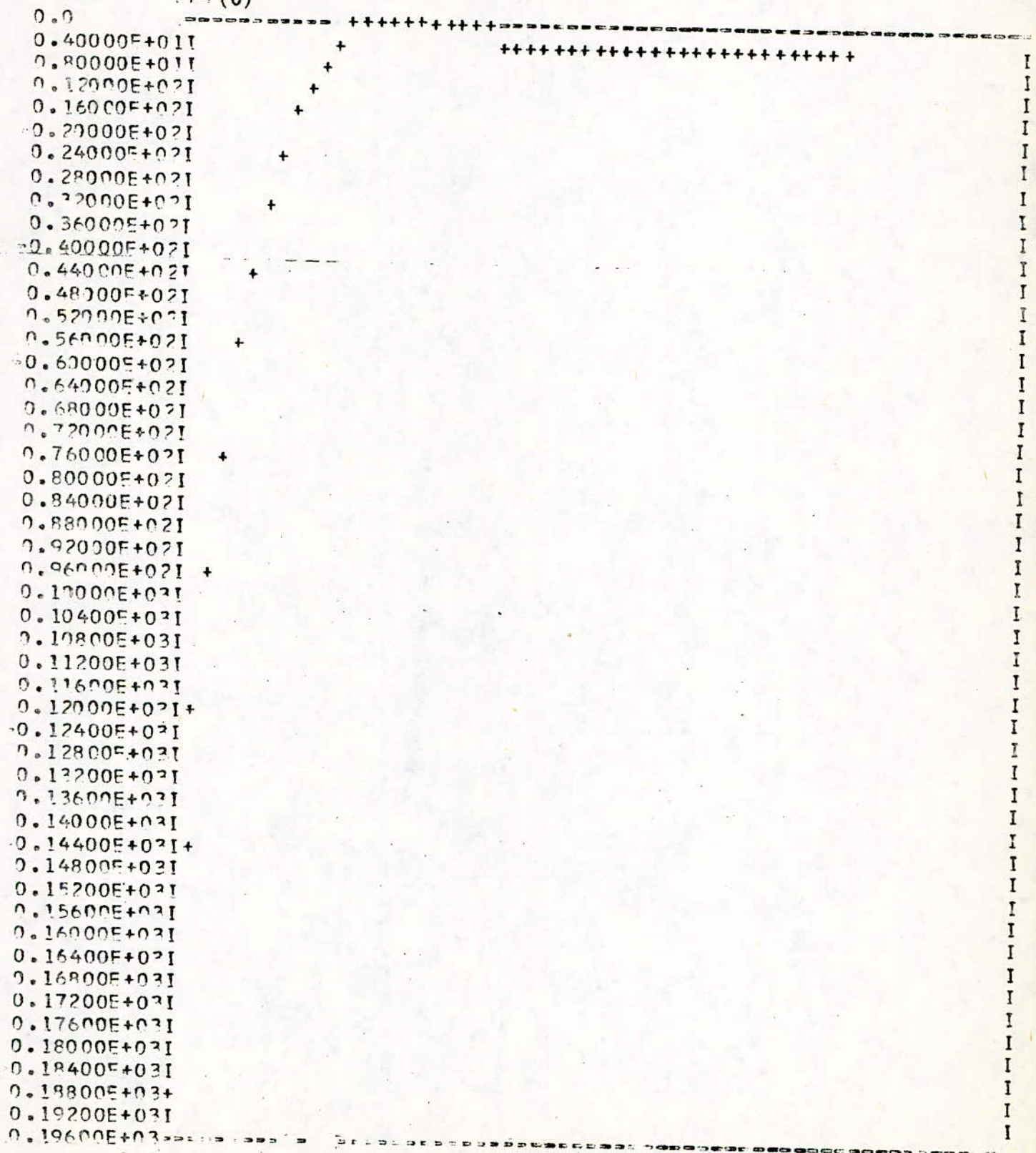
DPN(MW)

0.20000E+02		
0.19000E+03I		
0.18000E+03I		
0.17000E+03I	+	
0.16000E+03I		
0.15000E+03I		
0.14000E+03I		
0.13000E+03I		
0.12000E+03I		
0.11000E+03I	+	
0.10000E+03I		
0.90000E+02I		
0.80000E+02I		
0.70000E+02I	+	
0.60000E+02I		
0.50000E+02I		
0.40000E+02I	+	
0.30000E+02I		
0.20000E+02I		
0.10000E+02I	+	
0.0	+	+++++
-0.10000E+02I		+++++
-0.20000E+02I		
-0.30000E+02I		
-0.40000E+02I		
-0.50000E+02I		
-0.60000E+02I		
-0.70000E+02I		
-0.80000E+02I		
-0.90000E+02I		
-0.10000E+03I		
-0.11000E+03I		
-0.12000E+03I		
-0.13000E+03I		
-0.14000E+03I		
-0.15000E+03I		
-0.16000E+03I		
-0.17000E+03I		
-0.18000E+03I	+	
-0.19000E+03I		
-0.20000E+03I		
-0.21000E+03I		
-0.22000E+03I		
-0.23000E+03I		
-0.24000E+03I		
-0.25000E+03I		
-0.26000E+03I		
-0.27000E+03I		
-0.28000E+03I	+	
-0.29000E+03I		
0.0		
	0.2500E+02	
		0.4900E+02 T

REPONSE DE TEMPERATURE DU MODERATEUR A UN **ECHELON** DE REACTIVITE

PAS H=0.0134

DTM (C)



J.1500E+02

0.2940E+02 T

RAMPE DE COMMANDE

PAS H=0.0134

U (PCM)

0.0	I	-----+++++	
0.50000E+01I			I
0.10000E+02I		+	I
0.15000E+02I			I
0.20000E+02I		+	I
0.25000E+02I			I
0.30000E+02I		+	I
0.35000E+02I			I
0.40000E+02I		+	I
0.45000E+02I			I
0.50000E+02I		+	I
0.55000E+02I			I
0.60000E+02I		+	I
0.65000E+02I			I
0.70000E+02I			I
0.75000E+02I		+	I
0.80000E+02I			I
0.85000E+02I		+	I
0.90000E+02I			I
0.95000E+02I		+	I
0.10000E+03I			I
0.10500E+03I		+	I
0.11000E+03I			I
0.11500E+03I		+	I
0.12000E+03I			I
0.12500E+03I		+	I
0.13000E+03I			I
0.13500E+03I		+	I
0.14000E+03I			I
0.14500E+03I			I
0.15000E+03I		+	I
0.15500E+03I			I
0.16000E+03I		+	I
0.16500E+03I			I
0.17000E+03I		+	I
0.17500E+03I			I
0.18000E+03I		+	I
0.18500E+03I			I
0.19000E+03I		+	I
0.19500E+03I			I
0.20000E+03I		+	I
0.20500E+03I			I
0.21000E+03I			I
0.21500E+03I			I
0.22000E+03I			I
0.22500E+03I			I
0.23000E+03I			I
0.23500E+03I			I
0.24000E+03I			I
0.24500E+03I			I
0.0			

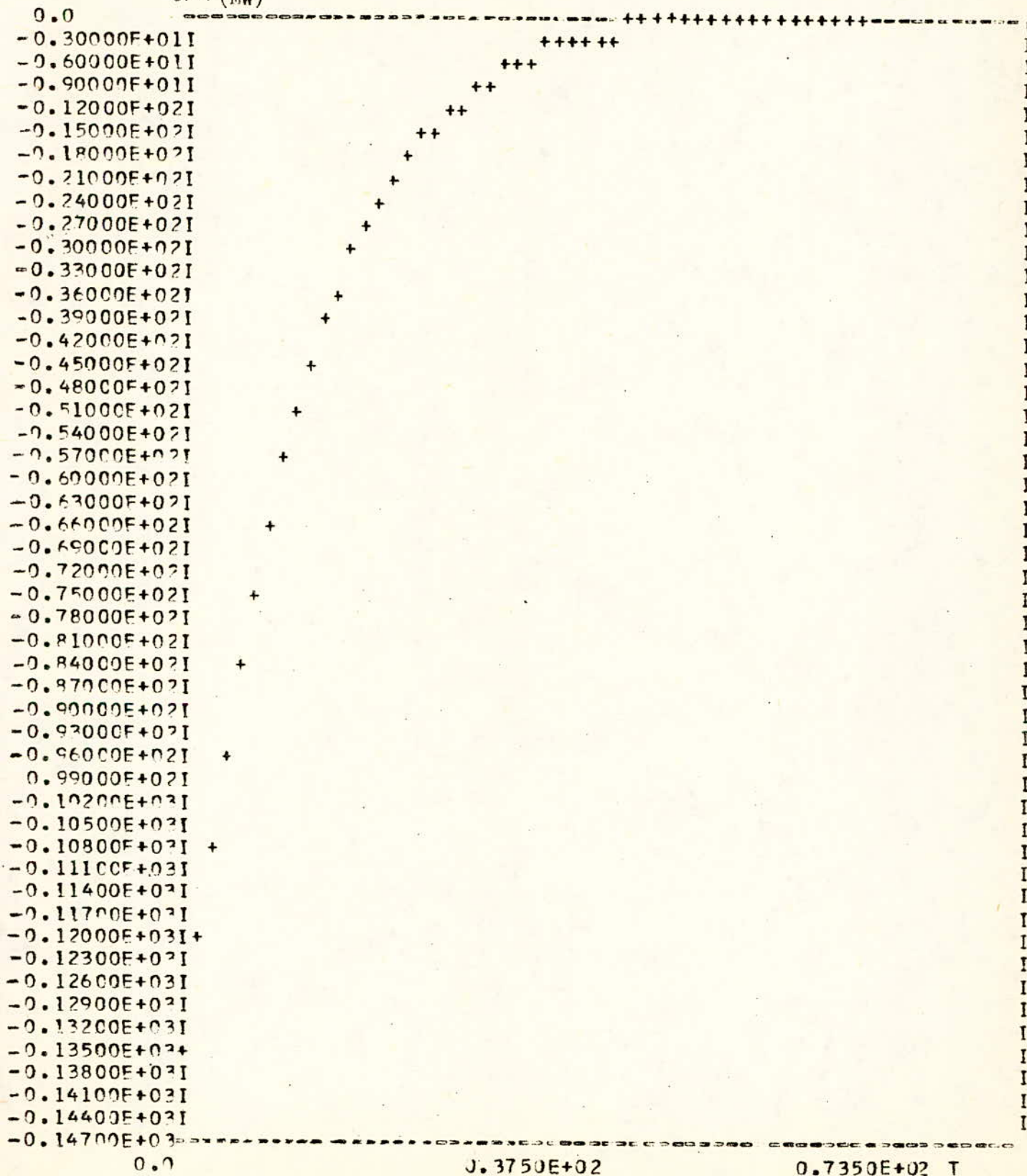
0.1500E+03

0.2940E+03 T

REPONSE DE PUISSANCE PN A UNE RAMPE DE REACTIVITE

PAS H=0.0134

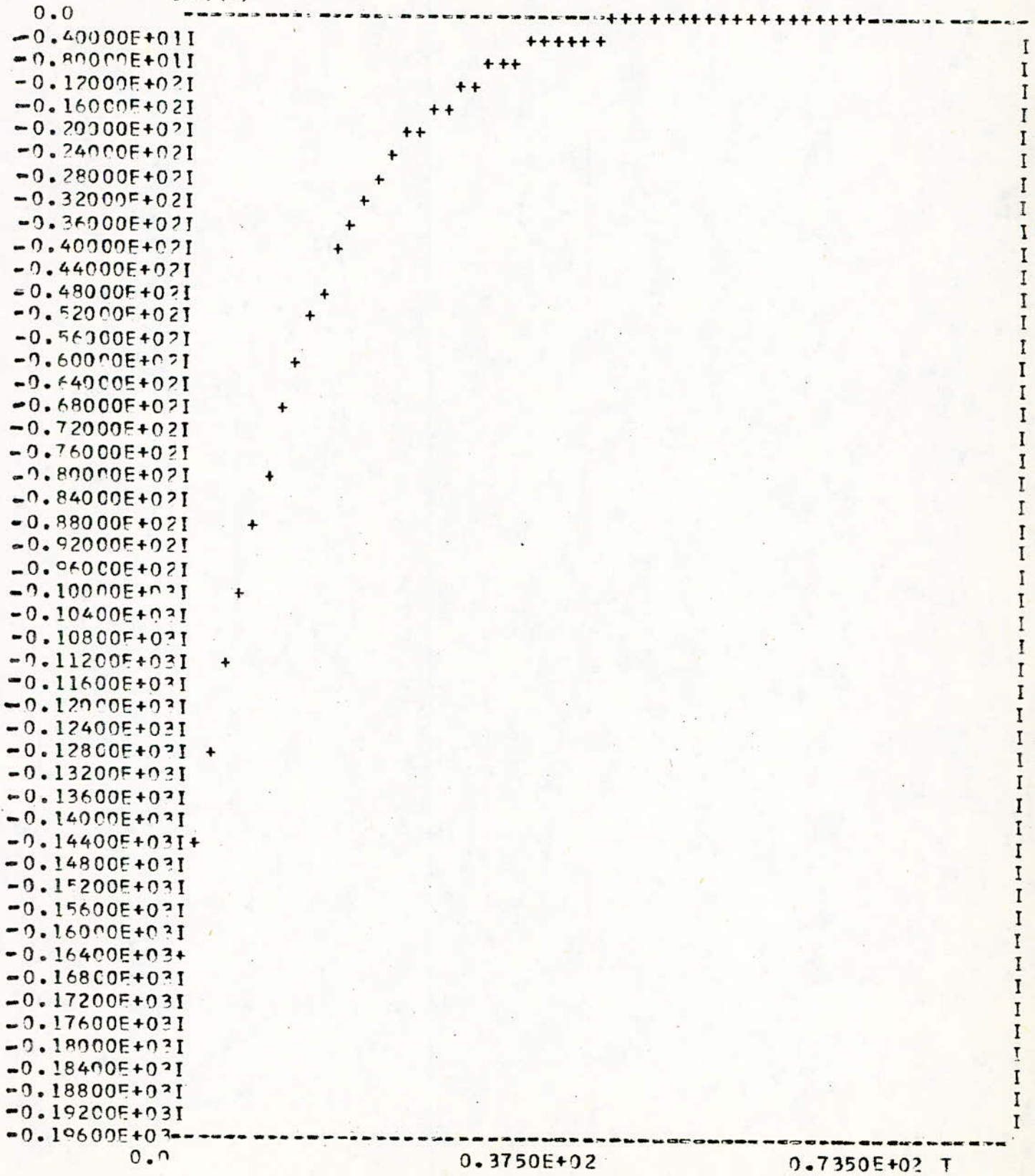
DPN (MW)



REPONSE DE TEMPERATURE DU MODERATEUR A UNE RAMPE DE REACTIVITE

PAS H=0.0134

DTM (C)



IV - RESULTATS SUR LES TRANSITOIRES

Nous présentons dans ce paragraphe les résultats sur des transitoires rapides Echelon et des transitoires lents rampe.

Les courbes obtenues décrivent la réponse naturelle du réacteur aux sollicitations suivantes :

- Echelon de réactivité de $\pm 10\%$ de la puissance nominale.
- Rampe de réactivité de $\pm 10\%$ de la puissance nominale.

V - ANALYSE DES COURBES

a) - Echelon de réactivité :

Comme l'échelon idéal n'existe pas, car chaque élément a un temps de réponse, cela revient à appliquer une rampe très raide de pente $10\% / 5\text{ s}$. Les sorties observées sont les variations δX du vecteur d'état, on remarque que lors de l'application de l'échelon de réactivité la variation de la puissance δP tend vers zéro, après un temps très court et bien déterminé, qui correspond au passage d'un état d'équilibre 100% à un autre état d'équilibre 90% ou bien de 90% à 100%.

La courbe de variation de la puissance nucléaire en fonction du temps montre que le système oscille avant de se stabiliser, et cela est dû à la brusque variation de la réactivité.

L'amplitude du 1er dépassement qui en résulte pendant le régime transitoire caractérise les performances dynamiques du système.

Plus cette amplitude est petite plus les performances sont meilleures.

On peut dire que la puissance, sous l'effet des neutrons prompts, atteint son état d'équilibre très rapidement (avec une constante de temps égale à la durée de vie moyenne des neutrons prompts), c'est ce qu'on appelle le saut prompts.

b) RAMPE DE REACTIVITE

Dans le cas où la commande varie en fonction du temps avec une pente de $5\%/mn$, les courbes obtenues représentent l'évolution entre la valeur initiale et la valeur que l'on doit atteindre.

Nous obtenons une série de courbes donnant la réponse de la puissance et la température du modérateur à cette rampe de réactivité.

La variation de la puissance est relative à la variation de la commande U et on remarque que le dépassement est beaucoup plus petit que dans le cas d'un échelon.

Les performances dynamiques sont donc meilleures, mais le temps nécessaire pour la stabilité du système à l'état désiré est beaucoup plus grand.

.../...

VI - CONCLUSIONS PRATIQUES SUR LES DEUX METHODES DE CALCUL

a - La méthode de CRANCK NICHLOSON

Nous remarquons que la stabilité de cette méthode dépend non seulement du pas d'intégration h mais essentiellement de la stabilité du système à intégrer.

Comme le système étudié est stable, nous avons fait plusieurs tests avec différentes valeurs du pas h par exemple pour :

$$h = 0,01$$

$$h = 0,1$$

$$h = 0,5$$

Nous avons alors constaté que pour $h = 0,5$ la méthode converge car les valeurs propres de Γ sont inférieures à 1 et pour lequel nous obtenons les meilleurs résultats.

(Voir annexe 1)

Le temps nécessaire pour que le système se stabilise dans le cas d'une entrée en échelon et de 40s, avec un dépassement de la puissance nucléaire est de 184 mw.

Tandis que dans le cas de la rampe le temps nécessaire est de 180 s et le 1° dépassement pour la puissance nucléaire est de 10 MW.

b - La méthode de RANGE KUTTA

Bien évidemment un des inconvénients principaux de cette méthode est le fait que la relation fonctionnelle suivante :

$$\frac{dy}{dx} = f(x, y) \text{ avec } y = y_0, x = x_0$$

Doit être évalué pour plusieurs couples de valeurs de $(x \text{ et } y)$ et ceci à chaque pas de calcul.

- D'autre part on constate que la difficulté de la méthode réside dans le choix du pas d'intégration car il doit être inférieur aux constantes de temps du système à résoudre, sinon la méthode ne converge pas.

Et c'est pour cela qu'on a pris un pas de calcul assez faible

$$\boxed{! H = 0,0134 !}$$

Car on a trouvé que pour $H > 0,0134$ la méthode diverge.

Vu que le pas choisit est faible \Rightarrow le calcul devient trop prohibitif.

Le temps nécessaire pour que le système soit stable dans le cas de l'échelon est égal à 35s avec un dépassement de 170 MW tandis que dans le cas d'une rampe le temps nécessaire pour que le système se stabilise et de 160s a peu près avec un dépassement très grand dont on n'a pas tenu compte.

<u>Pas de calcul</u>	Plus que le pas augmente plus que la stabilité de la méthode est meilleure	Le pas du calcul doit être assez faible relativement aux constantes de temps du système sinon la méthode diverge.
Temps d'exécution	Très faible. De l'ordre de 1 minute pour 1000 itérations	Très grand devant celui de CRANCK NICHOLSON de l'ordre de 4 mn pour 1000 itérations
Oscillations transitoires de la puissance nucléaire	Un dépassement de 184 MW dans le cas de l'échelon de (- 10% de la puissance nucléaire) c.a.d de 100% à 90 %. Cas de la rampe Un dépassement de 10 MW pour une diminution de 5%/mn de la puissance nucléaire.	Un dépassement de 170 MW dans le cas de l'échelon de 10 % de la puissance nucléaire c.a.d; de 90% à 100%. Cas de la rampe Un dépassement très important dont nous n'avons pas tenu compte (Pour une diminution de 5%/mn de la puissance nucléaire).

-o-CONCLUSION-o-

Ce travail n'est qu'un essai de simulation numérique, en boucle ouverte d'un réacteur nucléaire à l'aide de la **représentation d'état**.

En effet, le fonctionnement du réacteur a été approché par un modèle mathématique linéaire invariant de la forme $\dot{X} = A X + B U$. Ou U est la commande du système en boucle ouverte représentant la réactivité des barres de contrôle.

Néanmoins, les résultats **obtenus sont intéressants**.

Les programmes élaborés, malgré les simplifications et approximations apportées au modèle nous ont donné des sorties stables et comparables aux résultats obtenus avec des codes plus complets.

De plus ces programmes sont faciles à manipuler et offrent **des temps de calcul très intéressants** dans le cas de la méthode de

CRANK NICHOLSON. Ils nous ont permis entre autre d'avoir directement sur le listing l'allure des courbes représentant les sorties.

Il serait souhaitable que ce travail soit utilisé dans l'avenir pour l'étude du fonctionnement du réacteur en boucle **fermée**.

Nous espérons que les codes écrits soient suffisamment simples pour constituer un outil de travail et être applicable dans le cas des grands systèmes, ils serviront ainsi à simuler toute la centrale et prendre en compte la régulation du pressuriseur et la régulation du niveau d'eau dans les générateurs de vapeur.

- B I B L I O G R A P H I E -

(1) J. FURET

Contrôle et électronique des réacteurs nucléaires 1968.

(2) MALIKA AMINI

Commande optimale d'un réacteur PWR 900 MWe
thèse de magistère Novembre 1981 (C.S.T.N.)

(3) Jean-Marc MARTINEZ

Etude de deux systèmes de régulation d'une centrale
nucléaire calogène.
thèse de 3ème cycle Université de PARIS-SUD Juin 1980

(4) B. SAICHI et M. REZIE

Etude analogique du fonctionnement et de contrôle
d'une centrale P.W.R. 900 MWe.
thèse de magistère (C.S.T.N.) octobre 1978

(5) E.J. DAVISON

A High - order CRANCK NICHOLSON technique For solving
différential equation, computer.
vol. 10, PP 195-197, August 1967.

(6) JEAN GIRARD et WALTER J. KARPLUS

Traitement des équations différentielles sur calculateur
électronique. 1968

A N N E X E I

M E T H O D E D E C R A N C K N I C H O L S O N

```

C PROGRAMME PRINCIPAL DE LA METHODE DE CRANCK NICOLSON
REAL M(5,5),M1(5,5),M4(5,5),M2(5,5),M4(5,5),M3(5,5),M5(5,5)
REAL M6(5,5),Z(5),F(5),C(5),G(5),R(5)
DIMENSION IA(5,5),B(5,5),X(5),D(5,5),A(5,5)
DIMENSION S(5),V(5),P(5)
DIMENSION W(5)
DIMENSION TAB2(60),TAB3(60),TAB4(60),TAB5(60)
DIMENSION TAB(60),TAB1(60)
INTEGER GRAPHE(60,80)
REAL IPAS
DATA IBLANC,II,IMOINS,IPLUS/1H ,1H1,1H-,1H+/
N=5
DO 8 IM=1,N
DO 9 JM=1,N
M(IM,JM)=0
9 CONTINUE
8 CONTINUE
M(1,1)=160
M(1,2)=0.007
M(1,3)=0.71
M(1,4)=0.0025
M(1,5)=0.
M(2,1)=0.0025
M(2,2)=0.087
M(3,1)=0.0025
M(3,3)=0.71
M(4,1)=0.0037
M(4,4)=0.186
M(5,4)=0.385
M(5,5)=12.085
DO 6 L3=1,N
DO 7 L4=1,N
M5(L3,L4)=M(L3,L4)
7 CONTINUE
6 CONTINUE
DO 10 KM=1,N
X(KM)=0
10 CONTINUE
X(1)=270.
X(2)=2210.
X(3)=33600.
X(4)=0.7
X(5)=1.88
DO 12 IP=1,N
DO 13 JP=1,N
IA(IP,JP)=0
13 CONTINUE
12 CONTINUE
IA(1,1)=1
IA(2,2)=1
IA(3,3)=1
IA(4,4)=1
IA(5,5)=1
CALL MULM(N,M5,M1)
DO 16 K1=1,N
Z(K1)=0
16 CONTINUE
Z(1)=675.
H=0.1
MAXI=60
NB=30
IPAS=H*NB
E=(H*H)/4
CALL MUL2(M1,E,M4)
CALL MUL2(M,E,M6)
CALL MUL1(M6,Z,F)
CALL MUL(Z,E,S)
E=H/2
CALL MUL2(M,E,M2)
CALL MUL(Z,E,C)
CALL SORT(C,F,G)
CALL SUBG(C,M2,M3)
CALL SAM(M3,M4,B)
CALL INVMAT(B,N4,N)

```



```

CALL MUL1(N4,G,R)
CALL MUL1(N4,S,P)
CALL SUB1(C,F,G)
CALL MUL1(N4,G,F)
CALL SOM(IA,M2,M1)
CALL SAM(M4,M1,M)
CALL MULM(M,N4,M4)

```

```

T=0
PRINT 250
PRINT 300,(T,X(1),X(2),X(3),X(4),X(5))
TAB(1)=X(1)
TAB1(1)=214.5
TAB2(1)=X(2)
TAB3(1)=X(3)
TAB4(1)=X(4)
TAB5(1)=X(5)
C CAS D'UNE RAMPE
Y=120
DO 3 IV=1,59
DO 40 IK=1,NB
T=T+H
IF(T-Y)64,64,65
64 U1=-1.7875*T+214.5
U2=-1.7875
U3=(-1.7875*(T+H))+214.5
U4=-1.7875
GO TO 90
65 U1=0.
U2=0.
U3=0.
U4=0.
GO TO 90
90 CALL MUL(R,U1,C)
CALL MUL(P,U2,G)
CALL MUL(F,U3,S)
CALL MUL(Q,U4,Z)
DO 18 J1=1,N
W(J1)=0.
CONTINUE
DO 4 I=1,N
DO 5 L1=1,N
W(I)=W(I)+M4(I,L1)*X(L1)
CONTINUE
CONTINUE
DO 20 J2=1,N
X(J2)=W(J2)+C(J2)+G(J2)+S(J2)-Z(J2)
CONTINUE
CONTINUE
TAB(IV+1)=X(1)
TAB1(IV+1)=U1
TAB2(IV+1)=X(2)
TAB3(IV+1)=X(3)
TAB4(IV+1)=X(4)
TAB5(IV+1)=X(5)
T1=0.
T2=(MAXT/2)*IPAS
T3=(MAXT*IPAS)-IPAS
3 PRINT 300,(T,X(1),X(2),X(3),X(4),X(5))
PRINT 100
PRINT 150
PRINT 151
PRINT 160,(H)
PRINT 165,(NB)
PRINT 255
PRINT 900
CALL COURBE(H,TAB1,MAXT,GRAPHE,IPAS)
PRINT 600,(T1,T2,T3)
PRINT 100
PRINT 260
PRINT 261
PRINT 160,(H)
PRINT 165,(NB)
PRINT 255
PRINT 200
CALL COURBE(H,TAB,MAXT,GRAPHE,IPAS)

```

```

C CAS D'UN ECHELON
Y=5.
DO 3 IV=1,59
DO 40 IK=1,NB
T=T+H
IF(T-Y)64,64,65
64 U1=(-42.9*T)+214.5
U2=-42.9
U3=(-42.9*(T+H))+214.9
U4=-42.9

```

```

PRINT 600, (T1, T2, T3)
PRINT 100
PRINT 101
PRINT 102
PRINT 160, (H)
PRINT 165, (NB)
PRINT 255
PRINT 400
CALL COURBE(H, TAB2, MAXT, GRAPHE, IPAS)
PRINT 600, (T1, T2, T3)
PRINT 100
PRINT 103
PRINT 102
PRINT 160, (H)
PRINT 165, (NB)
PRINT 255
PRINT 500
CALL COURBE(H, TAB3, MAXT, GRAPHE, IPAS)
PRINT 600, (T1, T2, T3)
PRINT 100
PRINT 750
PRINT 751
PRINT 160, (H)
PRINT 165, (NB)
PRINT 255
PRINT 700
CALL COURBE(H, TAB4, MAXT, GRAPHE, IPAS)
PRINT 600, (T1, T2, T3)
PRINT 100
PRINT 850
PRINT 851
PRINT 255
PRINT 160, (H)
PRINT 165, (NB)
PRINT 800
CALL COURBE(H, TAB5, MAXT, GRAPHE, IPAS)
PRINT 600, (T1, T2, T3)
PRINT 100
FORMAT(//////////)
FORMAT(13X, 68(1H-))
FORMAT(22X, 'VARIATION DE LA COMMANDE EN FONCTION DU TEMPS')
FORMAT(21X, 47(1H-))
FORMAT(22X, 'PAS D ITERATION', 3X, 'H=', F6.3)
FORMAT(22X, 'NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS', 3X, 'NB=', F5.1)
FORMAT(15X, 'DPLI(MW)', 9X, 'T(S)', 9X, 'DPLI(MW)', 8X
*, 'DC1(MW)', 9X, 'DC2(MW)', 9X
*, 'DTU(DEG C)', 5X, 'DTM(DEG C)')
FORMAT(////)
255 FORMAT(21X, 'REPONSE DE LA PUISSANCE A UNE RAMPE DE REACTIVITE')
300 FORMAT(2X, E8.2, 4X, E12.5, 4X, E12.5, 4X, E12.5, 4X, E12.5, 4X, E12.5)
400 FORMAT(15X, 'DC1(MW)')
500 FORMAT(15X, 'DC2(MW)')
600 FORMAT(14X, E7.2, 23X, E7.2, 23X, E7.2, 3X, 'T')
700 FORMAT(15X, 'DTU(DEG C)')
750 FORMAT(15X, 'REPONSE DE LA TEMPERATURE D URANIUM A UNE RAMPE DE RE
*CTIVITE')
800 FORMAT(15X, 'DTM(DEG C)')
850 FORMAT(19X, 'REPONSE DE LA TEMPERATURE DU MODERATEUR A UNE RAMPE DE
*REACTIVITE')
900 FORMAT(16X, 'U')
261 FORMAT(21X, 51(1H-))
851 FORMAT(18X, 66(1H-))
101 FORMAT(14X, 'REPONSE DU 1ER GROUPE DES PRECURSEURS A UNE RAMPE DE
*REACTIVITE')
103 FORMAT(14X, 'REPONSE DU 2EME GROUPE DES PRECURSEURS A UNE RAMPE D
*E REACTIVITE')
751 FORMAT(14X, 65(1H-))
STOP
END

```

349
 348
 347
 346
 345
 344
 343
 342
 341
 340
 339
 338
 337
 336
 335
 334
 333
 332
 331
 330
 329
 328
 327
 326
 325
 324
 323
 322
 321
 320
 319
 318
 317
 316
 315
 314
 313
 312
 311
 310
 309
 308
 307
 306
 305

0008
 000C
 001C
 0024
 003C
 0032
 0033A
 0040
 0048
 0055A
 0055A
 006C
 0070
 007C
 007C
 0084
 0088
 0098
 00A0
 00A4
 00A8
 00B2
 00D0
 00E0
 00E6
 00F0
 00F4
 0104
 0134
 013C
 013C
 013E

```

C S/P POUR TRACER LES COURBES
  SUBROUTINE COURBE(H,TAB,MAXT,GRAPHE,IPAS)
  DIMENSION TAB(60),TAB1(60)
  DIMENSION TAB2(60),TAB3(60),TAB4(60),TAB5(60)
  REAL IPAS
  INTEGER GRAPHE(60,80)
  INTEGER U
  DATA IBLANC,II,IMOINS,IPLUS/1H,1HI,1H-,1H+/
C INITIALISATION DU TABLEAU A BLANC
  DO 3 I=1,60
  DO 4 J=1,80
    GRAPHE(I,J)=IBLANC
  CONTINUE
  CONTINUE
  VALMAX=TAB(1)
  CALL VAMAX(TAB,VALMAX)
  VALMIN=TAB(1)
  CALL VAMIN(TAB,VALMIN)
  U=IFIX((VALMAX-VALMIN)/60)+1
  IORIG=IFIX((VALMAX+U)/U)+1
C TRACE DE L'AXE DES ORDONNEES
  DO 1 I=1,60
  GRAPHE(I,1)=II
  CONTINUE
  CONTINUE
C TRACE DE L'AXE DES ABSCISSES
  DO 2 I=1,80
  GRAPHE(IORIG,I)=IMCINS
  CONTINUE
  T=0.
  DO 5 I=1,MAXT
  IABS=IFIX(T/IPAS)+1
  JORD=IFIX((VALMAX-TAB(I))/U)+1
  GRAPHE(JCRD,IABS)=IPLUS
  T=T+IPAS
  CONTINUE
  DO 7 I=1,60
  B=VALMAX-(I-1)*U
  PRINT 500,(B,(GRAPHE(I,J),J=1,80))
  CONTINUE
  500 FORMAT(E14.5,80A1)
  RETURN
  END
  
```

305
 306
 307
 308
 309
 310
 311
 312
 313
 314
 315
 316
 317
 318
 319
 320

0008
 000C
 0018
 0022
 0026
 002A
 0060
 006A
 0074
 0076

```

C S/P DE LA MULTIPLICATION D'UNE MATRICE PAR UN VECTEUR
  SUBROUTINE MIL1(N4,G,R)
  REAL N4(5,5),M6(5,5)
  DIMENSION G(5),R(5),Z(5),F(5)
  DIMENSION S(5),V(5),P(5)
  N=5
  DO 3 IT=1,N
  R(IT)=0
  CONTINUE
  DO 1 I=1,N
  DO 2 J=1,N
  R(I)=R(I)+N4(I,J)*G(J)
  CONTINUE
  CONTINUE
  RETURN
  END
  
```

```

C S/P POUR LA DETERMINATION DU MAXIMUM
  SUBROUTINE VAMAX(TAB,VALMAX)
  DIMENSION TAB(60),TAB1(60),TAB2(60),TAB3(60),TAB4(60),TAB5(60)
  NA=60
  DO 5 I=2,NA
  IF(VALMAX-TAB(I))4,6,6
  VALMAX=TAB(I)
  GO TO 5
  6 GO TO 5
  CONTINUE
  RETURN
  END
  
```

0008
 000C
 0026
 0032
 0034
 0036
 0040
 0042

74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
00
01
02
03
04

0008
000C
0010
003A
0044
004E
0050
0008
000C
0010
002C
0036
0040
0042

C

```
S/P DE L'INVERSION D'UNE MATRICE
SUBROUTINE INVMAT(A, AM1, A)
REAL M3(5,5), M4(5,5), M5(5,5)
DIMENSION A(5,5), AM1(5,5), B(5,5), D(5,5)
DO 81 I=1, N
DO 81 J=1, N
D(I, J)=A(I, J)
B(I, J)=0.
B(I, I)=1.
N1=N-1
DO 88 J=1, N
DO 82 K=1, N1
JO=K+1
DO 82 L=JO, N
B(L, J)=B(L, J)-(A(L, K)*B(K, J))/A(K, K)
DO 82 M=JO, N
A(L, M)=A(L, M)-(A(L, K)*A(K, M))/A(K, K)
DO 87 K=1, N
J1=N-K+1
J2=N-K+2
AM1(J1, J)=B(J1, J)
IF (J2=N) 83, 83, 86
DO 84 I=J2, N
AM1(J1, J)=AM1(J1, J)-A(J1, I)*AM1(I, J)
AM1(J1, J)=AM1(J1, J)/A(J1, J1)
CONTINUE
DO 88 L=1, N
DO 88 M=1, N
A(L, M)=D(L, M)
RETURN
END
```

81

82

83

84

86

87

88

C

```
S/P DE LA DIFFERENCE D'UNE MATRICE REELLE D'UNE MATRICE ENTIERE
SUBROUTINE SUB(TA, M2, M3)
REAL M2(5,5), M3(5,5)
DIMENSION TA(5,5)
N=5
DO 2 I=1, N
DO 1 J=1, N
M3(I, J)=TA(I, J)-M2(I, J)
CONTINUE
CONTINUE
RETURN
END
```

0008
000C
0010
003A
0044
004E
0050

N

25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36

0008
000C
0010
002C
0036
0040
0042

C

```
S/P DE LA MULTIPLICATION D'UNE MATRICE PAR UNE CONSTANTE
SUBROUTINE MUL2(M1, E, M4)
REAL M(5,5), M1(5,5), M4(5,5), M2(5,5), M4(5,5), M3(5,5), M5(5,5)
REAL M6(5,5), Z(5), F(5), C(5), G(5), R(5)
N=5
DO 2 I=1, N
DO 1 J=1, N
M4(I, J)=E*M1(I, J)
CONTINUE
CONTINUE
RETURN
END
```

1
2

C

```
S/P POUR LA DETERMINATION DU MINIMUM
SUBROUTINE VALMIN(TAB, VALMIN)
DIMENSION TAB(60), TAB1(60), TAB2(60), TAB3(60), TAB4(60), TAB5(60)
NA=60
DO 5 I=2, NA
IF (VALMIN-TAB(I)) 4, 4, 6
GO TO 5
VALMIN=TAB(I)
GO TO 5
CONTINUE
RETURN
END
```

0008
000C
0028
002A
0036
0038
0042
0044

4

6

5

214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224

00008
0000C
00010
00034
0003E
00048
0004A

```
C S/P DE LA SOMME DE DEUX MATRICES
SUBROUTINE SAM(M1,M4,M)
REAL M1(5,5),M(5,5),M4(5,5),M3(5,5),B(5,5)
N=5
DO 1 I=1,N
DO 2 J=1,N
M(I,J)=M1(I,J)+M4(I,J)
CONTINUE
CONTINUE
RETURN
END
```

262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273

00008
0000C
00010
00026
0002A
00068
00086
0008A

```
C S/P DE LA MULTIPLICATION DE DEUX MATRICES
SUBROUTINE MULM(M,M5,M1)
REAL M(5,5),M1(5,5),M5(5,5),M4(5,5),M4(5,5)
N=5
DO 2 I=1,N
DO 3 K=1,N
M1(I,K)=0
DO 2 J=1,N
M1(I,K)=M1(I,K)+M(I,J)*M5(J,K)
CONTINUE
CONTINUE
RETURN
END
```

321
322
323
324
325
326
327
328
329
330

00008
0000C
00024
0002E
00030

```
C S/P DE LA MULTIPLICATION D'UN VECTEUR PAR UNE MATRICE
SUBROUTINE MUL(Z,E,C)
DIMENSION Z(5),C(5),R(5)
DIMENSION S(5),P(5),G(5),F(5)
N=5
DO 1 I=1,N
C(I)=E+Z(I)
CONTINUE
RETURN
END
```

331
332
333
334
335
336
337
338
339

00008
0000C
0002C
00036
00038

```
C S/P DE LA SOMME DE DEUX VECTEURS
SUBROUTINE SOM1(C,F,G)
DIMENSION C(5),F(5),G(5)
N=5
DO 1 I=1,N
G(I)=C(I)+F(I)
CONTINUE
RETURN
END
```

260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348

00008
0000C
00010
0003A
0004E
00050

2

```
C S/P DE LA SOMME D'UNE MATRICE REELLE ET D'UNE MATRICE ENTIERE
SUBROUTINE SOM(M1,M2,B)
REAL M2(5,5),B(5,5)
DIMENSION M1(5,5)
N=5
DO 2 I=1,N
DO 1 J=1,N
B(I,J)=M1(I,J)+M2(I,J)
CONTINUE
CONTINUE
RETURN
END
```

340
341
342
343
344
345
346
347
348

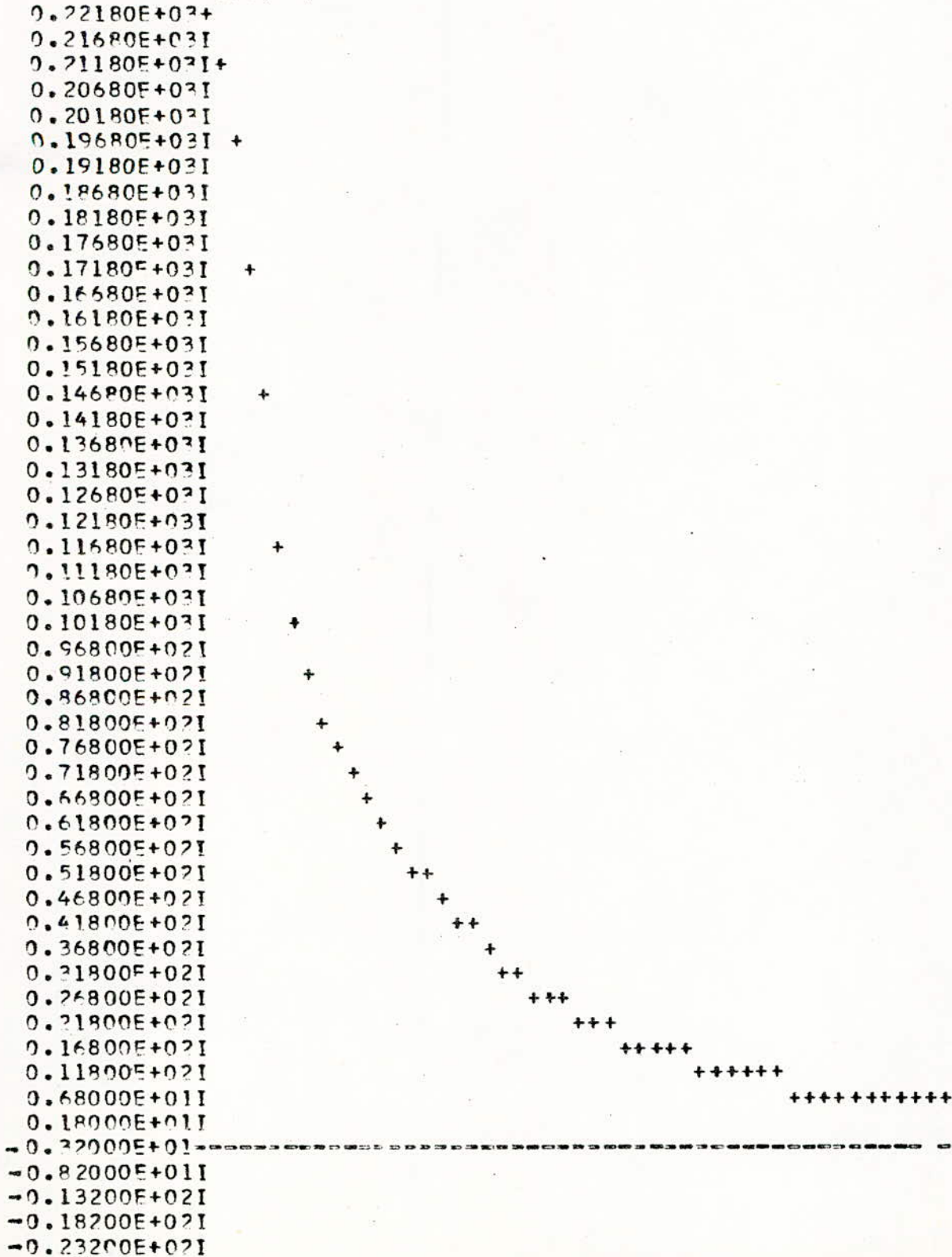
00008
0000C
0002C
00036
00038

```
C S/P DE LA DIFFERENCE DE DEUX VECTEURS
SUBROUTINE SUB1(C,F,G)
DIMENSION C(5),F(5),G(5)
N=5
DO 1 I=1,N
G(I)=C(I)-F(I)
CONTINUE
RETURN
END
```

REPONSE DE IER GROUPE DES PRECURSEURS A UN ECHELON DE REACTIVITE

PAS D ITERATION H= 0.500
 NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 2

DCI(MW)



REPONSE DU 2EME GROUPE DES PRECURSEURS A UN ECHELON DE REACTIVITE

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 2

CC2(MW)

0.33600E+03+
 0.32500E+03I
 0.31400E+03I
 0.30300E+03I
 0.29200E+03I
 0.28100E+03I
 0.27000E+03I
 0.25900E+03I
 0.24800E+03I
 0.23700E+03I+
 0.22600E+03I
 0.21500E+03I
 0.20400E+03I
 0.19300E+03I
 0.18200E+03I
 0.17100E+03I
 0.16000E+03I
 0.14900E+03I
 0.13800E+03I
 0.12700E+03I
 0.11600E+03I +
 0.10500E+03I
 0.94000E+02I
 0.83000E+02I
 0.72000E+02I
 0.61000E+02I
 0.50000E+02I
 0.39000E+02I
 0.28000E+02I
 0.17000E+02I
 0.60000E+01I
 0.50000E+01I
 -0.16000E+02I +
 -0.27000E+02I
 -0.38000E+02I
 -0.49000E+02I +
 -0.60000E+02I
 -0.71000E+02I
 -0.82000E+02I
 -0.93000E+02I
 -0.10400E+03I +
 -0.11500E+03I +
 -0.12600E+03I
 -0.13700E+03I
 -0.14800E+03I
 -0.15900E+03I +
 -0.17000E+03I
 -0.18100E+03I
 -0.19200E+03I
 -0.20300E+03I +

+++++

+ ++++++

.0

.250E+02

.390E+02 T

REPONSE DE LA TEMPERATURE D URANIUM A UN ECHELON DE REACTIVITE

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 2

DTU(DEG C)

0.52700E+02+
 0.50700E+02I
 0.48700E+02I+
 0.46700E+02I
 0.44700E+02I
 0.42700E+02I
 0.40700E+02I +
 0.38700E+02I
 0.36700E+02I
 0.34700E+02I
 0.32700E+02I
 0.30700E+02I +
 0.28700E+02I
 0.26700E+02I
 0.24700E+02I
 0.22700E+02I
 0.20700E+02I +
 0.18700E+02I
 0.16700E+02I
 0.14700E+02I
 0.12700E+02I
 0.10700E+02I
 0.87000E+01I +
 0.67000E+01I
 0.47000E+01I +
 0.27000E+01I +
 0.70000E+00I ++++++

 -0.13000E+01
 -0.33000E+01I
 -0.53000E+01I
 -0.73000E+01I
 -0.93000E+01I
 -0.11300E+02I
 -0.13300E+02I
 -0.15300E+02I
 -0.17300E+02I
 -0.19300E+02I
 -0.21300E+02I
 -0.23300E+02I
 -0.25300E+02I
 -0.27300E+02I
 -0.29300E+02I
 -0.31300E+02I
 -0.33300E+02I
 -0.35300E+02I
 -0.37300E+02I
 -0.39300E+02I
 -0.41300E+02I
 -0.43300E+02I
 -0.45300E+02I

.0

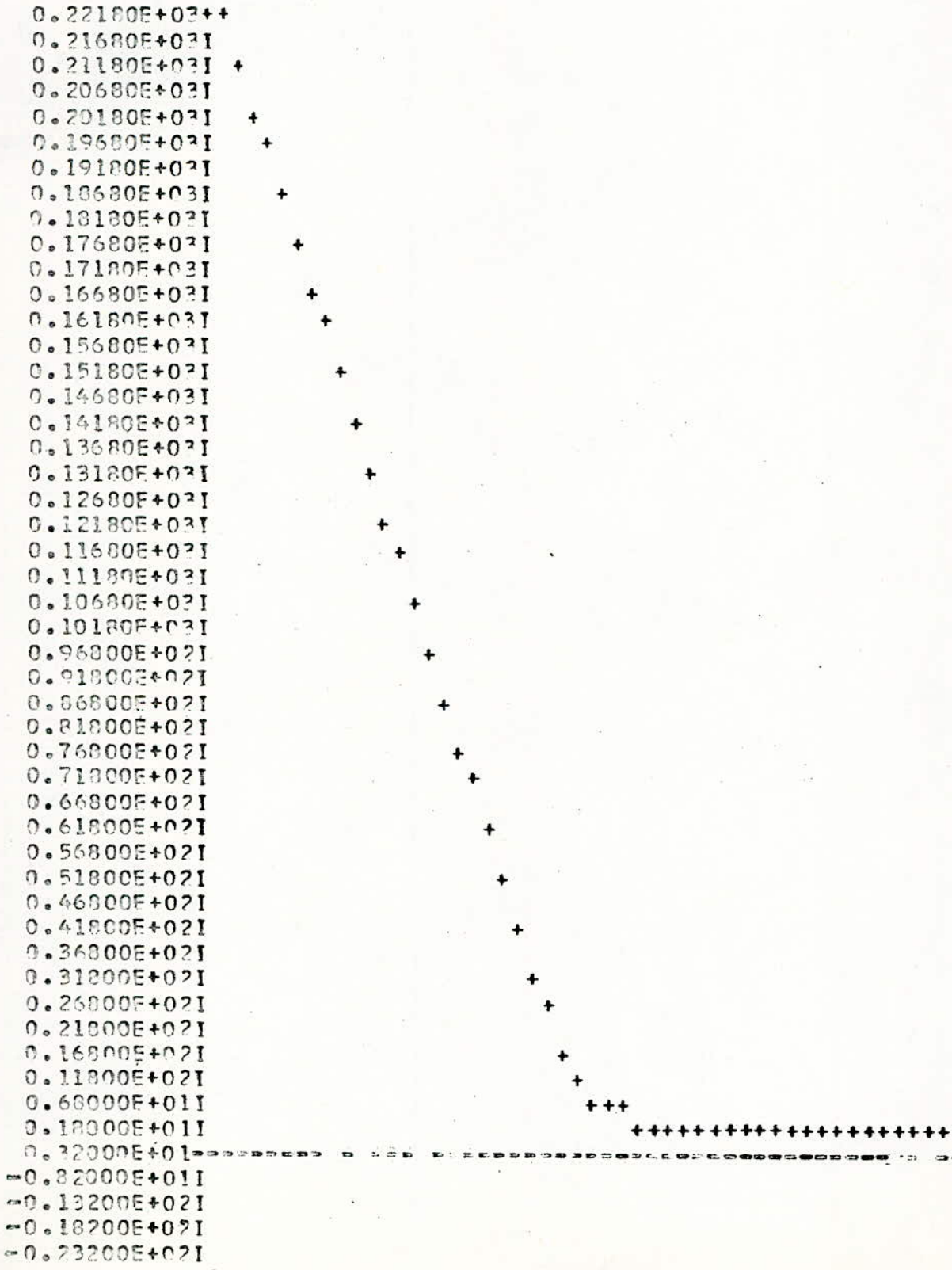
-10-.250E+02

.390E+02 T

REPONSE DE 1ER GROUPE DES PRECURSEURS A UNE RAMPE DE REACTIVITE

PAS D ITERATION H= 0.500
 NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 10

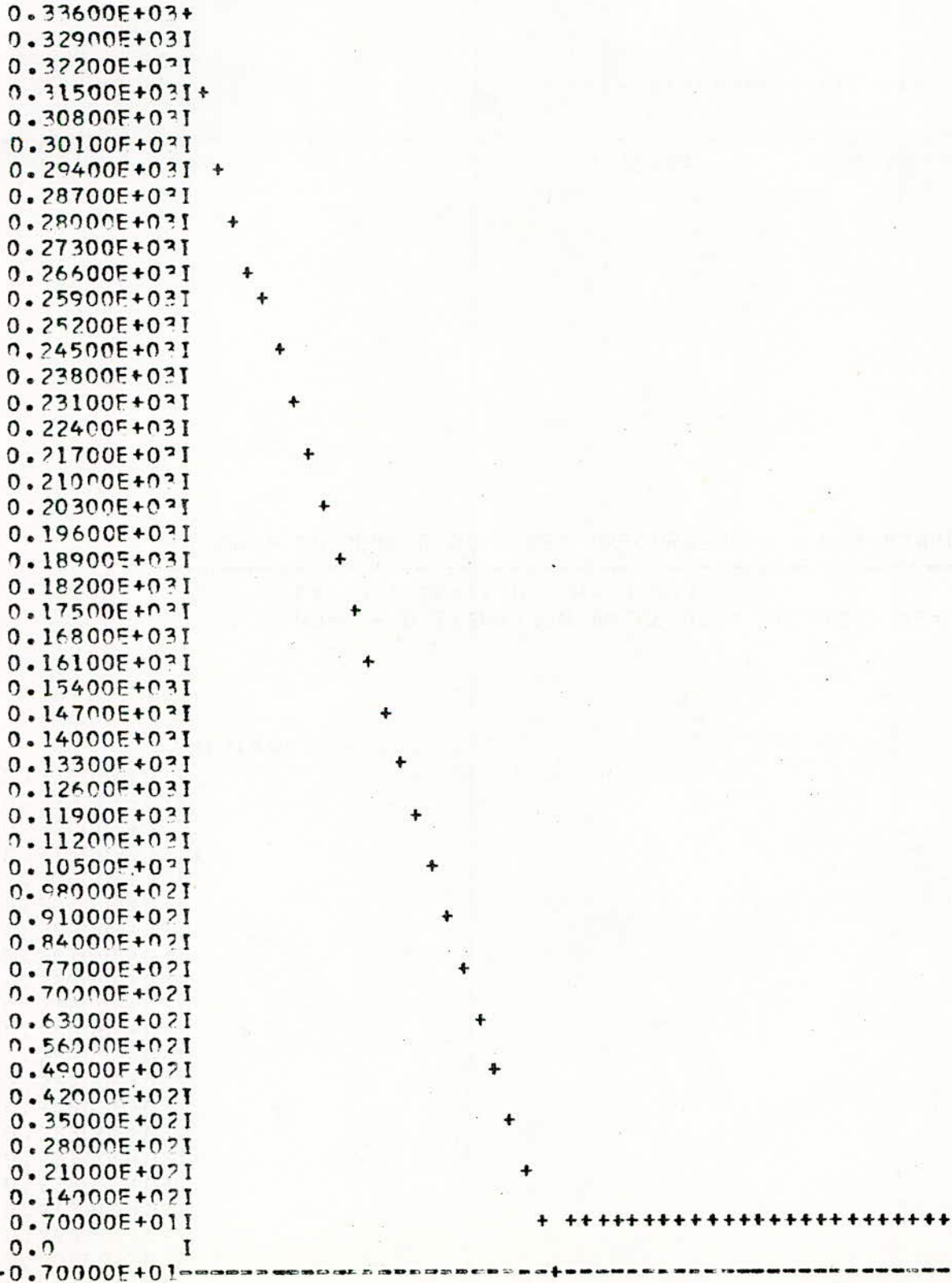
DCI(MW)



REPONSE DU 2EME GROUPE DES PRECURSEURS A UNE RAMPE D E REACTIVITE

PAS D ITERATION H= 0.500
 NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 10

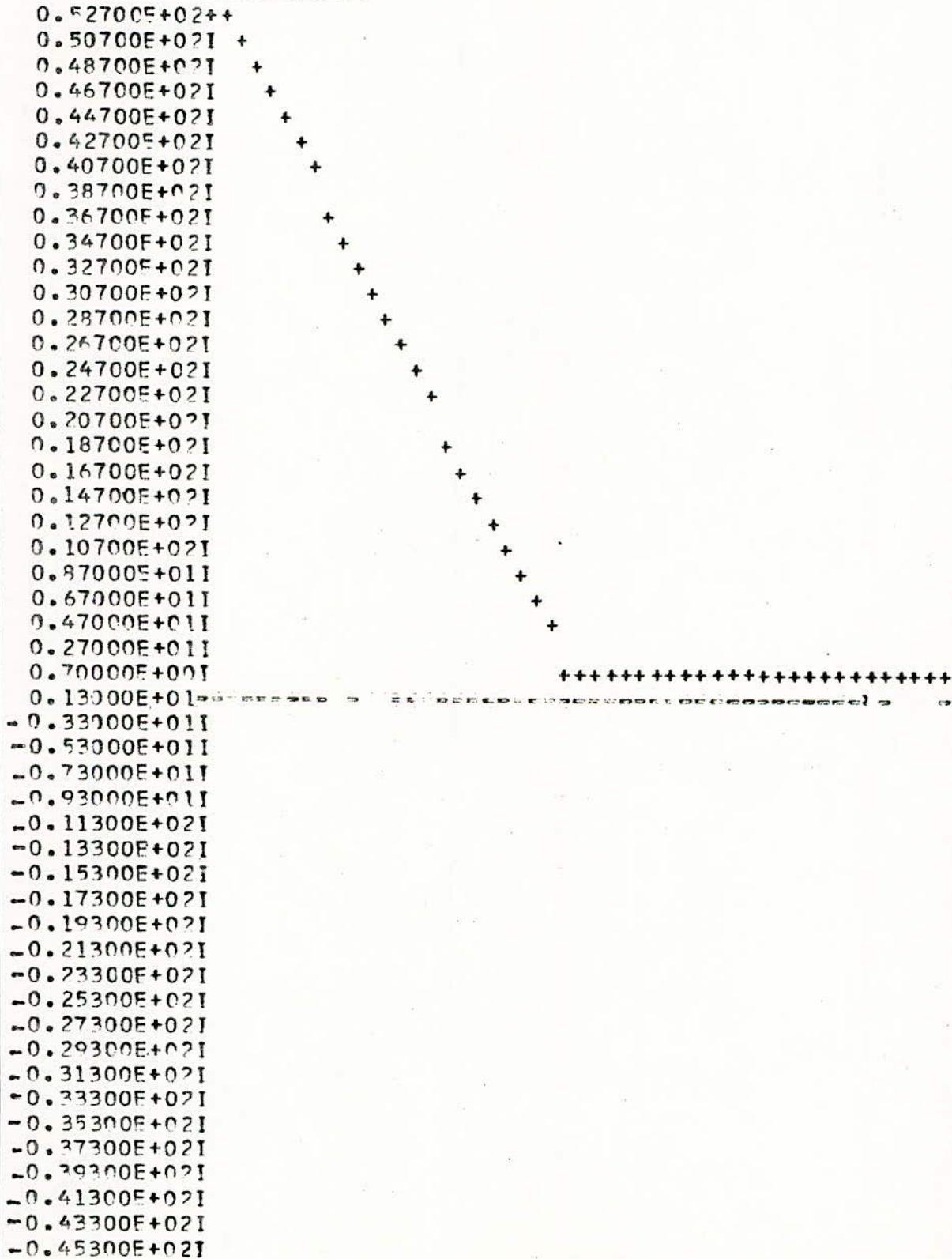
CC2(MW)



REPONSE DE LA TEMPERATURE D URANIUM A UNE RAMPE DE REACTIVITE

PAS D ITERATION H= 0.500
 NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS NB= 10

DTU(DEG C)



.0

.125E+03

.195E+03 T

 VALEURS PROPRES DU SYSTEME

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
Re(λ)	-.1600D+03	-.1201D+02	-.5046D+00	-.5046D+00	-.8009D-01
	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00
Im(λ)	.0000D+00	.0000D+00	.4060D+00	-.4060D+00	.0000D+00
	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00

Valeurs propres de la matrice Γ

 STABILITE DE LA METHODE POUR H=0.1

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
Re(λ)	.3890D+00	.7808D+00	.9527D+00	.9527D+00	.9792D+00
	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00
Im(λ)	.0000D+00	.0000D+00	.4351D-01	-.4351D-01	.0000D+00
	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00

 STABILITE DE LA METHODE POUR H=0.5

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
Re(λ)	.5367D+00	.7440D+00	.7440D+00	.9512D+00	.9603D+00
	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00
Im(λ)	.0000D+00	.1564D+00	-.1564D+00	.0000D+00	.0000D+00
	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00

 STABILITE DE LA METHODE POUR H=0.001

	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5
Re(λ)	.8528D+00	.9998D+00	.3360D+05	.9993D+00	.9999D+00
	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00
Im(λ)	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00
	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00	.0000D+00

RESULTATS D ITERATION

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS

NB= 2

CAS D'UN FOISSON

T(S)	DDJ1(MW)	DD1(MW)	DD2(MW)	DTU(DEG C)	DTM(DEG C)
0.0	0.27000E+03	0.22180E+06	0.33600E+05	0.52700E+02	0.18300E+01
0.10E+01	0.12205E+03	0.21151E+06	0.23533E+05	0.48701E+02	0.16039E+01
0.20E+01	0.18851E+02	0.19315E+06	0.10540E+05	0.39707E+02	0.13060E+01
0.30E+01	-0.63687E+02	0.16993E+06	-0.16231E+04	0.20626E+02	0.97641E+00
0.40E+01	-0.12874E+03	0.14393E+06	-0.11922E+05	0.18875E+02	0.63148E+00
0.50E+01	-0.19493E+03	0.11624E+06	-0.20526E+05	0.79922E+01	0.28428E+00
0.60E+01	0.83882E+02	0.98926E+05	-0.16760E+05	0.25100E+01	0.10537E+00
0.70E+01	-0.24284E+02	0.87937E+05	-0.10620E+05	0.11271E+01	0.39251E-01
0.80E+01	-0.82270E+01	0.80372E+05	-0.54014E+04	0.83463E+00	0.26643E-01
0.90E+01	0.11721E+01	0.74451E+05	-0.19492E+04	0.10837E+01	0.33619E-01
0.10E+02	0.26361E+01	0.69249E+05	-0.56538E+02	0.13922E+01	0.43760E-01
0.11E+02	0.12727E+01	0.64374E+05	0.77716E+02	0.10745E+01	0.50780E-01
0.12E+02	-0.59301E+00	0.59709E+05	0.10125E+04	0.15830E+01	0.52589E-01
0.13E+02	-0.19779E+01	0.55254E+05	0.06970E+02	0.16656E+01	0.52132E-01
0.14E+02	-0.27139E+01	0.51040E+05	0.83339E+02	0.15833E+01	0.50622E-01
0.15E+02	-0.29257E+01	0.47095E+05	0.69210E+02	0.14735E+01	0.47180E-01
0.16E+02	-0.28404E+01	0.43427E+05	0.57765E+02	0.1574E+01	0.42495E-01
0.17E+02	-0.25905E+01	0.40036E+05	0.49409E+02	0.12456E+01	0.39220E-01
0.18E+02	-0.22912E+01	0.36907E+05	0.43500E+02	0.11426E+01	0.36619E-01
0.19E+02	-0.19086E+01	0.34025E+05	0.39219E+02	0.10423E+01	0.33626E-01
0.20E+02	-0.17362E+01	0.31369E+05	0.35907E+02	0.96501E+00	0.30927E-01
0.21E+02	-0.15093E+01	0.28923E+05	0.33134E+02	0.84855E+00	0.28470E-01
0.22E+02	-0.13152E+01	0.26668E+05	0.30664E+02	0.31834E+00	0.26235E-01
0.23E+02	-0.11488E+01	0.24590E+05	0.28384E+02	0.75424E+00	0.24189E-01
0.24E+02	-0.10047E+01	0.22675E+05	0.26250E+02	0.61618E+00	0.22305E-01
0.25E+02	-0.87873E+00	0.20903E+05	0.24250E+02	0.64202E+00	0.20509E-01
0.26E+02	-0.76789E+00	0.19279E+05	0.22381E+02	0.59209E+00	0.18970E-01
0.27E+02	-0.66994E+00	0.17777E+05	0.20644E+02	0.54529E+00	0.17494E-01
0.28E+02	-0.58223E+00	0.16392E+05	0.19035E+02	0.50347E+00	0.16128E-01
0.29E+02	-0.50646E+00	0.15115E+05	0.17549E+02	0.46425E+00	0.14376E-01
0.30E+02	-0.43856E+00	0.13937E+05	0.16178E+02	0.42808E+00	0.13707E-01

-9-

0.31E+02	-0.27859E+01	0.12851E+05	0.14915E+03	0.39472E+07	0.12648E-01
0.32E+02	-0.32570E+00	0.11850E+05	0.13751E+03	0.3396E+07	0.11663E-01
0.33E+02	-0.27914E+00	0.10927E+05	0.12677E+03	0.3350E+07	0.10754E-01
0.34E+02	-0.23822E+00	0.10075E+05	0.11688E+03	0.30944E+07	0.99162E-02
0.35E+02	-0.20231E+00	0.92904E+04	0.10777E+03	0.2533E+07	0.91436E-02
0.36E+02	-0.17084E+00	0.85666E+04	0.99362E+02	0.26309E+07	0.84312E-02
0.37E+02	-0.14333E+00	0.78991E+04	0.91613E+02	0.2259E+07	0.77743E-02
0.38E+02	-0.11931E+00	0.72837E+04	0.84468E+02	0.20626E+07	0.71686E-02
0.39E+02	-0.98381E-01	0.67162E+04	0.77880E+02	0.19018E+07	0.66100E-02
0.40E+02	-0.80193E-01	0.61929E+04	0.71807E+02	0.17536E+07	0.60950E-02
0.41E+02	-0.64423E-01	0.57103E+04	0.66206E+02	0.16170E+07	0.56201E-02
0.42E+02	-0.50786E-01	0.52654E+04	0.61043E+02	0.14910E+07	0.51823E-02
0.43E+02	-0.39031E-01	0.48552E+04	0.56282E+02	0.13748E+07	0.47785E-02
0.44E+02	-0.28934E-01	0.44769E+04	0.51893E+02	0.12677E+07	0.44062E-02
0.45E+02	-0.20294E-01	0.41280E+04	0.47846E+02	0.11639E+07	0.40629E-02
0.46E+02	-0.12935E-01	0.38064E+04	0.44115E+02	0.10778E+07	0.37463E-02
0.47E+02	-0.66996E-02	0.35098E+04	0.40675E+02	0.9391E+06	0.34544E-02
0.48E+02	-0.14495E-02	0.32364E+04	0.37504E+02	0.91637E+06	0.31853E-02
0.49E+02	-0.29407E-02	0.29842E+04	0.34580E+02		0.29371E-02

RESULTATS D ITERATION

PAS D ITERATION H= 0.500

NOMBRE D ITERATION ENTRE DEUX POINTS

NB= 10

CAS D'UNE RAMPE

T (S)	DPU I (MW)	DC1 (MW)	DC2 (MW)	DTU (DEG C)	ETM (DEG C)
0.0	0.27000E+03	0.22180E+06	0.33600E+05	0.52700E+02	0.18800E+01
0.50E+01	0.24744E+03	0.21810E+06	0.31060E+05	0.52574E+02	0.16766E+01
0.10E+02	0.23665E+03	0.20978E+06	0.29293E+05	0.50190E+02	0.16002E+01
0.15E+02	0.22541E+03	0.20138E+06	0.27959E+05	0.4951E+02	0.1528E+01
0.20E+02	0.21412E+03	0.19278E+06	0.26594E+05	0.4575E+02	0.14573E+01
0.25E+02	0.20289E+03	0.18403E+06	0.25227E+05	0.43455E+02	0.1386E+01
0.30E+02	0.19170E+03	0.17518E+06	0.23858E+05	0.41291E+02	0.13138E+01
0.35E+02	0.18051E+03	0.16627E+06	0.22489E+05	0.38946E+02	0.12419E+01
0.40E+02	0.16934E+03	0.15732E+06	0.21120E+05	0.3639E+02	0.11700E+01
0.45E+02	0.15818E+03	0.14834E+06	0.19750E+05	0.34432E+02	0.10981E+01
0.50E+02	0.14702E+03	0.13934E+06	0.18380E+05	0.32173E+02	0.10252E+01
0.55E+02	0.13586E+03	0.13033E+06	0.17010E+05	0.29915E+02	0.95423E+00

0.60E+02	0.12470E+03	0.12131E+06	0.15639E+05	0.27656E+02	0.88227E+00
0.65E+02	0.11354E+03	0.11229E+06	0.14269E+05	0.2397E+02	0.81030E+00
0.70E+02	0.10238E+03	0.10326E+06	0.12899E+05	0.23138E+02	0.73813E+00
0.75E+02	0.91222E+02	0.94226E+05	0.11528E+05	0.20879E+02	0.66635E+00
0.80E+02	0.80064E+02	0.85193E+05	0.10158E+05	0.1620E+02	0.59438E+00
0.85E+02	0.68907E+02	0.76158E+05	0.87870E+04	0.16350E+02	0.52240E+00
0.90E+02	0.57750E+02	0.67123E+05	0.74165E+04	0.1101E+02	0.45043E+00
0.95E+02	0.46592E+02	0.58089E+05	0.60461E+04	0.11842E+02	0.37845E+00
0.10E+03	0.35434E+02	0.49055E+05	0.46756E+04	0.95825E+01	0.30647E+00
0.11E+03	0.24276E+02	0.40019E+05	0.33051E+04	0.7232E+01	0.23450E+00
0.11E+03	0.13118E+02	0.30984E+05	0.19346E+04	0.50639E+01	0.16252E+00
0.12E+03	0.19601E+01	0.21948E+05	0.56415E+03	0.28046E+01	0.90542E-01
0.12E+03	-0.91977E+01	0.12912E+05	0.80635E+03	0.54524E+00	0.18564E-01
0.13E+03	-0.99059E+00	0.83096E+04	0.68305E+02	0.22638E+00	0.72006E-02
0.13E+03	-0.77537E+00	0.55768E+04	0.70825E+02	0.17251E+00	0.55256E-02
0.14E+03	-0.45040E+00	0.37163E+04	0.43073E+02	0.11426E+00	0.36589E-02
0.14E+03	-0.25498E+00	0.24772E+04	0.28837E+02	0.76115E-01	0.24355E-02
0.15E+03	-0.14340E+00	0.16513E+04	0.19215E+02	0.5737E-01	0.16251E-02
0.15E+03	-0.79431E-01	0.11007E+04	0.12799E+02	0.33817E-01	0.10823E-02
0.16E+03	-0.43146E-01	0.73372E+03	0.85261E+01	0.2540E-01	0.72209E-03
0.16E+03	-0.22815E-01	0.48909E+03	0.56801E+01	0.15024E-01	0.48134E-03
0.17E+03	-0.11601E-01	0.32602E+03	0.37842E+01	0.10014E-01	0.32086E-03
0.17E+03	-0.55446E-02	0.21732E+03	0.25213E+01	0.6745E-02	0.21388E-03
0.18E+03	-0.23693E-02	0.14486E+03	0.16800E+01	0.44439E-02	0.14257E-03
0.18E+03	-0.77454E-03	0.96565E+02	0.11194E+01	0.24654E-02	0.95039E-04
0.19E+03	-0.27956E-04	0.64369E+02	0.74592E+00	0.19756E-02	0.63353E-04
0.19E+03	-0.27760E-03	0.42908E+02	0.49706E+00	0.13175E-02	0.42231E-04
0.20E+03	-0.36474E-03	0.28602E+02	0.33124E+00	0.8821E-03	0.28151E-04
0.20E+03	-0.35216E-03	0.19066E+02	0.22074E+00	0.58538E-03	0.18715E-04
0.21E+03	-0.30088E-03	0.12709E+02	0.14711E+00	0.39019E-03	0.12509E-04
0.21E+03	-0.24065E-03	0.84717E+01	0.98039E-01	0.26019E-03	0.83382E-05
0.22E+03	-0.18474E-03	0.56472E+01	0.65338E-01	0.17337E-03	0.55582E-05
0.22E+03	-0.13790E-03	0.37644E+01	0.43545E-01	0.1556E-03	0.37051E-05
0.23E+03	-0.10088E-03	0.25093E+01	0.29022E-01	0.77032E-04	0.24658E-05
0.23E+03	-0.72679E-04	0.16727E+01	0.19343E-01	0.5347E-04	0.1643E-05
0.24E+03	-0.51744E-04	0.11150E+01	0.12892E-01	0.34227E-04	0.10974E-05
0.24E+03	-0.36492E-04	0.74323E+00	0.85925E-02	0.22815E-04	0.73153E-06
0.25E+03	-0.25536E-04	0.49543E+00	0.57271E-02	0.1218E-04	0.48764E-06

A N N E X E II

M E T H O D E D E R U N G E K U T T A



PROGRAMME PRINCIPAL DE LA

METHODE DE RUNGE

KUTTA

DIMENSION X(5), A(5,5), T1(5), T2(5), T3(5), T4(5), B(5)
 DIMENSION TAB(60), TAB1(60), TAB2(60), TAB3(60), TAB4(60), TAB5(60)
 INTEGER GRAPHE(60,62)
 DATA IRLANC, II, IMOINS, IPLUS/1H, 1HT, 1H-, 1H+/
 N=5

```

0006 DO 1 J=1,N
000A DO 1 I=1,N
000E 1 A(I,J)=0.
0032 A(1,1)=-160.
003C A(1,2)=0.087
0042 A(1,3)=0.71
0048 A(1,4)=-2025.
0054 A(1,5)=-20250.
0060 A(2,1)=71.5
0066 A(2,2)=-0.087
0072 A(3,1)=88.5
0078 A(3,3)=-0.71
0084 A(4,1)=0.037
008A A(4,4)=-0.186
0096 A(4,5)=0.186
009C A(5,4)=0.186
00A2 A(5,5)=-12.085
00AE 4 DO 4 I=1,N
00B2 X(I)=0
00CE X(1)=-270.
00D8 X(2)=-221897.7
00E4 X(3)=-33654.9
00F0 X(4)=-52.7
00FC X(5)=-1.88
0108 5 DO 5 I=1,N
010C B(I)=0
0128 B(1)=675.
012C H=0.0134
0130 NB=300
0134 IPAS=H*NB
013E MAXT=60
0142 T5=0.
0146 T6=(MAXT/2)*IPAS
0150 T7=(MAXT*IPAS)-IPAS
015A T=0.
015E PRINT 300, (T, X(1), X(2), X(3), X(4), X(5))
019C DO 2 I=1,60
01A0 TAB1(I)=0.
01AC TAB2(I)=0.
01BE TAB4(I)=0.
01D0 TAB3(I)=0.
01E2 TAB5(I)=0.
01EE 2 TAB(I)=0.
0202 TAB(1)=100.*X(5)
020E TAB1(1)=X(4)

```

```

055      TAB4(1)=X(1)
056      TAB3(1)=X(3)
057      TAB2(1)=X(2)
058      DO 7 IPI=1,49
059      DO 3 I=1,200
060      CALL MIG1(N,H,X,A,T,B,T1)
061      CALL MIG2(N,H,X,A,B,T,T1,T2)
062      CALL MIG3(N,H,X,A,B,T,T2,T3)
063      CALL MIG4(N,H,X,A,B,T,T3,T4)
064      IF(T-120)11,11,8
065      11 U=1.7875*T-214.5
066      GO TO 122
067      8 U=0.
068      122 T=T+H.
069      DO 3 J=1,N
070      3 X(J)=X(J)+(T1(J)+2.*T2(J)+2.*T3(J)+T4(J))/6
071      TAB5(IPI+1)=1000.*U
072      TAB(IPI+1)=100.*X(5)
073      TAB1(IPI+1)=X(4)
074      TAB4(IPI+1)=X(1)
075      TAB2(IPI+1)=X(2)
076      TAB3(IPI+1)=X(3)
077      7 PRINT 300,(T,X(1),X(2),X(3),X(4),X(5))
078      PRINT 100
079      PRINT 400
080      PRINT 20
081      PRINT 12
082      PRINT 900
083      VALMAX=0.
084      VALMIN=167
085      CALL COURBE(H,TAB,VALMAX,VALMIN,MAXT)
086      PRINT 50,(T5,T6,T7)
087      PRINT 100
088      PRINT 200
089      PRINT 20
090      PRINT 12
091      PRINT 950
092      VALMA=0.
093      VALMI=-52
094      CALL COURBE(H,TAB1,VALMA,VALMI,MAXT)
095      PRINT 50,(T5,T6,T7)
096      PRINT 100
097      PRINT 16
098      PRINT 20
099      PRINT 12
100      PRINT 350
101      VALMA1=0.
102      VALMI1=-1690700.
103      CALL COURBE(H,TAB2,VALMA1,VALMI1,MAXT)
104      PRINT 50,(T5,T6,T7)
105      PRINT 100
106      PRINT 17
107      PRINT 20
108      PRINT 12
109      PRINT 700
110      VALMA2=0.
111      VALMI2=-19516
112      CALL COURBE(H,TAB3,VALMA2,VALMI2,MAXT)

```

```

13 PRINT 50,(T5,T6,T7)
14 PRINT 100
15 PRINT 21
16 PRINT 20
17 PRINT 12
18 PRINT 150
19 VALMA3=0
20 VALMI3=-137.
21 CALL COURBE(H,TAB4,VALMA3,VALMI3,MAXT)
22 PRINT 50,(T5,T6,T7)
23 PRINT 100
24 PRINT 24
25 PRINT 20
26 PRINT 12
27 PRINT 13
28 VALMA4=0.
29 VALMI4=-214.5
30 CALL COURBE(H,TAB5,VALMA4,VALMI4,MAXT)
31 PRINT 50,(T5,T6,T7)
32 300 FORMAT(2X,"T=",F6.2,2X,"X1=",E14.5,2X,"X2=",E14.5,2X,"X3=",E14.5,
# 2X,"X4=",E14.5,2X,"X5=",E14.5)
3 100 FORMAT(///// )
4 24 FORMAT(17X,"RAMPE DE COMMANDE")
5 13 FORMAT(13X,"U")
6 27 FORMAT(10X,"RESULTATS OBTENUS CAS D UNE RAMPE")
7 71 FORMAT(//)
8 20 FORMAT(17X,59(1H))
9 16 FORMAT(17X,"REPONSE DE PUISSANCE DC1N A UNE RAMPE DE REACTIVITE")
0 17 FORMAT(17X,"REPONSE DE PUISSANCE DC2N A UNE RAMPE DE REACTIVITE")
1 21 FORMAT(17X,"REPONSE DE PUISSANCE PN A U E RAMPE DE REACTIVITE")
2 200 FORMAT(17X,"REPONSE DE TEMPERATURE C URANIUM A UNE RAMPE DE REACTI
*VITE")
3 400 FORMAT(10X,"REPONSE DE TEMPERATURE DU MODERATEUR A UNE RAMPE DE RE
*ACTIVITE")
4 950 FORMAT(13X,"DTU")
5 900 FORMAT(13X,"DTM")
6 50 FORMAT(10X,E11.4,13X,E11.4,13X,E11.4,1X,"T")
7 790 FORMAT(13X,"DC 2N")
8 350 FORMAT(13X,"DC 1N")
9 150 FORMAT(13X,"DPN")
0 12 FORMAT(17X,"PAS H=0.0134")
1 .STOP
2 END

```

SOUBRETINES POUR LE CAS D'UNE RAMPE

```

150          SUBROUTINE MIG1(N,H,X,A,B,T,T1)
151          DIMENSION X(5),A(5,5),T1(5),B(5)
152          IF(T-120)11,11,8
153          001A      11  U=1.7875*T-214.5
154          0022      GOTO 12
155          0024      8  U=0.
156          0028      12 DO 1 I=1,N
157          002C          P=0
158          0032          DO 2 J=1,N
159          0036      2  P=P+(A(I,J)*X(J))+(B(J)*U)
160          006E          T1(I)=0
161          0080          T1(I)=T1(I)+H*P
162          009E      1  CONTINUE
163          00A8          RETURN
164          00AA          END

165          SUBROUTINE MIG2(N,H,X,A,B,T,T1,T2)
166          DIMENSION X(5),A(5,5),T1(5),T2(5),B(5)
167          IF(T-120)11,11,8
168          001A      11  U=1.7875*(T+0.5*H)-214.5
169          0026      GOTO 12
170          0028      8  U=0.
171          002C      12 DO 1 I=1,N
172          0030          P=0
173          0036          DO 2 J=1,N
174          003A      2  P=P+(A(I,J)*(0.5*T1(J)+X(J)))+(B(J)*U)
175          007E          T2(I)=0
176          0090          T2(I)=T2(I)+H*P
177          00AE      1  CONTINUE
178          00B8          RETURN
179          00BA          END

180          SUBROUTINE MIG3(N,H,X,A,B,T,T2,T3)
181          DIMENSION X(5),A(5,5),T3(5),T2(5),B(5)
182          IF(T-120)11,11,8
183          001A      11  U=1.7875*(T+0.5*H)-214.5
184          0026      GOTO 12
185          0028      8  U=0.
186          002C      12 DO 1 I=1,N
187          0030          P=0
188          0036          DO 2 J=1,N
189          003A      2  P=P+(A(I,J)*(0.5*T2(J)+X(J)))+(B(J)*U)
190          007E          T3(I)=0
191          0090          T3(I)=T3(I)+H*P
192          00AE      1  CONTINUE
193          00B8          RETURN
194          00BA          END

195          SUBROUTINE MIG4(N,H,X,A,B,T,T3,T4)
196          DIMENSION X(5),A(5,5),T3(5),T4(5),B(5)
197          IF(T-120)11,11,8
198          001A      11  U=1.7875*(T+H)-214.5
199          0024      GOTO 12
200          0026      8  U=0.
201          002A      12 DO 1 I=1,N
202          002E          P=0
203          0034          DO 2 J=1,N
204          0038      2  P=P+(A(I,J)*(T3(J)+X(J)))+(B(J)*U)
205          007A          T4(I)=0
206          008C          T4(I)=T4(I)+H*P
207          00AA      1  CONTINUE
208          00B4          RETURN
209          00B6          END

```

SOUBRETINES DANS LE GAS D'UN ECHELON

135			SUBROUTINE MIG1(N,H,X,A,T1,B,T,U)
136			DIMENSION A(5,5),X(5),T1(5),B(5)
137			DO 1 I=1,N
138	0008		P=0
139	000E		DO 2 J=1,N
140	0012	2	P=P+(A(I,J)*X(J))+(B(J)*U)
141	004A		T1(I)=0
142	005C		T1(I)=T1(I)+H*P
143	007A	1	CONTINUE
144	0084		RETURN
145	0086		END

156			SUBROUTINE MIG2(N,H,X,A,T1,T2,B,T,U)
157			DIMENSION X(5),A(5,5),T2(5),T1(5),B(5)
158			DO 1 I=1,N
159	0008		P=0
160	000E		DO 2 J=1,N
161	0012	2	P=P+(A(I,J)*(0.5*T1(J)+X(J)))+(B(J)*U)
162	0056		T2(I)=0
163	0068		T2(I)=T2(I)+H*P
164	0086	1	CONTINUE
165	0090		RETURN
166	0092		END

167			SUBROUTINE MIG3(N,H,X,A,T2,T3,T,B,U)
168			DIMENSION X(5),A(5,5),T3(5),T2(5),B(5)
169			DO 1 I=1,N
170	0008		P=0
171	000E		DO 2 J=1,N
172	0012	2	P=P+(A(I,J)*(0.5*T2(J)+X(J)))+(B(J)*U)
173	0056		T3(I)=0
174	0068		T3(I)=T3(I)+H*P
175	0086	1	CONTINUE
176	0090		RETURN
177	0092		END

178			SUBROUTINE MIG4(N,H,X,A,T,T3,T4,B,U)
179			DIMENSION X(5),A(5,5),T4(5),T3(5),B(5)
180			DO 1 I=1,N
181	0008		P=0
182	000E		DO 2 J=1,N
183	0012	2	P=P+(A(I,J)*(T3(J)+X(J)))+(B(J)*U)
184	0054		T4(I)=0
185	0066		T4(I)=T4(I)+H*P
186	0084	1	CONTINUE
187	008E		RETURN
188	0090		END

- METHODE DE RUNGE KUTTA -

RESULTATS OBTENUS CAS D UNE RAMPE

T= 0.0	X1= -0.27000E+03	X2= -0.22190E+06	X3= -0.33655E+05	X4= -0.52700E+02	X5= -0.18800E+01
T=159.92	X1= -0.13667E+03	X2= -0.16907E+07	X3= -0.19516E+05	X4= -0.51886E+02	X5= -0.16641E+01
T=161.92	X1= -0.11790E+03	X2= -0.14374E+07	X3= -0.1659 E+05	X4= -0.44112E+02	X5= -0.14148E+01
T=163.92	X1= -0.10023E+03	X2= -0.12220E+07	X3= -0.14106E+05	X4= -0.37503E+02	X5= -0.12028E+01
T=165.92	X1= -0.85207E+02	X2= -0.10389E+07	X3= -0.1199 E+05	X4= -0.31883E+02	X5= -0.10226E+01
T=167.92	X1= -0.72465E+02	X2= -0.88326E+06	X3= -0.10196E+05	X4= -0.27106E+02	X5= -0.86937E+00
T=169.91	X1= -0.61617E+02	X2= -0.75096E+06	X3= -0.86703E+04	X4= -0.23046E+02	X5= -0.73915E+00
T=171.91	X1= -0.52390E+02	X2= -0.63847E+06	X3= -0.73722E+04	X4= -0.19594E+02	X5= -0.62843E+00
T=173.91	X1= -0.44544E+02	X2= -0.54283E+06	X3= -0.62683E+04	X4= -0.16659E+02	X5= -0.53429E+00
T=175.91	X1= -0.37862E+02	X2= -0.46152E+06	X3= -0.53289E+04	X4= -0.1464E+02	X5= -0.45427E+00
T=177.91	X1= -0.32186E+02	X2= -0.39238E+06	X3= -0.4529 E+04	X4= -0.12042E+02	X5= -0.38623E+00
T=179.91	X1= -0.27364E+02	X2= -0.33360E+06	X3= -0.38510E+04	X4= -0.10238E+02	X5= -0.32837E+00
T=181.91	X1= -0.23265E+02	X2= -0.28363E+06	X3= -0.3274 E+04	X4= -0.87044E+01	X5= -0.27918E+00
T=183.91	X1= -0.19780E+02	X2= -0.24114E+06	X3= -0.27837E+04	X4= -0.74004E+01	X5= -0.23735E+00
T=185.91	X1= -0.16817E+02	X2= -0.20501E+06	X3= -0.23666E+04	X4= -0.62918E+01	X5= -0.20180E+00
T=187.90	X1= -0.14297E+02	X2= -0.17430E+06	X3= -0.20121E+04	X4= -0.53492E+01	X5= -0.17156E+00
T=189.90	X1= -0.12155E+02	X2= -0.14819E+06	X3= -0.17106E+04	X4= -0.45478E+01	X5= -0.14586E+00
T=191.90	X1= -0.10334E+02	X2= -0.12599E+06	X3= -0.1454 E+04	X4= -0.38664E+01	X5= -0.12401E+00
T=193.90	X1= -0.87854E+01	X2= -0.10711E+06	X3= -0.12364E+04	X4= -0.32872E+01	X5= -0.10543E+00
T=195.90	X1= -0.74690E+01	X2= -0.91061E+05	X3= -0.1051 E+04	X4= -0.27946E+01	X5= -0.89632E 01

T=197.90	X1= -0.63496E+01	X2= -0.77416E+05	X3= -0.89362E+03	X4= -0.23759E+01	X5= -0.76202E 01
T=199.90	X1= -0.53979E+01	X2= -0.65815E+05	X3= -0.75969E+03	X4= -0.20199E+01	X5= -0.64782E 01
T=201.90	X1= -0.45907E+01	X2= -0.55956E+05	X3= -0.64594E+03	X4= -0.17172E+01	X5= -0.55076E 01
T=203.90	X1= -0.39036E+01	X2= -0.47574E+05	X3= -0.54928E+03	X4= -0.14600E+01	X5= -0.46826E 01
T=205.89	X1= -0.33191E+01	X2= -0.40448E+05	X3= -0.46706E+03	X4= -0.12413E+01	X5= -0.39812E 01
T=207.89	X1= -0.28219E+01	X2= -0.34389E+05	X3= -0.3971 E+03	X4= -0.10554E+01	X5= -0.33849E 01
T=209.89	X1= -0.23987E+01	X2= -0.29238E+05	X3= -0.33760E+03	X4= -0.89730E+00	X5= -0.28779E 01
T=211.89	X1= -0.20390E+01	X2= -0.24858E+05	X3= -0.28698E+03	X4= -0.76289E+00	X5= -0.24468E 01
T=213.89	X1= -0.17336E+01	X2= -0.21134E+05	X3= -0.2439 E+03	X4= -0.64860E+00	X5= -0.20803E 01
T=215.89	X1= -0.14739E+01	X2= -0.17968E+05	X3= -0.20742E+03	X4= -0.55144E+00	X5= -0.17686E 01
T=217.89	X1= -0.12531E+01	X2= -0.15277E+05	X3= -0.1763 E+03	X4= -0.46883E+00	X5= -0.15037E 01
T=219.89	X1= -0.10654E+01	X2= -0.12988E+05	X3= -0.14993E+03	X4= -0.39860E+00	X5= -0.12784E 01
T=221.89	X1= -0.90575E+00	X2= -0.11042E+05	X3= -0.12747E+03	X4= -0.33888E+00	X5= -0.10869E 01
T=223.88	X1= -0.77004E+00	X2= -0.93880E+04	X3= -0.1083 E+03	X4= -0.28811E+00	X5= -0.92406E 02
T=225.88	X1= -0.65468E+00	X2= -0.79815E+04	X3= -0.92135E+02	X4= -0.24495E+00	X5= -0.78562E 02
T=227.88	X1= -0.55657E+00	X2= -0.67856E+04	X3= -0.78329E+02	X4= -0.20825E+00	X5= -0.66791E 02
T=229.88	X1= -0.47315E+00	X2= -0.57688E+04	X3= -0.66591E+02	X4= -0.17705E+00	X5= -0.56784E 02
T=231.88	X1= -0.40225E+00	X2= -0.49044E+04	X3= -0.5661 E+02	X4= -0.14052E+00	X5= -0.48275E 02
T=233.88	X1= -0.34196E+00	X2= -0.41695E+04	X3= -0.48127E+02	X4= -0.12796E+00	X5= -0.41041E 02
T=235.88	X1= -0.29082E+00	X2= -0.35449E+04	X3= -0.40920E+02	X4= -0.10879E+00	X5= -0.34891E 02
T=237.88	X1= -0.24730E+00	X2= -0.30139E+04	X3= -0.34797E+02	X4= -0.92491E 01	X5= -0.29665E 02
T=239.88	X1= -0.21026E+00	X2= -0.25624E+04	X3= -0.29587E+02	X4= -0.78637E 01	X5= -0.25221E 02

RESULTATS CETENUS CAS D UN ECHELON

T	00	X1	0	27000E+03	X	0	21907E+06	X3	1	33655E+05	X4	52700E+02	X5	18800E+00
T	00	X1	32889E+03	00731E+03	X	10855E+06	14717E+06	X3	33655E+05	X4	777E+02	X5	59611E+00	
T	00	X1	01317E+01	01317E+01	X	04137E+00	10855E+06	X3	24101E+05	X4	204E+01	X5	22211E+00	
T	00	X1	18336E+02	18336E+02	X	0281E+00	04137E+00	X3	11645E+05	X4	1378E+00	X5	11266E+00	
T	00	X1	15220E+02	15220E+02	X	02365E+00	0281E+00	X3	31013E+04	X4	6998E+00	X5	20864E+00	
T	00	X1	18113E+02	18113E+02	X	04942E+00	02365E+00	X3	46728E+03	X4	37E+01	X5	45214E+00	
T	00	X1	66114E+01	66114E+01	X	7861E+00	04942E+00	X3	12791E+04	X4	37E+01	X5	56874E+00	
T	00	X1	43499E+01	43499E+01	X	1318E+00	7861E+00	X3	11159E+04	X4	22E+01	X5	37060E+00	
T	00	X1	30993E+01	30993E+01	X	4227E+00	1318E+00	X3	80630E+03	X4	08E+01	X5	1973E+00	
T	00	X1	28186E+01	28186E+01	X	576E+00	4227E+00	X3	46721E+03	X4	49E+01	X5	40002E+00	
T	00	X1	22222E+01	22222E+01	X	1493E+00	576E+00	X3	40032E+03	X4	619E+00	X5	35123E+00	
T	00	X1	22222E+01	22222E+01	X	1493E+00	1493E+00	X3	35548E+03	X4	85E+00	X5	30999E+00	
T	00	X1	20299E+01	20299E+01	X	4688E+00	1493E+00	X3	31818E+03	X4	711E+00	X5	27412E+00	
T	00	X1	17970E+01	17970E+01	X	21860E+00	4688E+00	X3	23999E+03	X4	6706E+00	X5	15099E+00	
T	00	X1	15896E+01	15896E+01	X	3555E+00	21860E+00	X3	2338E+03	X4	595E+00	X5	19049E+00	
T	00	X1	14064E+01	14064E+01	X	37E+00	3555E+00	X3	19800E+03	X4	394E+00	X5	16869E+00	
T	00	X1	12449E+01	12449E+01	X	15174E+00	37E+00	X3	17525E+03	X4	669E+00	X5	14936E+00	
T	00	X1	11022E+01	11022E+01	X	13435E+00	15174E+00	X3	15513E+03	X4	333E+00	X5	13225E+00	
T	00	X1	97593E+00	97593E+00	X	1896E+00	13435E+00	X3	13734E+03	X4	508E+00	X5	11709E+00	
T	00	X1	86418E+00	86418E+00	X	10533E+00	1896E+00	X3	12161E+03	X4	26E+00	X5	10368E+00	
T	00	X1	76521E+00	76521E+00	X	366E+04	10533E+00	X3	10768E+03	X4	22E+00	X5	91800E+00	
T	00	X1	67759E+00	67759E+00	X	2583E+04	366E+04	X3	95349E+02	X4	44E+00	X5	81284E+00	
T	00	X1	60000E+00	60000E+00	X	3124E+04	2583E+04	X3	84430E+02	X4	41E+00	X5	71974E+00	
T	00	X1	53130E+00	53130E+00	X	64749E+04	3124E+04	X3	74762E+02	X4	70E+00	X5	63731E+00	
T	00	X1	47046E+00	47046E+00	X	7334E+04	64749E+04	X3	66202E+02	X4	95E+00	X5	56432E+00	
T	00	X1	41661E+00	41661E+00	X	0768E+04	7334E+04	X3	58623E+02	X4	80E+00	X5	49970E+00	
T	00	X1	36893E+00	36893E+00	X	4955E+04	0768E+04	X3	51912E+02	X4	33E+00	X5	44248E+00	
T	00	X1	32664E+00	32664E+00	X	808E+04	4955E+04	X3	45970E+02	X4	17E+00	X5	39182E+00	
T	00	X1	28806E+00	28806E+00	X	46E+04	808E+04	X3	40694E+02	X4	81E+00	X5	34694E+00	
T	00	X1	25586E+00	25586E+00	X	06E+04	46E+04	X3	36019E+02	X4	76E+01	X5	30718E+00	

T= 95.95	X1= -0.22605E+00	X2= -0.27541E+04	X3= -0.31805E+C2	X4= -0.84518E-01	X5= -0.27107E-02
T= 98.95	X1= -0.20015E+00	X2= -0.24385E+04	X3= -0.28163E+02	X4= -0.74831E-01	X5= -0.24001E-02
T=101.95	X1= -0.17722E+00	X2= -0.21590E+04	X3= -0.24937E+C2	X4= -0.66254E-01	X5= -0.21250E-02
T=104.95	X1= -0.15587E+00	X2= -0.19115E+04	X3= -0.22078E+C2	X4= -0.58662E-01	X5= -0.18815E-02
T=107.95	X1= -0.13983E+00	X2= -0.16924E+04	X3= -0.19542E+02	X4= -0.51940E-01	X5= -0.16659E-02
T=110.95	X1= -0.12290E+00	X2= -0.14984E+04	X3= -0.17298E+02	X4= -0.45990E-01	X5= -0.14749E-02
T=113.95	X1= -0.10381E+00	X2= -0.13236E+04	X3= -0.15319E+02	X4= -0.40714E-01	X5= -0.13058E-02
T=116.94	X1= -0.96343E-01	X2= -0.11746E+04	X3= -0.13558E+C2	X4= -0.36047E-01	X5= -0.11561E-02
T=119.94	X1= -0.85299E-01	X2= -0.10399E+04	X3= -0.12004E+02	X4= -0.3191E-01	X5= -0.10236E-02
T=122.94	X1= -0.75519E-01	X2= -0.92070E+03	X3= -0.10628E+C2	X4= -0.28256E-01	X5= -0.90626E-03
T=125.94	X1= -0.66860E-01	X2= -0.81515E+03	X3= -0.94096E+C1	X4= -0.2501E-01	X5= -0.80236E-03
T=128.94	X1= -0.59193E-01	X2= -0.72170E+03	X3= -0.83307E+01	X4= -0.22149E-01	X5= -0.71038E-03
T=131.94	X1= -0.52406E-01	X2= -0.63895E+03	X3= -0.73755E+01	X4= -0.19609E-01	X5= -0.62099E-03
T=134.93	X1= -0.46397E-01	X2= -0.56569E+03	X3= -0.65297E+01	X4= -0.17361E-01	X5= -0.55682E-03
T=137.93	X1= -0.41076E-01	X2= -0.50033E+03	X3= -0.57809E+01	X4= -0.15370E-01	X5= -0.49297E-03
T=140.93	X1= -0.36364E-01	X2= -0.44240E+03	X3= -0.51179E+01	X4= -0.13606E-01	X5= -0.43644E-03
T=143.93	X1= -0.32193E-01	X2= -0.39255E+03	X3= -0.45309E+01	X4= -0.12047E-01	X5= -0.38639E-03
T=146.93	X1= -0.28500E-01	X2= -0.34753E+03	X3= -0.40112E+C1	X4= -0.10666E-01	X5= -0.34208E-03

REPONSE DE TEMPERATURE D URANIUM A UN ECHELON DE REACTIVITE

PAS H=0.0134

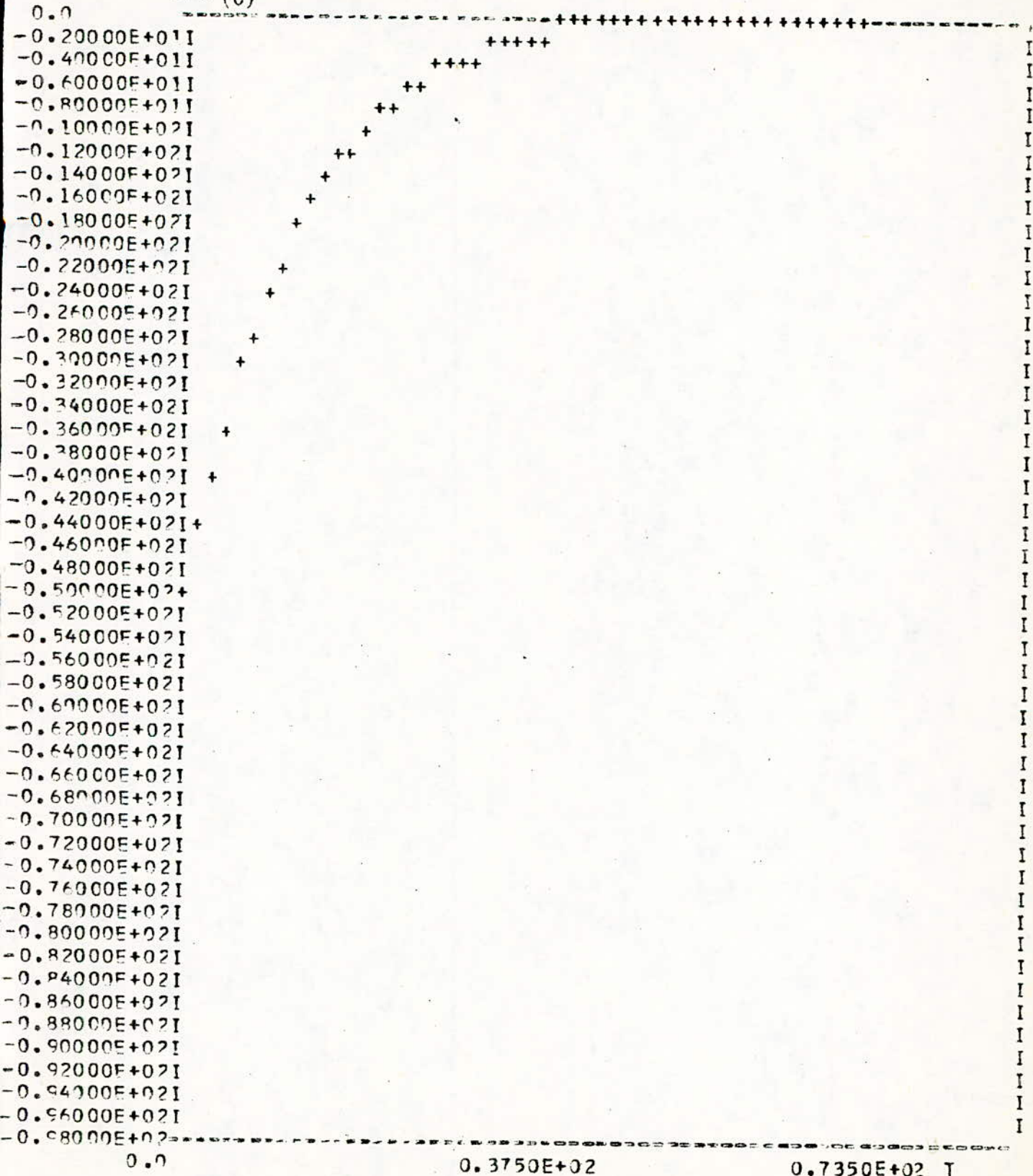
DTU (C)

DTU (C)		
0.0	----- ++++++	
-0.20000E+01I	+	I
-0.40000E+01I		I
-0.60000E+01I	+	I
-0.80000E+01I		I
-0.10000E+02I	+	I
-0.12000E+02I		I
-0.14000E+02I		I
-0.16000E+02I	+	I
-0.18000E+02I		I
-0.20000E+02I		I
-0.22000E+02I		I
-0.24000E+02I		I
-0.26000E+02I	+	I
-0.28000E+02I		I
-0.30000E+02I		I
-0.32000E+02I		I
-0.34000E+02I		I
-0.36000E+02I		I
-0.38000E+02I	+	I
-0.40000E+02I		I
-0.42000E+02I		I
-0.44000E+02I		I
-0.46000E+02I		I
-0.48000E+02I		I
-0.50000E+02I		I
-0.52000E+02I		I
-0.54000E+02I		I
-0.56000E+02I		I
-0.58000E+02I		I
-0.60000E+02I		I
-0.62000E+02I		I
-0.64000E+02I		I
-0.66000E+02I		I
-0.68000E+02I		I
-0.70000E+02I		I
-0.72000E+02I		I
-0.74000E+02I		I
-0.76000E+02I		I
-0.78000E+02I		I
-0.80000E+02I		I
-0.82000E+02I		I
-0.84000E+02I		I
-0.86000E+02I		I
-0.88000E+02I		I
-0.90000E+02I		I
-0.92000E+02I		I
-0.94000E+02I		I
-0.96000E+02I		I
-0.98000E+02I	-----	I
0.0		
	0.2500E+02	0.4900E+02 T

REPONSE DE TEMPERATURE D URANIUM A UNE RAMPE DE REACTIVITE

PAS H=0.0134

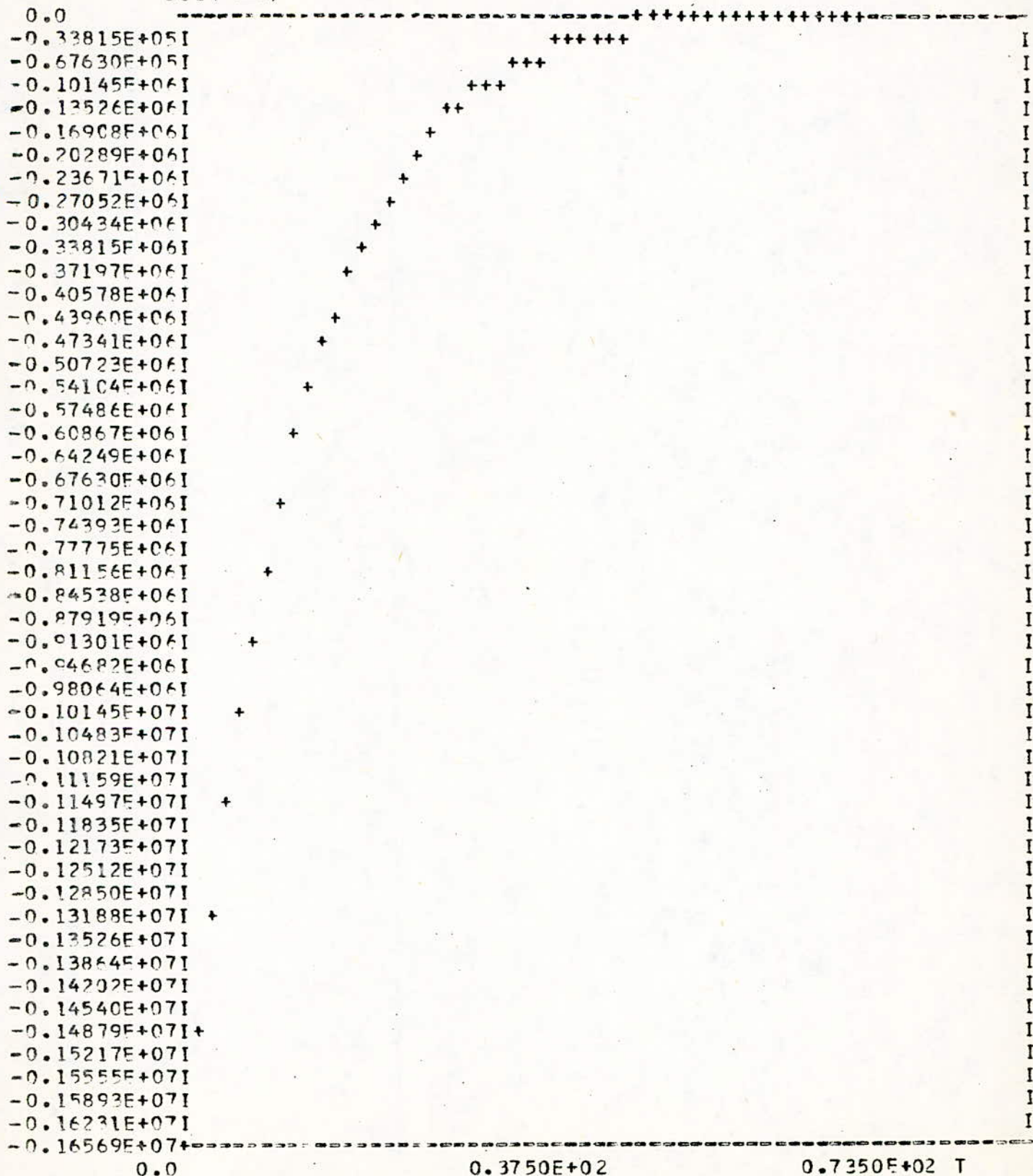
DTU (c)



REPONSE DE PUISSANCE DCIN A UNE RAMPE DE REACTIVITE

PAS H=0.0134

DCIN (MW)



0.0

0.3750E+02

0.7350E+02 T

REPONSE DE PUISSANCE DC2N A UNE RAMPE DE REACTIVITE

PAS H=0.0134

DC2N (MW)

