PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE

CEA - R 2614

ASPECTS THÉORIQUES DE L'INTERACTION NEUTRONIQUE

par

Jean MORET-BAILLY

avec la collaboration

de F. PENET et J. C. SPINELLI

Rapport CEA - R 2614

1965
Ka

CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY

CEA-R 2614 - MORET-BAILLY Jean, PENET François,
SPINELLI Jean-Claude

ASPECTS THEORIQUES DE L'INTERACTION NEUTRONIQUE -
ANNEXE I - PROGRAMME INTERACTION POUR IBM 7094 -
ANNEXE II - SOUS PROGRAMME OMBRE

Sommaire.-

Annexe I. On expose les méthodes permettant d'obtenir les équations d'un système d'éléments contenant de la matière fissile :

a) par le bilan après fission
b) par le bilan avant fission
c) par les équations d'évolution

Toutes ces méthodes conduisent à des matrices équivalentes dont la plus grande valeur propre est le coefficient de multiplication de l'ensemble K. On montre comment K se calcule. On en déduit des règles qui généralisent le critère de l'angle solide limité.

Un programme pour IBM 7094 applique cette théorie au calcul des installations comportant au maximum 500 éléments. Il calcule les k effectifs, les fuites, les angles solides puis K.

./.

CEA-R 2614 - MORET-BAILLY Jean, PENET François,
SPINELLI Jean-Claude

THEORETICAL ASPECTS OF NEUTRON INTERACTION
PART I - INTERACTION PROGRAMME FOR IBM 7094
PART II - THE SHIELDING SUB-PROGRAMME

Summary.-

Part I. Methods are described for obtaining the equations for a system of elements containing fissile matter :

a) by using the balance after fission
b) by using the balance before fission
c) by the evolution equations

All these methods lead to equivalent matrices whose greatest proper value is the multiplication coefficient for the system K. It is shown how to calculate K. From this it is possible to deduce the rules which generalize the criterion for the bounded solid angle.

An IBM 7094 programme applies this theory to the calculation of the installations made up of a maximum of 500 elements. It calculates the effective values of K, the leaks, the solid angles and then K.

./.

Annexe II. Ce sous-programme calcule les ombres entre les éléments.

1964 121 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

Part. II. This sub-programme calculates the shielding between the elements.

1964 121 p.

Commissariat à l'Energie Atomique - France

Les rapports du COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE sont, à partir du n° 2200, en vente à la Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

The C.E.A. reports starting with n° 2200 are available at the Documentation Française, Secrétariat Général du Gouvernement, Direction de la Documentation, 16, rue Lord Byron, PARIS VIIIème.

- Rapport CEA-R 2614 -

Département des Etudes de Piles

Service des expériences neutroniques

ASPECTS THEORIQUES DE L'INTERACTION NEUTRONIQUE

par

Jean MORET-BAILLY

ANNEXE I

Programme d'interaction pour IBM 7094

par

Jean MORET-BAILLY

ANNEXE I I

Sous programme OMBRE

par

François PENET et Jean-Claude SPINELLI

- TABLE DES MATIERES -

Pages

ASPECTS THEORIQUES de L'INTERACTION NEUTRONIQUE

Introduction 5
ABREVIATIONS 6
A - METHODE DU BILAN APRES FISSION 7
B - METHODE DU BILAN AVANT FISSION 8
C - COMPARAISON DES METHODES 9
D - METHODE DES EQUATIONS D'EVOLUTION 10
E - CALCUL DE K 13
F - CALCUL APPROCHE DE K 14
G - LIMITES ET APPROXIMATIONS 17
CONCLUSION 18
BIBLIOGRAPHIE 19

ANNEXE I - PROGRAMME D'INTERACTION (SEC043) 21

INTRODUCTION 22
PROGRAMME PRINCIPAL 23
S P OMEGA 29
FONCTION ANGLE C 34
FONCTION ANGLE P 35
S P PSLD 1 36
S P UK 37
DONNEES POUR SEC 043 38
IMPRESSION DES RESULTATS 39
DETECTION DES ERREURS 40
DUREE DU CALCUL 40
MODIFICATION DU PROGRAMME 41

Pages

ANNEXE II - SOUS-PROGRAMME OMBRE 43

I - INTRODUCTION 44

II - METHODE GENERALE DE RECHERCHE DES OMBRES 44

III - APPLICATION PRATIQUE DE LA METHODE GENERALE 45

IV - ORGANIGRAMME 46

ANNEXE III - PROGRAMME D'INTERACTION SORTANT D'UNE TABULATRICE 105

ASPECTS THEORIQUES DE L'INTERACTION NEUTRONIQUE

INTRODUCTION

Dans l'étude qui suit, nous donnons des méthodes de calcul du coefficient de multiplication K. Nous avons essayé d'en faire une présentation logique. Elle ne correspond pas à la chronologie.

On se reportera pour voir comment a évolué le problème, aux références 1 à 6.

L'idée de prendre des angles solides pour évaluer des interactions est d'abord lancée. Puis apparaissent diverses tentatives de formulation du problème. En général, on se limite à 2 ou 3 éléments ou à des problèmes symétriques. Dans 4, on trouve la formule :

$$Kn_1 = n_1 k_1 + n_2 k_2 V_2$$

qui n'est pas tout à fait exacte, mais qui conduit à :

$$K \leqslant \text{Max } ki\ (1 + \Omega i)$$

Une étude expérimentale permet d'étayer ce critère et de l'imposer.

Dans 6 apparait un raisonnement par générations qui introduit les formules B à deux éléments identiques et le critère :

$$K \leqslant \underset{i}{\text{Max}} \left(\frac{ki}{1 - \Omega i}\right)$$

Dans 7, J.C. MOUGNIOT publie une étude cinétique (inspirée de 9) qui mène à D5 et à des résultats en multigroupe. Il généralise le critère de l'angle solide limite.

Dans 8, F. PENET donne une nouvelle méthode de calcul de K pour deux éléments qui permet d'écrire le système A3.

Le système A3 de F. PENET et le système B1 de J.C. MOUGNIOT étant équivalents pour deux éléments identiques, il semblait au premier abord que l'on pouvait généraliser. Nous avons constaté que la généralisation n'était pas la même pour les deux systèmes. Il en est résulté cette étude que F. PENET et J.C. MOUGNIOT ont suivie à mesure qu'elle s'élaborait.

Dans A et B, on trouvera un exposé des deux méthodes, la formulation étant retrouvée à la façon de F. PENET. La comparaison est faite dans C. Dans D on résout le problème. Dans E, on montre comment on peut calculer K. Dans F, on donne les critères qu'on peut considérer comme étant d'utilisation courante qui se déduisent de la théorie.

ABREVIATIONS

K	k effectif de l'ensemble
k_j	k effectif d'un élément isolé j
k	matrice diagonale des kj
I	matrice unité
xj	nombre de neutrons dans j comptés avant fission
yj	" " " j " après fission
nj	nombre de neutrons dans j
$\left.\begin{matrix}\|x\rangle \\ \|y\rangle \\ \|n\rangle\end{matrix}\right\}$	vecteurs colonne des xj yj nj
$\|n_o\rangle$	vecteurs colonne du réacteur critique associé
Tj	temps de vie moyen des neutrons dans j
T_∞	temps de vie du milieu infini
To	temps de vie global de l'ensemble
T	matrice diagonale des Tj
Ω ij	probabilité géométrique de passage de i à j (Ω ii - o)
Fj	probabilité de sortir de j (considérée en général comme isotrope)
Vij -	Fi Ω ij probabilité pour un neutron de i d'aller dans j (Vii - o)
N	matrice des Vji
Vi -	$\sum_{j-1}^{n}$ Vji somme d'une ligne i
Vi' -	$\sum_{j-1}^{n}$ Vij somme d'une colonne i
Ωi -	$\sum_{j-1}^{n}$ Ωji
Ωi' -	$\sum_{j-1}^{n}$ Ωij
R	matrice de réflexion et d'interaction indirecte
tij	temps mis par un neutron pour aller de i à j
Ωi^1	angle solide limite pour l'élément i

Il existe des systèmes d'équations qui permettent de calculer le facteur de multiplication K effectif d'un ensemble d'éléments contenant de la matière fissile. Plusieurs méthodes ont été proposées pour le calcul de K. Nous allons en exposer trois.

Pour simplifier, nous raisonnerons en général avec deux éléments seulement : 1 et 2.

A - METHODE DU BILAN APRES FISSION

A-a - *Calcul du facteur de réflexion*

La probabilité pour qu'un neutron se trouvant dans 1 puisse sortir de 1 et aller dans 2 étant V_{12}, la probabilité de retour simple dans 1 est $V_{12}\ V_{21}$.

Si n allers et retours sont effectués, la probabilité est $(V_{12}\ V_{21})^n$. Le facteur de réflexion est donc :

$$r_1 = V_{12}\ V_{21}\ (1 + V_{12}\ V_{21} + \ldots + (V_{12}\ V_{21})^{n-1} + \ldots) = \frac{V_{12}\ V_{21}}{1-V_{12}\ V_{21}} \qquad (A1)$$

si $V_{12}\ V_{21} < 1$ ce qui est toujours vrai.

La probabilité pour qu'un neutron de 1 soit utilisé dans 1 est :

$$(1-F_1)\ (1 + r_1) \equiv (1-F_1)\ R_1 = \frac{(1-F_1)}{1-V_{12}\ V_{21}} \qquad (A2)$$

ce qui définit R_1.

A-b - *Bilan après fission*

Ce bilan est un bilan sur une génération de neutrons. On commence juste après la fission et on finit juste après la fission suivante. On peut l'écrire pour 1:

neutrons après fission dans 1 = $k_1 . R_1$ (neutrons dans 1 + neutrons venant de 2)
d'où le système d'équations :

$$\left.\begin{aligned} K\ y_1 &= k_1\ R_1\ (y_1 + y_2\ V_{21}) \\ K\ y_2 &= k_2\ R_2\ (y_1\ V_{12} + y_2) \end{aligned}\right) \qquad (A3)$$

K est le même dans les deux équations si on admet que l'évolution des populations neutroniques dans les 2 éléments suit la même loi exponentielle. Il y a deux solutions possibles : celle qui correspond au K effectif de l'ensemble est la plus grande.

Sous forme matricielle, on écrit :

$$K\ |y> = k\ R\ (I + N)\ |y> \qquad (A4)$$

avec $R = (I - N^2)^{-1}$ (A5)

Cette matrice R est diagonale pour 2 éléments, mais ne l'est plus pour 3. Elle s'obtient à partir de la série

$$I + N^2 + N^4 + \ldots$$

qui est convergente car la plus grande valeur propre de N est inférieure à 1. En effet, $\lambda < V'i$ d'après le théorème d'Hadamard (voir plus loin ce théorème) et $Vi < \Omega'i < 1$.

La matrice R contient tous les termes de réflexion (diagonale) et d'interaction indirecte.

En remplaçant R par sa valeur dans (A4), il vient

$$\boxed{K \mid y > \; = \; k\,(I-N)^{-1} \mid y >} \qquad (A6)$$

ou

$$K\,k^{-1} \mid y> \; = \; (I + KNk^{-1}) \mid y> \qquad (A7)$$

A7 est équivalent au système :

$$\left.\begin{aligned} K\frac{y_1}{k_1} &= k_1\frac{y_1}{k_1} + K\,V_{21}\,\frac{y_2}{k_2} \\ K\frac{y_2}{k_2} &= K\,V_{12}\frac{y_1}{k_1} + K_2\,\frac{Y_2}{k_2} \end{aligned}\right\} \qquad (A8)$$

A8 se généralise facilement à un nombre quelconque d'éléments (ce qui n'est pas le cas de A3).

y_1/k_1 est le nombre de neutrons avant fission

$k_1\dfrac{y_1}{k_1}$ est le nombre de neutrons après fission pour 1 isolé

$V_{21}\;y_2/k_2$ est l'apport de l'élément 2 à l'élément 1. Il est multiplié par K car tout neutron rentrant dans la matière fissile est multiplié par K.

Pour 3 éléments on obtient 3 équations de la forme :

$$k\frac{y_1}{k_1} = k_1\frac{y_1}{k_1} + K\,V_{21}\,\frac{y_2}{k_2} + K\,V_{31}\,\frac{y_3}{k_3} \quad . \qquad (A9)$$

ce qui correspond bien à A6.

B - METHODE DU BILAN AVANT FISSION

Pour 1, ce bilan s'écrit :
neutrons avant fission dans 1 = $k_1\,R_1$ (neutrons dans 1) + $k_2\,R_1$ (neutrons venant de 2)
d'où le système d'équations :

$$\left.\begin{aligned} Kx_1 &= k_1\,R_1\,x_1 + k_2\,R_1\,V_{21}\,x_2 \\ Kx_2 &= k_1\,R_2\,V_{12}\,x_1 + k_2\,R_2\,x_2 \end{aligned}\right\} \qquad (B1)$$

Si on compare B1 à A3, on a k_2 à la place de k_1 car les neutrons avant de sortir de 2 sont multipliés dans 2 et non dans 1 comme on faisait dans A3.

Sous forme matricielle, on écrit :

$$\boxed{K \mid x > \; = \; (I - N)^{-1} k \mid x >} \qquad (B2)$$

avec $R = (I - N^2)^{-1}$ (B3)

B2 s'écrit aussi :

$$K (I-N) \mid x > \; = \; k \mid x > \qquad (B4)$$

d'où :

$$\left.\begin{aligned} K x_1 &= k_1 x_1 + K V_{21} x_2 \\ K x_2 &= K V_{12} x_1 + k_2 x_2 \end{aligned}\right) \qquad (B5)$$

Ce système d'équation est en général celui qu'on obtient directement quand on raisonne par générations. La généralisation se fait comme celle de A8 et conduit à B2.

C - COMPARAISON DES METHODES

Nous sommes amenés à comparer A6 et B2 :

$$K \mid y > \; = \; A \mid y > \qquad (C1)$$

$$K \mid x > \; = \; B \mid x > \qquad (C2)$$

avec $A = k (I-N)^{-1}$ (C3)

$B = (I-N)^{-1} k$ (C4)

Les valeurs propres de A et B sont les mêmes car on peut écrire :

$B = k^{-1} A k$ (C5)

et on sait qu'un changement de base ne change pas le polynôme caractéristique.

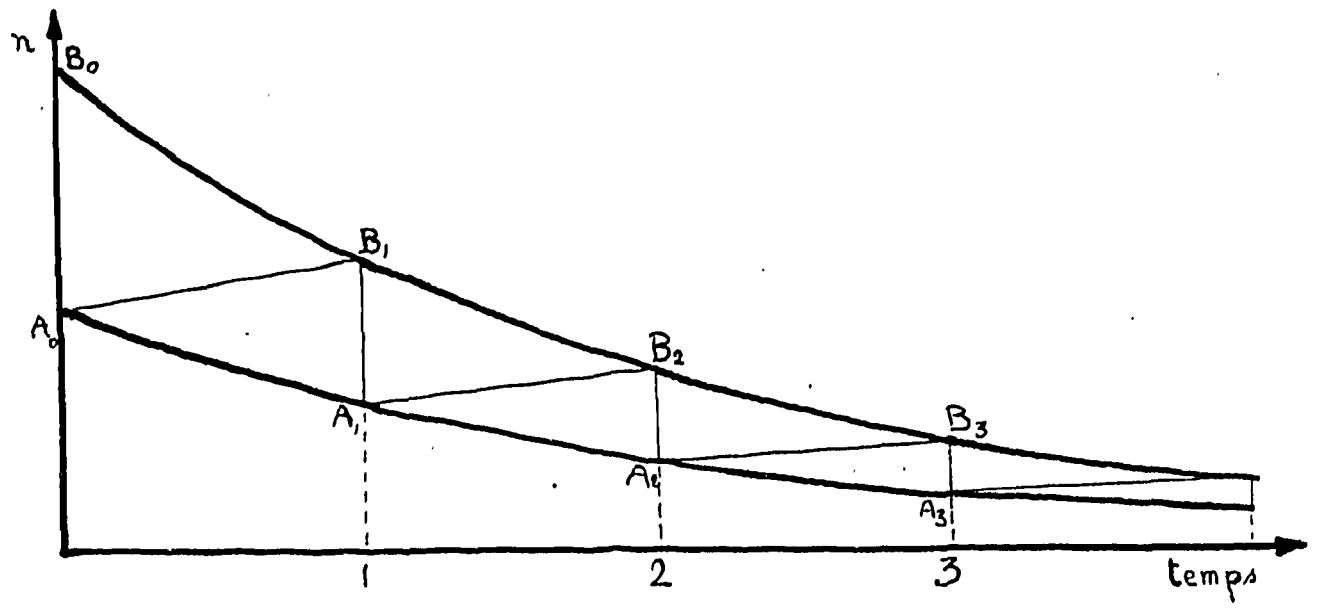
D'autres changements de base sont possibles. Par exemple, la matrice :

$(k)^{1-a} (I-N)^{-1} (k)^{a}$ (a = constante)

donne les mêmes valeurs propres.

Mais toutes ces matrices conduisent à des directions propres différentes, c'est-à-dire à des populations neutroniques différentes.

Représentons graphiquement la population dans 1 en fonction du temps. Nous obtenons la figure 1 :



Pour $t = 0 - \varepsilon$ il y a Bo neutrons

$t = 0 + \varepsilon$ il y a Ao neutrons $= Bo\ k_1$ ce qui correspond à la multiplication dans 1 (fissions, absorptions, fuites).

Ao B1 est un segment représentant l'apport de neutrons venant des autres éléments entre deux fissions. Cet apport est à chaque instant proportionnel à la population globale qui est elle même proportionnelle à la population dans 1 :

apport dans $1 = C_1\ n_1\ (t)$ (C_1 = constante)

Les multiplications et les apports se succèdent périodiquement.

La méthode du bilan avant fission donne la population qui correspond aux points Bo B1 ... Bn ... etc ... situés sur une exponentielle.

La méthode du bilan après fission donne la population qui correspond aux points Ao A1 ... An ... etc ...

Les équations A6 et B2 sont ainsi schématisées. Remarquons qu'elles ne donnent pas une forme précise à Ao B1.

On voit que ces équations ne tiennent pas assez compte du facteur temps.

D - METHODE DES EQUATIONS D'EVOLUTION

Pour un élément 1 isolé, sa population neutronique en multiplication suit une loi exponentielle de la forme :

$$n_1\ (t) = n_1\ e^{(k_1 - 1)\ t/T_1} \qquad \text{(D1)}$$

donc

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{k_1 - 1}{T_1}\ n_1 \qquad \text{(D2)}$$

Le nombre de neutrons qui sortent de 2 en direction de 1 pendant la durée d'une générations (T_2) est $V_{21}\, n_2$ et $V_{21}\, n_2 \frac{dt}{T_2}$ pendant le temps dt.

L'évolution de la population de 1 est donc donnée par l'équation :

$$\frac{dn_1}{dt} = \frac{k_1 - 1}{T_1} n_1 + \frac{V_{21}}{T_2} n_2 \qquad (D3)$$

en négligeant les temps de vol.

D3 s'écrit sous forme matricielle :

$$\left| \frac{d\ |n>}{dt} \right| = [k - I + N] \quad T^{-1} \quad |n> \qquad (D4)$$

ou encore en introduisant le temps de vie de l'ensemble To :

$$\frac{K-1}{To} \ |n> = [k - I + N] \quad T^{-1} \quad |n> \qquad (D5)$$

Si $\frac{K-1}{To}$ est la plus grande valeur propre (donc si To est la plus petite des valeurs possibles) $|n>$ représente la distribution fondamentale qui est rapidement prépondérante si $K > 1$. Si $K < 1$ la répartition des neutrons dépendra des sources.

K est défini comme étant un nombre qui divisant l'opérateur de production de neutrons (k) donnerait une distribution permanente de neutrons $\left(\frac{d\ |n>}{dt} = 0 \right)$

$$\left[\frac{k}{K} - I + N \right] T^{-1} \quad |n_o> = 0 \qquad (D6)$$

D6 définit K et D5 définit To

Si on pose $|x> = T^{-1} \ |n_o>$ on retrouve B2

$$K \ |x> = [I - N]^{-1} \ k \ |x> \qquad (D7)$$

Si tous les éléments ont le même k_∞ on a :

$$\left.\begin{aligned} k_1 &= k_\infty \ (1 - F1) \\ T_1 &= T_\infty \ (1 - F1) \end{aligned}\right) \qquad (D8)$$

$$\frac{T}{T_\infty} = \frac{k}{k'_\infty} \qquad (D9)$$

D6 peut s'écrire :

$$K \mid n_o > \; = \; T \, [I-N]^{-1} \quad k \, T^{-1} \mid n_o > \qquad \text{(D10)}$$

D10 et D9 conduisent à :

$$K \mid n_o > \; = \; k \, [I-N]^{-1} \mid n_o > \qquad \text{(D11)}$$

On retrouve A6.

En résumé k_∞ = constante permet de retrouver les équations A, et T = constante permet de retrouver les équations B.

Ces équations restent valables pour la détermination de K qui ne dépend pas de T. D'ailleurs, si on prend des unités de temps variant d'un élément à l'autre, on retrouve toujours la même valeur de K. Les méthodes A et B, où on ne s'occupe pas du temps, donnent donc bien K. Par contre, elles ne peuvent donner la population neutronique que dans des cas particuliers.

Modifications apportées par les temps de vol

D3 s'écrit, si on tient compte des temps de vol tij

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = \frac{k_1-1}{T_1} \, n_1(t) + \frac{V_{21}}{T_2} \, n_2(t-t_{21}) \qquad \text{(D12)}$$

avec $$n_2 \, (t-t_{21}) = n_2 \; e^{(K-1)(t-t_{21})/To} \qquad \text{(D13)}$$

et $$n_1(t) = n_1 \; e^{(K-1)t/To} \qquad \text{(D14)}$$

il vient :

$$\frac{dn_1(t)}{dt} = \frac{k_1-1}{T_1} \, n_1(t) + \frac{V_{21}}{T_2} \, n_2 \; e^{-t_{21}(K-1)/To} \qquad \text{(D15)}$$

Si on pose $\frac{dn_1(t)}{dt} = 0$ et si on divise k_1, et K par K on obtient encore D6 : K n'est pas modifié.

par contre To est modifié (sauf si $t_{21} \ll To$ ou K=1)

$$\frac{K-1}{To} \, n_1 = \frac{k_1-1}{T_1} \, n_1 + \frac{V_{21}}{T_2} \, n_2 \; e^{-t_{21} \frac{K-1}{To}} \qquad \text{(D16)}$$

Il faut remplacer V_{21} par $V_{21}\ e^{-t_{21}(K-1)To}$: au lieu de N on obtient ainsi la matrice N' et on a alors :

$$\frac{K-1}{To}\ |\ n > \ = \ [k-I-N']\ T^{-1}\ |\ n > \qquad (D17)$$

$\frac{K-1}{To}$ peut être calculé par approximations successives :

a) on calcule $\frac{K-1}{To}$ en prenant $N' = N$

b) on porte $\frac{K-1}{To}$ dans N'

c) on calcule une nouvelle valeur de $\frac{K-1}{To}$

d) on recommence autant de fois qu'il est nécessaire ($\frac{K-1}{To}$ converge vers sa valeur limite).

E - CALCUL DE K

Il faut trouver la plus grande valeur propre d'une matrice semblable à :

$$[I-N]^{-1}\ k$$

L'inversion de I-N est souvent délicate, il est préférable d'écrire :

$$\frac{|\ x >}{K} \ = \ k^{-1}(I-N)\ |\ x > \qquad (E1)$$

Il existe des méthodes classiques pour calculer la plus grande valeur propre d'une matrice. Par exemple la méthode des puissances : On multiplie un vecteur un grand nombre de fois par la matrice; ce vecteur devient progressivement vecteur propre et le rapport des deux composantes successives du vecteur tend vers la valeur propre de plus grand module. Le vecteur peut être normalisé avant chaque multiplication.

Pour calculer numériquement $^1/_K$, on peut utiliser une constante positive C :

$$\left(\frac{1}{K} - C\right)\ |\ x > \ = \ \left[\ k^{-1}\ [I-N] \quad - CI\right] \quad |x > \qquad (E2)$$

Il faut choisir C de façon que $\frac{1}{K}$ -C soit la valeur propre de plus grand module. Or, on a une évaluation de la plus petite valeur propre Kmin par le théorème d'Hadamard (voir plus loin).

C'est :

$$K \min \geqslant \underset{i}{\mathrm{Min}} \left(\frac{ki}{1+V'i} \right) > \underset{i}{\mathrm{Min}} \frac{ki}{2} \qquad \text{(E3)}$$

E3 permet d'obtenir $\frac{1}{C}$ ou plutôt une borne inférieure de C.

Mais C ne doit pas être trop grand car la convergence dépend du rapport des deux plus grandes valeurs propres (en modules). On prend donc :

$$\frac{1}{C} = \underset{i}{\mathrm{Min}} \left(\frac{ki}{1+V'i} \right) \left(\text{ou} \quad = \underset{i}{\mathrm{Min}} \frac{ki}{2} \right) \qquad \text{(E4)}$$

on est alors assuré que toutes les valeurs propres sont négatives.

On trouvera en annexe un programme de calcul pour IBM 7094 qui utilise cette méthode.

F - CALCUL APPROCHE DE K

Si la matrice est trop volumineuse pour les moyens de calcul dont on dispose, il est possible de calculer une valeur maximum de K . C'est un problème de localisation de valeur propre.

F-a - *Théorème de M.J. HADAMARD*

"Pour qu'une matrice carrée A d'ordre n, d'éléments a_{ij} réels ou complexes
"soit régulière, il suffit que soient satisfaites les n inégalités :
"

$$|a_{jj}| > P_j \qquad \text{(F1)}$$

"
"ou les n inégalités :
"

$$|a_{jj}| > Q_j \qquad \text{(F2)}$$

"
"

$$\text{"avec} \qquad P_j = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n} |a_{ji}| \qquad \text{(F3)}$$

"
"
"

$$\text{"et} \qquad Q_j = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^{n} |a_{ij}| \qquad \text{(F4)}$$

"
"
"

Si la matrice A a une valeur propre λ , on ne peut avoir

$|a_{jj} - \lambda| > P_j$ ou $|a_{jj} - \lambda| > Q_j$ car la matrice $A-\lambda I$ n'est pas régulière.

Les valeurs propres sont donc comprises entre les limites :

$$\left| \underset{j}{\mathrm{Min}} \left(a_{jj} - P_j\right) \leqslant \lambda \leqslant \right| \underset{j}{\mathrm{Max}} \left(a_{jj} + Q_j\right) \qquad \text{(F5)}$$

et

$$\left| \underset{j}{\mathrm{Min}} \left(a_{jj} - Q_j\right) \leqslant \lambda \leqslant \right| \underset{j}{\mathrm{Max}} \left(a_{jj} + P_j\right) \qquad \text{(F6)}$$

(dans le plan complexe, les limites sont les cercles de Gerschgorin).

F-b -*Critère de l'angle solide limite*

Appliquons F5 à l'équation tirée de B2 :

$$\frac{|x>}{K} = k^{-1} \; [I-N] \; |x> \qquad \text{(F7)}$$

Il vient :

$$\frac{1}{K} \geqslant \frac{1}{ki} - \frac{Vi}{ki} \qquad \text{(F8)}$$

et

$$\boxed{K \leqslant \underset{i}{\mathrm{Max}} \frac{ki}{1-Vi}} \qquad i = 1,2 \ldots n \qquad \text{(F9)}$$

Si Fi est majoré par 1 on a $Vi = \Omega i$ et il suffit de vérifier les inéquations :

$$\Omega i \leqslant 1 - ki \qquad \text{(F10)}$$

pour que K soit inférieur à 1 :

C'est le critère de l'angle solide limite appliqué aux lignes de la matrice.

De même F6 s'applique à l'équation tirée de A6 :

$$\frac{|y>}{K} = [I-N] \; k^{-1} \; |y> \qquad \text{(F11)}$$

et il vient

$$\boxed{K \leqslant \underset{i}{\mathrm{Max}} \frac{ki}{1-Vi'} \qquad i = 1,2 \ldots n} \qquad \text{(F12)}$$

Il lui correspond le critère de l'angle solide appliqué aux colonnes :

$$\Omega i' \leqslant 1 - ki \qquad i = 1,2 \ldots n \qquad \text{(F13)}$$

Il suffit que F10 ou F13 soit vérifié.

F-c - *Généralisation du critère*

Un changement de base ne modifie pas les valeurs propres.
Appliqué à F7, on est conduit à :

$$\frac{|z>}{K} = C^{-1} \; [I-N] \; k^{-1} \; C \; |z> \qquad \text{(F14)}$$

Si C est une matrice diagonale, elle commute avec k^{-1} et avec I donc :

$$\frac{|z>}{K} = [I-C^{-1} N C] \; k^{-1} \; |z> \qquad (F15)$$

F5 donne alors :

$$K \leqslant \underset{i}{\mathrm{Max}} \left(\frac{ki}{1-C_i \sum_{j=1}^{n} \frac{V_{ij}}{C_j}} \right) \qquad (F16)$$

et F6 de même, donne :

$$K \leqslant \underset{i}{\mathrm{Max}} \left(\frac{ki}{1-C_i \sum_{j=1}^{n} \frac{V_{ji}}{C_j}} \right) \qquad (F17)$$

Ainsi un choix judicieux de C permet de diminuer le maximum.

De la règle :

"N peut être remplacé par une matrice équivalente $C^{-1}N\,C$ où C est une ma-
"trice diagonale.

on peut déduire une autre règle en remarquant que C peut s'écrire :

$$C = [C_1] \; [C_2] \; [C_3] \; \ldots \qquad (F18)$$

où $[C_1]$ est une matrice unité dont un 1 est remplacé par une constante $C_1 \neq 0$:

" Si les éléments d'une ligne i de N sont multipliés par une constante Ci
" et les éléments de la colonne i correspondante sont divisés par Ci, on ob-
" tient une matrice qui peut remplacer N. L'opération peut être répétée plu-
" sieurs fois.

Pour une matrice définie positive, la plus grande valeur propre est comprise entre la plus grande et la plus petite des sommes des éléments d'une ligne (ou d'une colonne). Ceci conduit aux inégalités :

$$m \equiv \underset{i}{\mathrm{Min}} \frac{ki}{1-Vi} \leqslant K \leqslant \underset{j}{\mathrm{Max}} \frac{ki}{1-V_j} \equiv M$$

où Vi et V_j peuvent être modifiés par la règle.

On voit que si par ces modifications on fait tendre m vers M on aura m =M=K.

La matrice C peut se calculer par approximations successives en utilisant des Ci qui augmentent m et diminuent M . La différence M-m est une

mesure de l'incertitude absolue sur K. Le vecteur propre est connu quand on a calculé C. En effet, on voit sur F14 que $C|z>$ est le vecteur propre cherché et quand m=M, $|z>$ a toutes les composantes égales à 1.

Ainsi, cette méthode revient à pondérer les Vi (ou les V'i) sur les nombres de neutrons. Si la pondération n'est pas très bonne on a quand même une bonne évaluation de K (il suffit le plus souvent de multiplier 3 ou 4 lignes seulement).

G - LIMITES ET APPROXIMATIONS

Si on néglige les réflexions, on pose :

$$R = I \qquad (G1)$$

alors, A4 donne :

$$K|y> = k\,[I+N]\,|y> \qquad (G2)$$

et il vient :

$$K \leqslant \max_i \; ki\,(1+Vi) \qquad i = 1,2,\ldots n \qquad (G3)$$

Le critère correspondant a été longtemps utilisé : Si Fi est majoré par 1, on a $\Omega i = Vi$ et K ne dépasse pas 1 avec l'angle limite Ωi^1 donné par :

$$1 = ki\,(1+\Omega i^1) \qquad (G4)$$

$$\Omega i^1 = \frac{1-ki}{ki} \qquad (G5)$$

G5 est à remplacer par F10 :

$$\Omega i^1 = 1-ki \qquad (G6)$$

si on tient compte des réflexions avec $R \neq I$

Dans l'hypothèse où chaque élément est semi-réfléchi, ki est remplacé par $\frac{ki+1}{2}$ et G5 est représenté par une hyperbole qui est voisine de la droite :

$$\Omega i^1 = 9 - 10\,ki \qquad \text{(en stéradians)} \qquad (G7)$$

(On trouve G7 dans Nuclear Safety guide TID-7016 fig. 26)
alors que G6 donne une autre droite :

$$\Omega i^1 = 2\pi\,(1-ki) \qquad (G8)$$

Ces droites se coupent pour ki = 0,73. Au-dessous de cette valeur G7 n'est plus un bon critère. Cependant le fait de majorer Fi, et surtout l'hypothèse de semi réflexion, laissent une marge de sécurité; mais il est préférable d'utiliser G8.

La méthode de calcul n'est valable que si les fuites sont isotropes. Ceci n'est

jamais réalisé en pratique, car il faudrait que tous les ki soient plus grands que 1. Si les ki ne sont pas trop petits, l'isotropie est presque réalisée.

On évitera l'introduction dans la matrice d'éléments ayant $k_\infty < 1$: ils se comportent comme des réflecteurs et on en tiendra compte en majorant les ki de façon à avoir ces ki compte tenu de ces réflexions.

CONCLUSION

Cette étude montre que le calcul de K, coefficient de multiplication d'un ensemble, peut être abordé par plusieurs méthodes. Les raisonnements par générations qui ne font pas intervenir le temps conduisent au même résultat que les équations d'évolution.

Le problème se réduit au calcul d'une valeur propre d'une matrice. Les différentes méthodes conduisent à des matrices équivalentes. Nous avons utilisé plusieurs de ces matrices pour obtenir des critères qui généralisent le critère de l'angle solide limite.

Le vecteur propre qui représente la répartition des neutrons est plus difficile à atteindre que K car on ne peut choisir au hasard une matrice.

L'application de cette théorie est faite dans un code d'interaction connu à Saclay sous le nom SEC 043. Il est utilisé pour les calculs d'installations.

Manuscrit reçu le 18 Août 1964

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

1 R. MURRAY et G. SCHMIDT - Interaction of solutions of uranium salts
AECD 3909 (1947)

2 H.F. HENRY - Interaction of enriched uranium assemblies
AECD 3740 (23 nov. 1949)

3 J.A. POND - Critical geometries for bare cylinders
GAT-189 (20 juin 1956)

4 H.F. HENRY - J.R. KNIGHT - General application of a theory of neutron interaction
C.E. NEWLON K 1309 (15 nov. 1956)

5 H.F. HENRY - C.E. NEWLON - Self consistent criteria for evaluation of neutron
J.R. KNIGHT interaction K 1317 (21 dec. 1956)

6 H.F. HENRY - C.E. NEWLON - Extensions of neutron interaction criteria
J.R. KNIGHT K 1478 (11 Juin 1961)

7 J.C. MOUGNIOT - Thèse 3ème cycle Faculté de Paris
Aspects théoriques et expérimentaux de l'interaction neutronique entre milieux multiplicateurs de neutrons (1963)

8 J. LECLERC - J.C. MOUGNIOT - Guide de criticité - Saclay (1964)
F. PENET

9 M. CADILHAC - Considération préliminaire à l'étude statique et dynamique d'un réacteur rapide.
Rapport interne CEA-(SPM 529 19-1-1959)
repris par :
A. BLAQUIERE Théorie de la réaction de fission en chaîne
Presses Universitaires de France (1962)
Chapitre 7-B : Théorie cinétique générale.

10 E. DURAND - Solutions numériques des équations algébriques
Masson (1961)

11 M. PARODI - La localisation des valeurs caractéristiques des matrices
Gauthier-Villars (1959)

ANNEXE I

PROGRAMME D'INTERACTION (SEC 043)

par Jean MORET-BAILLY

INTRODUCTION

Le programme SEC 043 a été mis au point au fur et à mesure que la théorie s'élaborait.

Il était destiné à l'origine à calculer des angles solides pour la règle de l'angle solide limite. Puis les k effectifs ont été calculés avec les fuites. Le problème des ombres a été ensuite abordé et résolu par F. PENET.

Entre temps, la règle de l'angle solide a été modifiée.

La possibilité de grouper des éléments a été introduite. Elle permet de traiter les problèmes où une partie est en sécurité sur la masse, et le reste en securité géométrique.

Une dernière modification est en cours de réalisation. Elle ne modifie pas le début du programme; elle exploite les résultats obtenus en donnant en plus le k effectif maximum obtenu par le calcul sur les colonnes de la matrice d'interaction. Pour 100 éléments on calcule également le k effectif (voir les dernières pages).

Il faut remarquer que SEC 043 n'est pas très bien adapté au calcul des réseaux. Une version adaptée existe.

PROGRAMME PRINCIPAL

Ce programme calcule les interactions neutroniques entre des sphères, des cylindres et des plaques contenant de l'uranium enrichi ou du plutonium. L'axe d'un cylindre et les côtés d'une plaque doivent être parallèles aux axes de coordonnées X, Y et Z.

Le calcul s'effectue de la façon suivante :

a) Pour chaque élément, calcul du facteur de fuite F et du k effectif nu.

b) Pour chaque élément l, calcul des angles solides maximums $\Omega_{j \longrightarrow l}$. Si un élément fait ombre entre j et l, $\Omega_{j \longrightarrow l} = 0$.

c) Si un groupe d'éléments l_1, l_2, ... l_n, a un k effectif connu, les angles solides entre ces éléments sont annulés; le facteur de fuite est pris égal au minimum des n facteurs de fuite; l'angle solide vers les autres éléments est pris égal au maximum des n angles solides maximums ; l'angle solide vers ce groupe est pris égal à la somme des angles solides. Dans la suite, cette option est appelée : procédure de SUITE.

d) Pour chaque élément ou groupe, calcul de :

$$K_l = \frac{kl}{1 - \sum_j \Omega_{j \longrightarrow l} F_j} \qquad \text{et} \qquad K_{l1/2} = \frac{\frac{kl + 1}{2}}{1 - \sum_j \Omega_{j \longrightarrow l} F_j}$$

$K_l \geqslant$ keff nu de l'élément l en interaction

$K_{l1/2} \geqslant$ keff semi-réfléchi de l'élément l en interaction

Remarque : le calcul n'est valable que pour des keff < 1

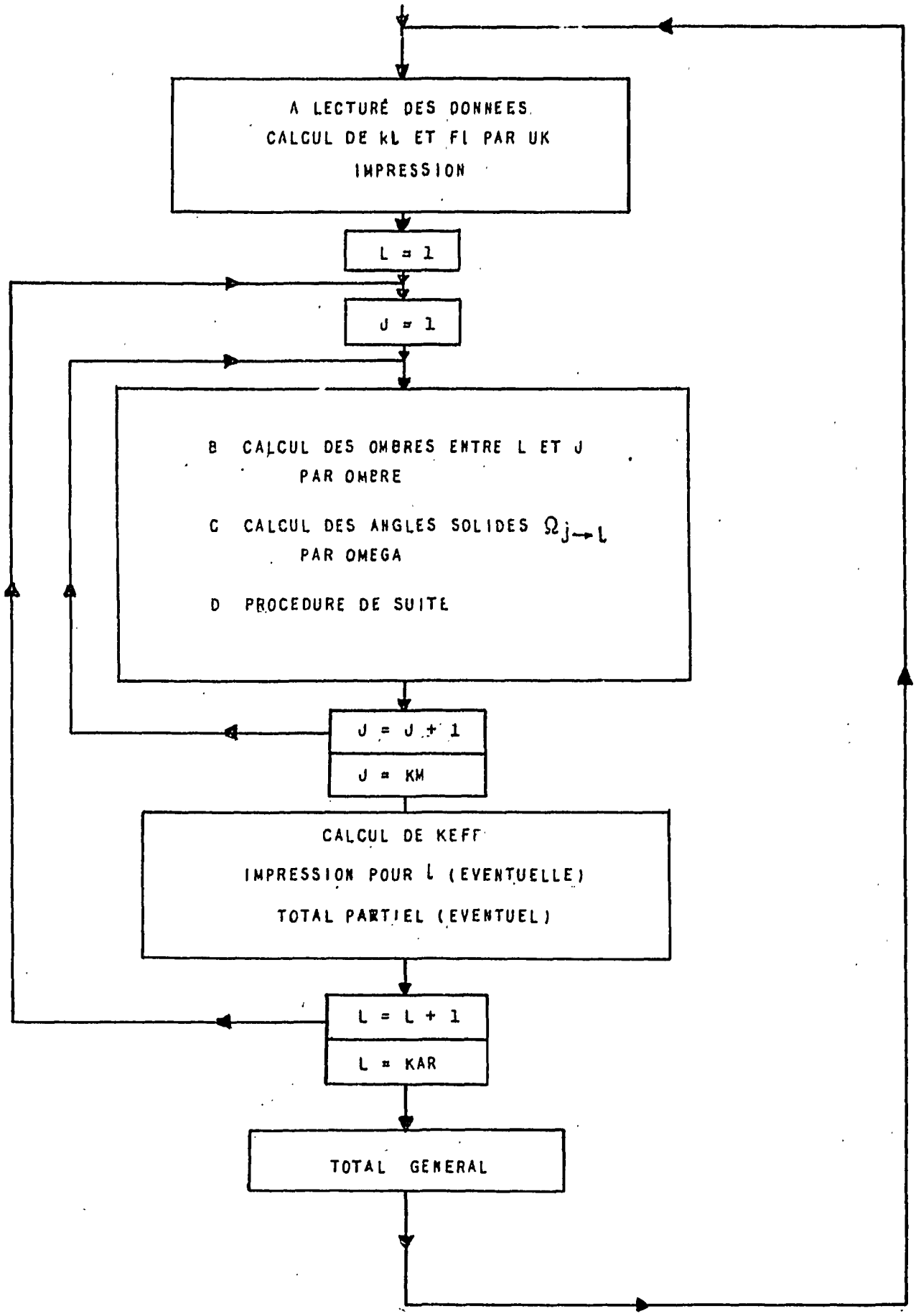
Le Keff de l'ensemble est inférieur au $K_{l1/2}$ maximum qui est calculé à la fin.

Le programme principal organise les entrées/sorties ainsi que la double boucle en j et l. De plus, il fait des calculs préliminaires à l'appel de la fonction OMBRE (calcul des ombres), appelle les sous-programmes UK (calcul de F et de K) et OMEGA (calcul de l'angle solide maximum) et sélectionne les options: CONS, VAR, ECRAN, SUITE, AVEC OMBRE, SANS OMBRE, etc... prévues en lecture.

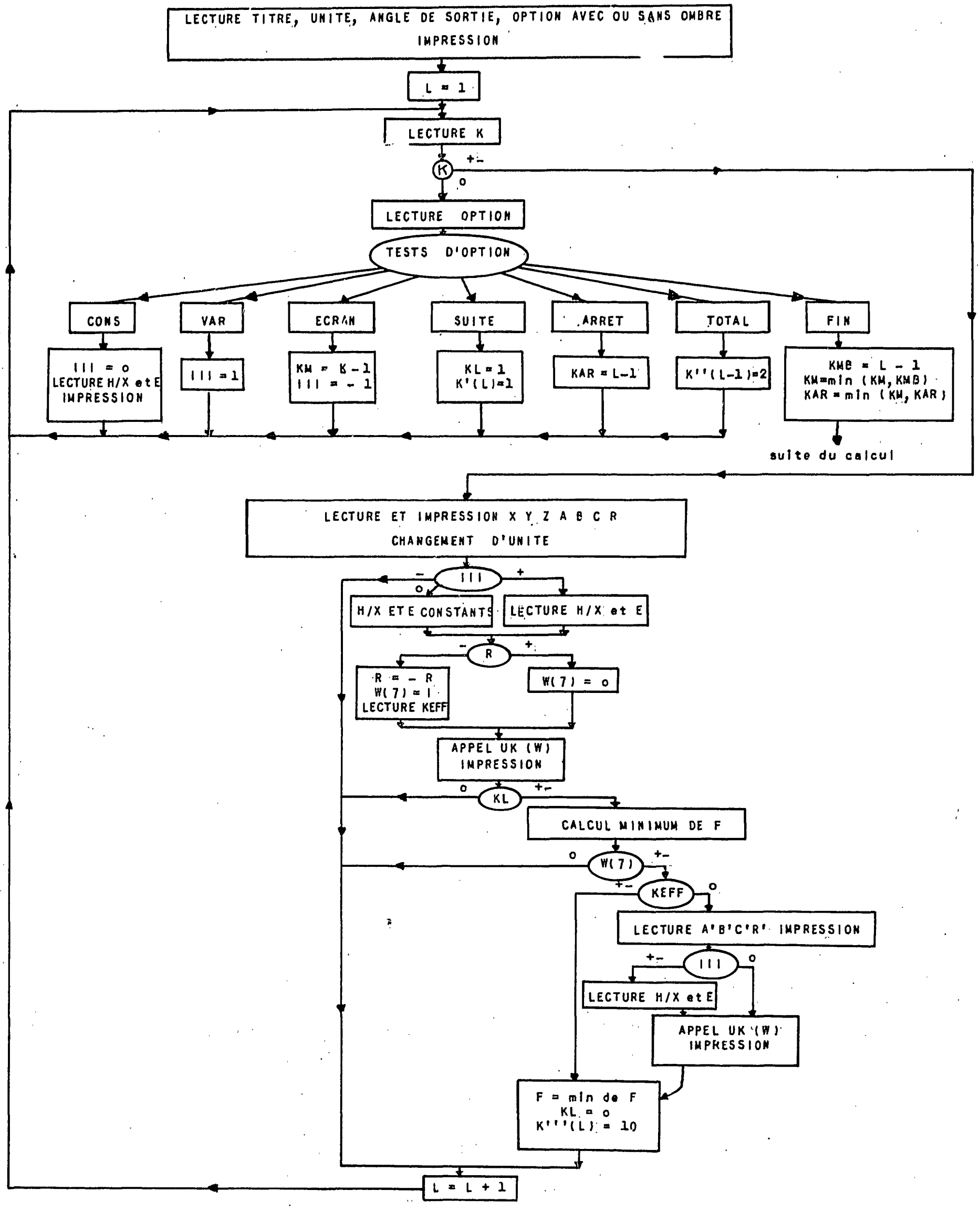
Une fonction OMBRE est décrite dans l'annexe II; Rapport écrit par MM. F. PENET et J.C. SPINELLI. Il en existe d'autres versions.

Les schémas qui suivent expliquent le principe du calcul.

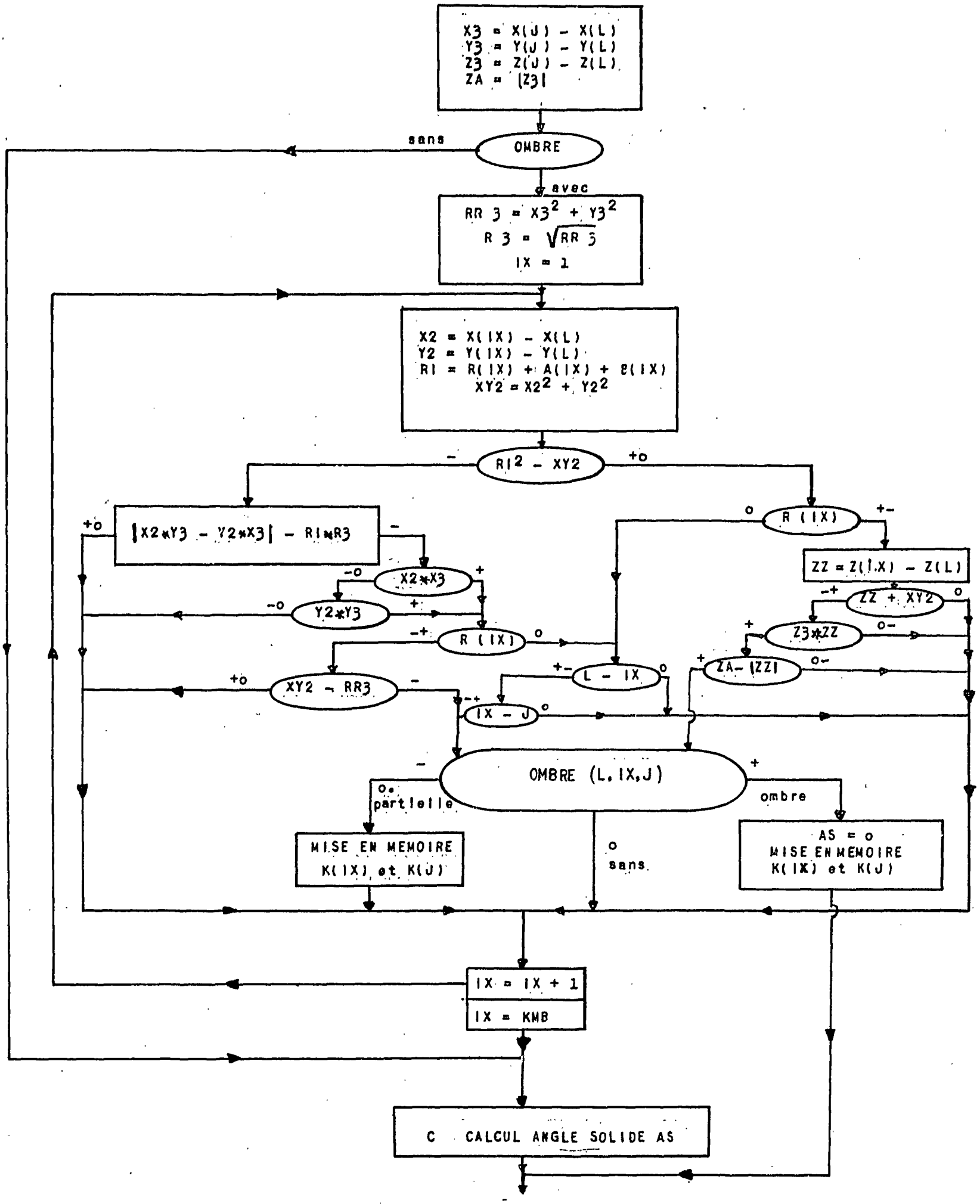
Sous-programmes BBL recherchés pour l'exécution : (FPT) (CSM) (RTN) (SPH) (FIL) EXIT CONTRL RAC ACOS ASIN (ART2 EXP(3 LOG EXP.



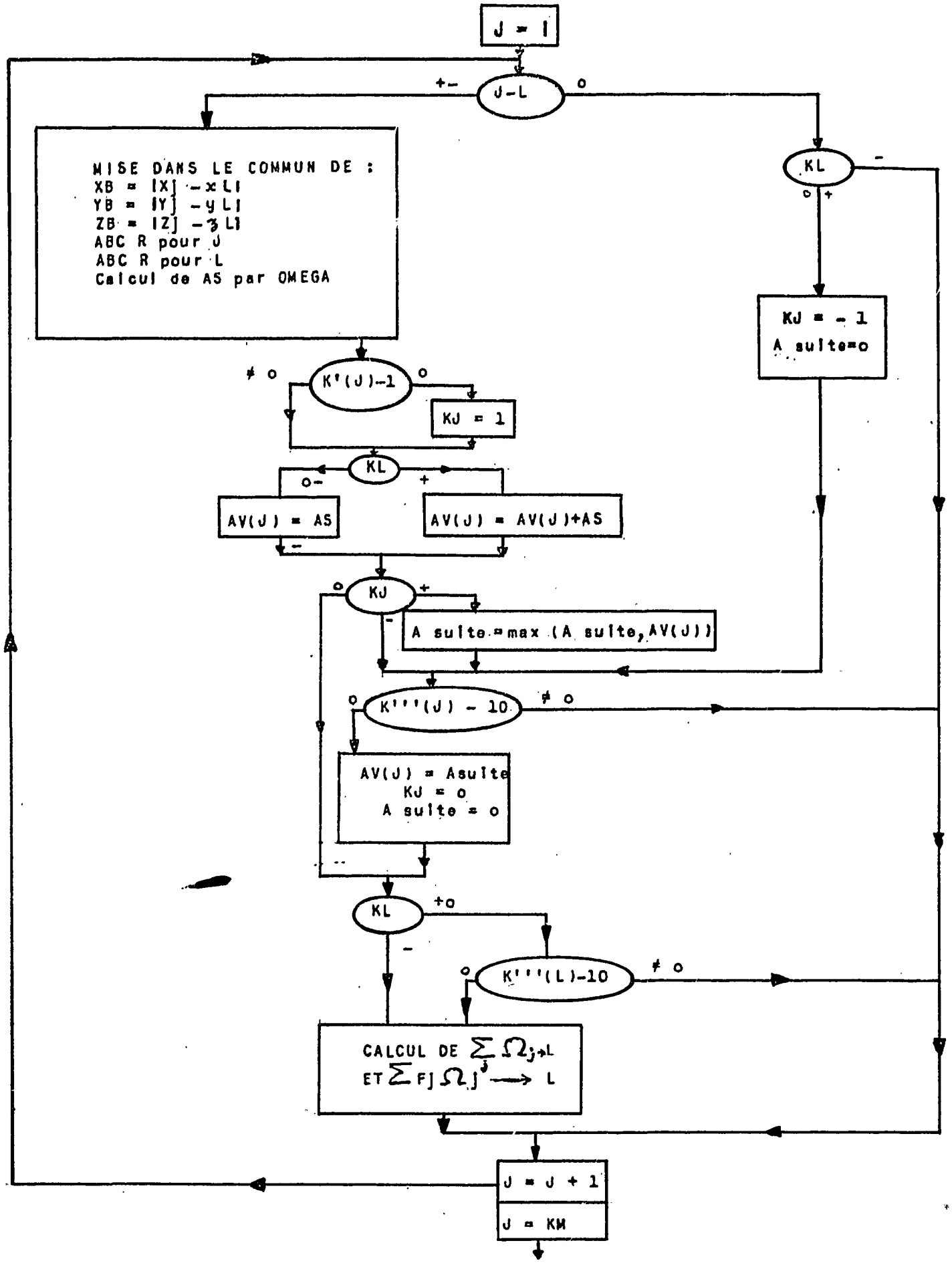
ORGANISATION GENERALE DU PROGRAMME D'INTERACTION SEC 043



A - LECTURE DES DONNEES - CALCUL DE F_1 et K_1 par UK - IMPRESSION -



B - APPEL DE LA FONCTION OMBRE



C - CALCUL DE L'ANGLE SOLIDE PAR OMEGA

D - PROCEDURE DE SUITE

SOUS-PROGRAMME O M E G A (FAP) $|33|_8$

Ce sous-programme calcule l'angle solide maximum $\Omega_{j \longrightarrow 1}$.

Les données arrivent par le Commun. Ce sont :

XB, YB, ZB : Projections sur les axes de la distance des centres de deux éléments

$$XB = |x_j - x_1| \qquad YB = |y_j - y_1| \qquad ZB = |z_j - z_1|$$

A_j, B_j, C_j, R_j et A_1, B_1, C_1, R_1 : demi-côtés, demi-hauteurs et rayons.

L'angle solide se calcule à partir d'un point vers un élément 1. Le point est recherché sur l'élément j de façon que l'angle soit maximum. La plus grande partie de OMEGA est destinée à la recherche de ce point. L'angle solide d'un point vers une sphère est calculé par un petit sous-programme incorporé : Angle S. L'angle solide d'un point vers un cylindre est calculé par le sous-programme : Angle C. L'angle solide d'un point vers une plaque est calculé par le sous-programme : Angle P.

La recherche du point est rapide ou compliquée suivant les cas de figure. Pour réduire le nombre de ces cas, OMEGA procède souvent à des changements d'axes. Ainsi, par exemple, la recherche d'un point sur un cylindre se fait toujours sur un cylindre vertical.

APPROXIMATIONS -

Les principes qui ont guidé dans la recherche de la position du point sont les suivants :

Toutes les fois que cela est possible : calcul rigoureux.

1ère approximation :

Recherche point par point sur la surface (ou une ligne de la surface) de l'élément. Ces points sont distants de 10 cm en général (parfois 5 cm). L'angle solide est calculé chaque fois et on garde l'angle maximum.

2ème approximation :

Recherche point par point sur une surface extérieure à l'élément (très souvent on considère le parallélépipède circonscrit à un cylindre). L'angle est majoré.

3ème approximation :

Point le plus proche. L'angle peut être minoré. C'est le cas, par exemple, du calcul Sphère vers plaque : la plaque peut être vue par la tranche.

4ème approximation :

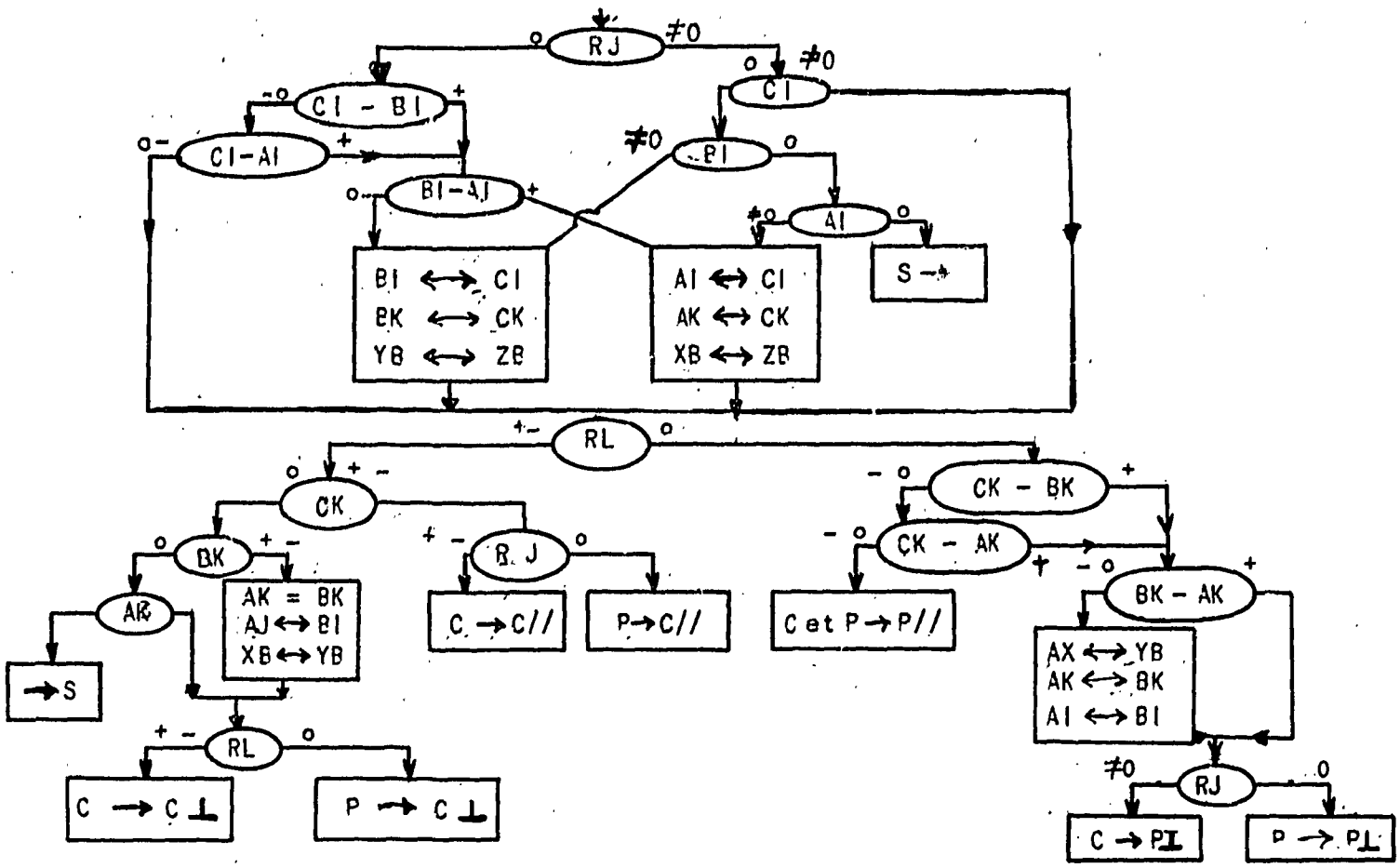
Les plaques sont souvent considérées comme minces : la recherche du point est faite seulement sur la plus grande face et rarement sur la tranche.

Enfin, il faut remarquer que les formules utilisées par angle C ne sont pas très bonnes à courte distance.

Dans les schémas qui suivent, on trouvera les méthodes utilisées.

O M E G A

CHANGEMENT D'AXES ET SELECTIONS DES PRINCIPAUX CAS DE CALCUL



C → P⊥ abréviation de : calcul de l'angle solide d'un cylindre vers une plaque dont l'axe est perpendiculaire à l'axe de la plaque.

L'axe d'une plaque est dans la direction de son plus petit côté.

Pour des éléments d'axes parallèles, la direction est Z.

Pour des éléments d'axes perpendiculaires, les directions sont Z et X.

↔ abréviation d'échange :

RL	rayon de l'élément L	RJ	rayon de l'élément J
AK	1/2 côté de " "	AI	1/2 côté de " "
BK	" " " "	BI	" " " "
CK	" " " "	CI	" " " "

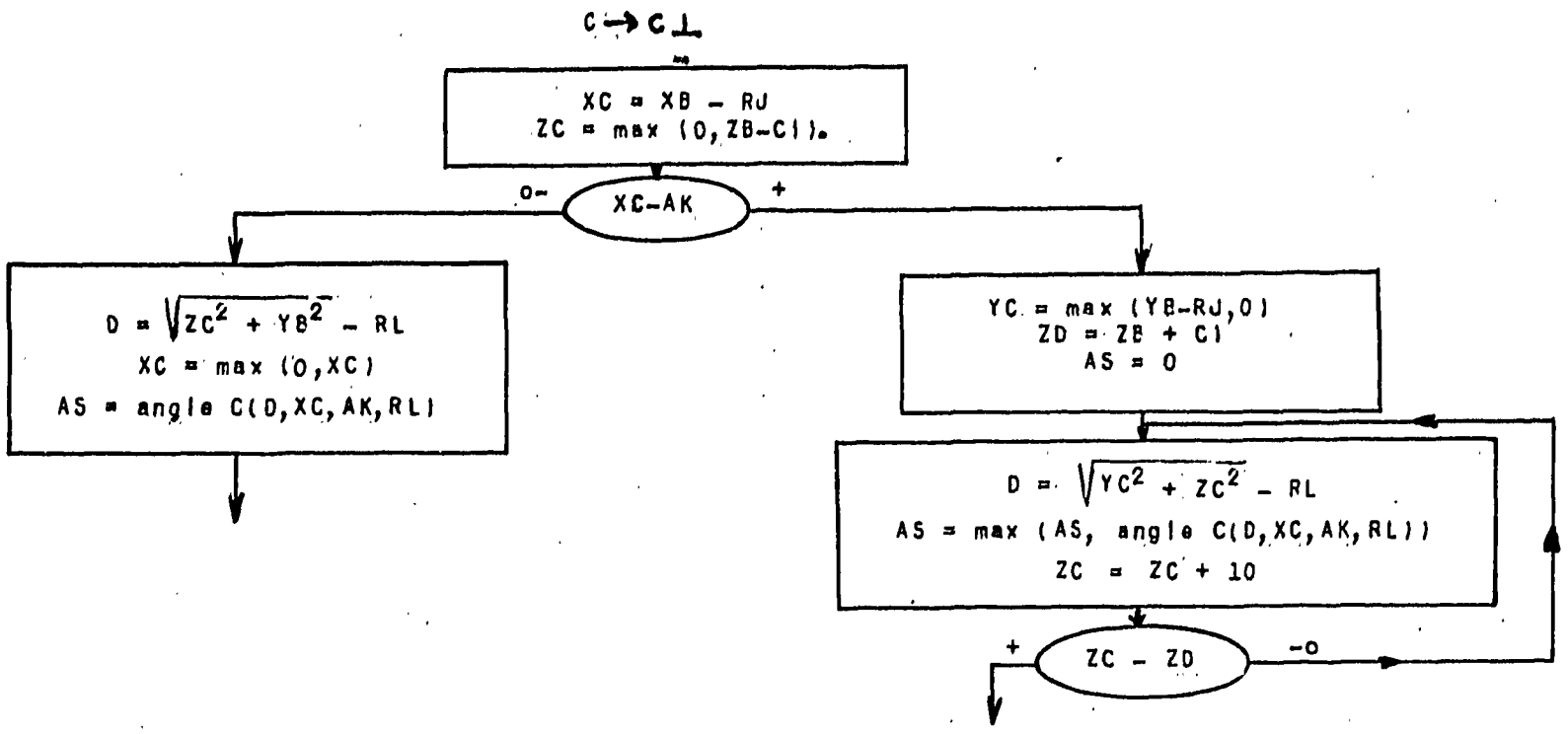
$XB = |X_1 - X_j|$

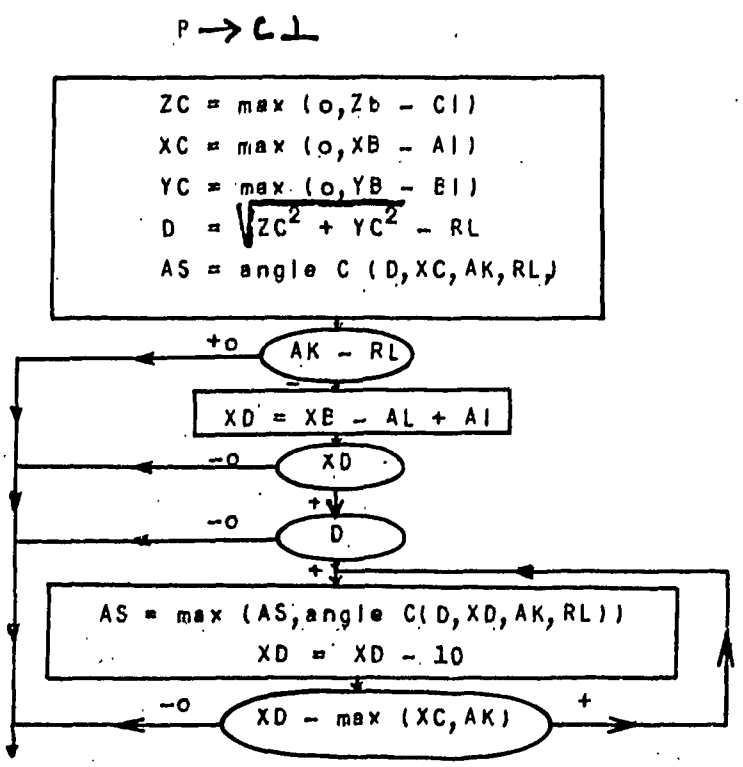
$YB = |Y_1 - Y_j|$

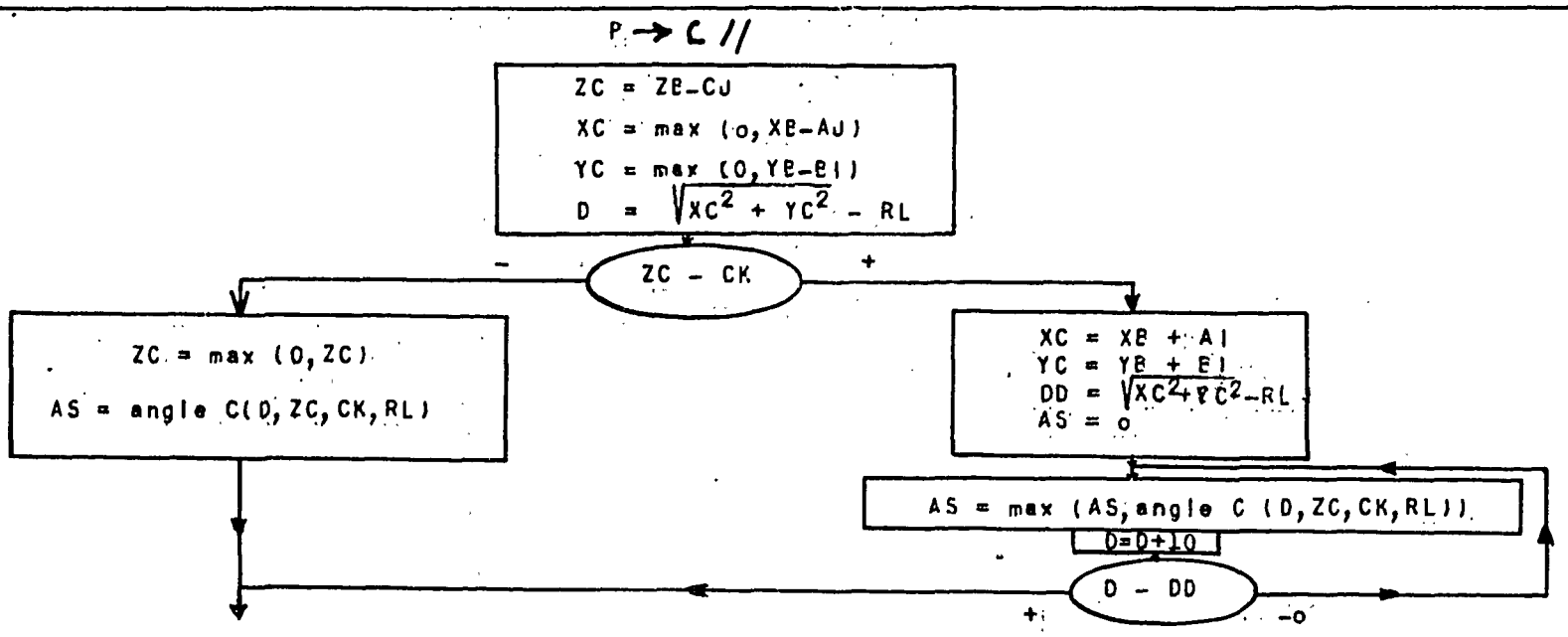
$ZB = |Z_1 - Z_j|$

AS = angle solide

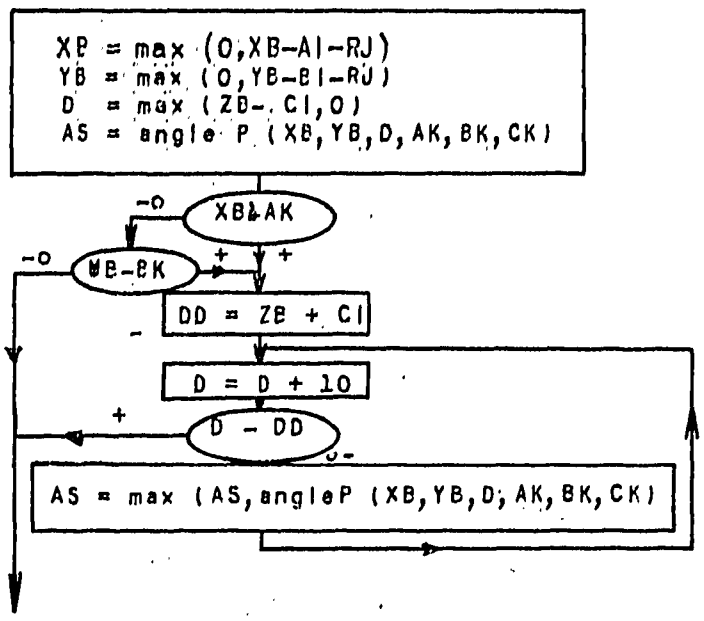
L'unité de longueur est le centimètre.


C → C⊥
XC = XB - RJ
ZC = max (0, ZB-CI).
XC-AK
D = √(ZC² + YB²) - RL
XC = max (0,XC)
AS = angle C(D,XC,AK,RL)
YC = max (YB-RJ,0)
ZD = ZB + CI
AS = 0
D = √(YC² + ZC²) - RL
AS = max (AS, angle C(D,XC,AK,RL))
ZC = ZC + 10
ZC - ZD

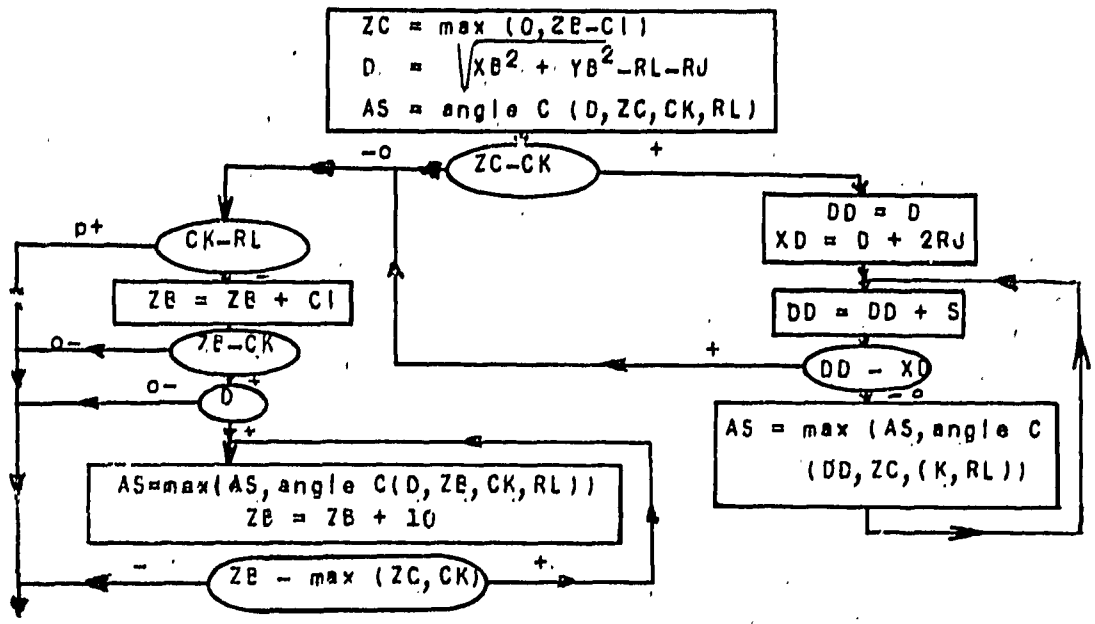

P → C⊥
ZC = max (o,Zb - CI)
XC = max (o,XB - AI)
YC = max (o,YB - BI)
D = √(ZC² + YC²) - RL
AS = angle C (D,XC,AK,RL)
AK - RL
XD = XB - AL + AI
XD
D
AS = max (AS,angle C(D,XD,AK,RL))
XD = XD - 10
XD - max (XC,AK)


P → C //
ZC = ZB-CJ
XC = max (o,XB-AJ)
YC = max (0,YB-BI)
D = √(XC² + YC²) - RL
ZC - CK
ZC = max (0,ZC)
AS = angle C(D,ZC,CK,RL)
XC = XB + AI
YC = YB + BI
DD = √(XC²+YC²)-RL
AS = o
AS = max (AS,angle C (D,ZC,CK,RL))
D=D+10
D - DD

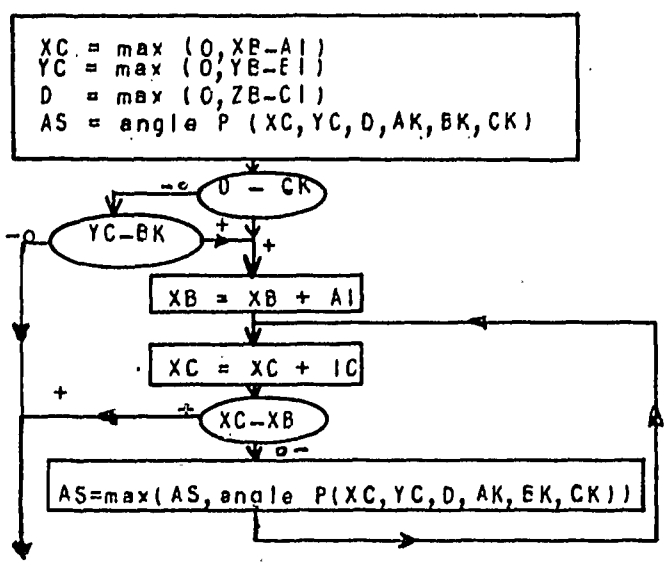
C et P ⟶ P//



C ⟶ C//



P ⟶ P⊥



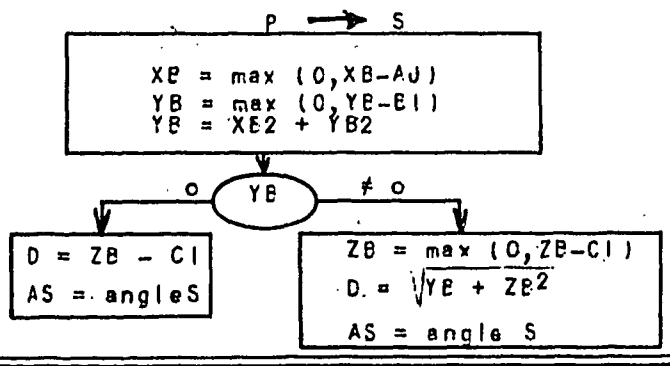
C ⟶ P⊥

XB = max (0,XB-RJ)
YB = max (0,YB-RJ)
D = max (0,ZB-CI)
AS = angle P (XB,YB,D,AK,BK,CK)

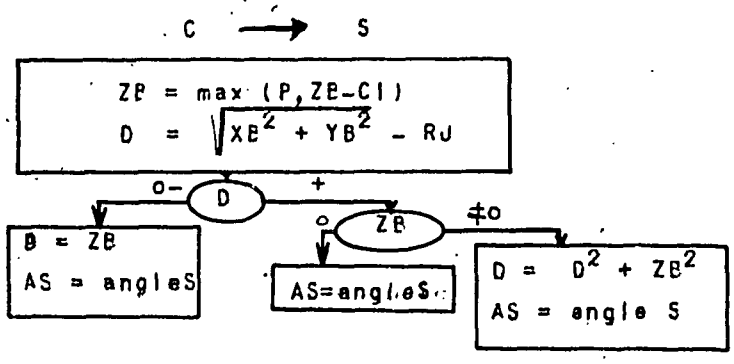
S ⟶ P

XB = XB-RJ ou XB si (XB-RJ) ≤ 0
YB = YB-RJ ou YB si (YB-RJ) ≤ 0
ZB = ZB-RJ ou ZB si (ZB-RJ) ≤ 0
AS = angle P (XB,YB,ZC,AK,BK,CK)

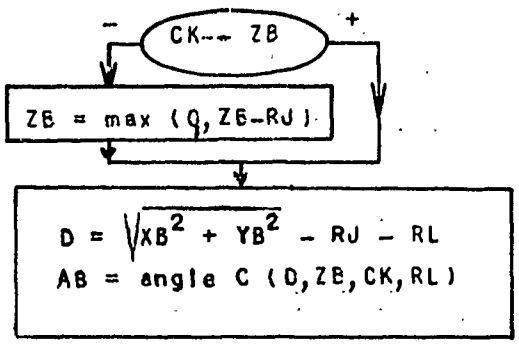
P ⟶ S



C ⟶ S



S ⟶ C (axe Z)



S ⟶ S

D = (XB2 + YB² + ZB²)^½ - RJ

AS = angle S

$$\text{angle } S = 2\pi\left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{RL}{D}\right)^2}\right)$$

FONCTION ANGLE C (D, Z, H, R) (FAP) 205_8

Calcul de l'angle solide sous lequel on voit un cylindre à partir d'un point donné:

D = distance du point au cylindre (en projection parallèle à l'axe)

Z = distance du point au centre du cylindre (en projection perpendiculaire à l'axe)

H = demi-hauteur du cylindre

R = rayon du cylindre

L'angle solide du côté du cylindre est calculé par :

$$AC = 2 \text{ Arc sin } \frac{1}{DR\sqrt{1 + (D/A)^2}} \quad \text{avec} \quad DR = 1 + \frac{D}{R} \quad \text{et } A = Z + H$$

(point dans le plan de base du cylindre)

L'angle solide du disque est calculé par :

a) si $D > 0$

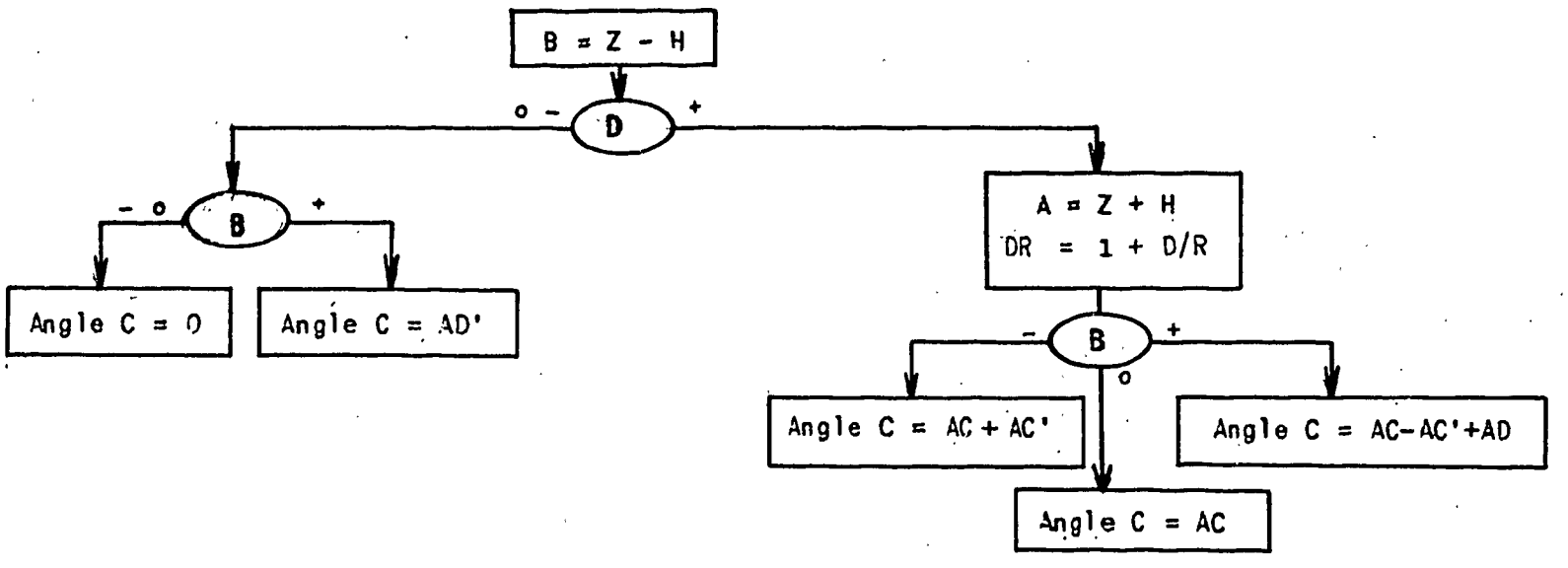
$$AD = 2\pi \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{\left[\frac{B^2}{R^2} + D(1+\frac{D}{R})\right]\sqrt{1+(\frac{D+R}{B})^2}}}} \right)$$

avec $B = Z - H$

b) si $D \leqslant 0$

$$AD' = 2\pi \left(1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R^2}{B^2}}} \right)$$

toutes ces formules sont approchées. Elles ne sont mauvaises que pour des angles solides assez grands, c'est-à-dire pour des éléments très rapprochés pour lesquels de toute façon la méthode est mauvaise.



FONCTION ANGLE P (X, Y, Z, A, B, C) (FAP) 252_8

Calcul de l'angle solide d'un point vers un parallélépipède rectangle.

X, Y, Z : coordonnées du point par rapport au centre du parallélépipède.

A, B, C : demi-côtés.

Pour un point se projetant sur un des sommets d'un rectangle, l'angle solide est (a et b étant les côtés et d la distance):

$$AP = \frac{1}{2} \text{ Arc cos } \left(1 - \frac{2\, a^2\, b^2}{(d^2 + a^2)\,(d^2 + b^2)} \right)$$

Angle P combine, par additions ou soustractions, quatre angles AP pour obtenir l'angle solide vers une face.

Si plusieurs faces sont vues du point, on ajoute les angles solides correspondants.

SOUS PROGRAMME PSLD I

Ce sous-programme de lecture des cartes données est incorporé au paquet binaire. Il respecte les signes des nombres lus même quand ce nombre est 0. Ce sous-programme est analogue au sous-programme PSLD 1 utilisé sur IBM 7094 à SACLAY, à ce détail près.

REMARQUE : Depuis fin 1964, on utilise à Saclay le sous programme modifié à notre demande.

SOUS PROGRAMME UK (R) (FORTRAN) 575_8

La fonction UK (R) cálcule les fuites et le keff nu d'un élément.

Les données sont :

R(1) = R

R(2) = A)
R(3) = B) demi-côtés ou demi-hauteurs
R(4) = C)

R(5) = H/X

R(6) = E

prendre R(7) = 0 si on veut calculer R(8) et R(9) et 1 si on ne désire que R(8).

Les sorties se font par :

R(8) : probabilité antifuite

R(9) : keff nu

UK calcule d'abord B^2 rapide et B^2 thermique en prenant 2,5 et 0,36 comme longueurs d'extrapolation puis $L^2 = 8,29\ (1-f)$

$$R(8) = \frac{1}{(1 + L^2 B_{th}^2)\ (1 + B^2)\ (1 + 4,2\ B^2)\ (1 + 20,2\ B^2)}$$

$$R(9) = \varepsilon\ p\ \eta\ f\ R(8)$$

Pour le plutonium R(6) = 0 permet d'orienter le calcul vers :

$$f = \frac{1065}{1065 + 0,33\ H/X} \qquad \varepsilon p = 1 \qquad \eta = 2,03$$

Pour l'uranium, on utilise les équations :

$$GG = 695,25\ E + 2,75$$

$$f = \frac{GG}{GG + 0,33\ H/X} \qquad \eta = \frac{1,451,4\ E}{GG}$$

$$S = \frac{24,5\ H/X}{1 - E}$$

Si $S \leqslant 1000$ $\quad A = 3,9\ S^{0,415}$

Si $S > 1000$ $\quad A = 240 \exp(-1,2463 \exp(-0,324 \log_e (\frac{S}{1000})))$

$$p = \exp\left(\frac{(1-E)\ A}{22,7115\ H/X}\right)$$

Ces équations donnent des résultats assez bons pour des H/X plus grands que 50. Pour des H/X plus petits, le keff nu est majoré par ces formules.

DONNEES POUR SEC 043

Carte 1 : Titre (de 1 à 72)

Carte 2 : a) unité de longueur utilisée exprimée en mètres.

b) angle limite de sortie des résultats détaillés par éléments: il faut un angle solide plus grand que celui-ci pour que les résultats concernant un élément soient imprimés. Pour 0, tous les résultats sortent en impression.

c) si on désire utiliser le sous-programme ombre mettre: AVEC ØMBRE (en 2 mots) sinon : SANS ØMBRE. Ces renseignements seront imprimés au début après le titre.

Carte 3 : soit : 0 CØNS H/X total E si H/X total et E sont constants dans la suite

soit : 0 VAR si H/X total et E sont variables dans la suite.

Ces cartes peuvent être utilisées dans la suite : à partir de l'une de ces cartes H/X total et E sont : soit redéfinis constants, soit variables.

Cartes suivantes (en nombre $\leqslant$ 500) et par carte :

a) le numéro de l'élément ($\neq$ 0). Si ce numéro est < 0 il y a toujours sortie des résultats détaillés pour cet élément.

b) X Y Z coordonnées du centre.

c) A B C dimensions des côtés ou hauteur du cylindre;
0 pour les valeurs inutilisées.

d) R rayon (ou 0). Si R est précédé de -, le keff nu de l'élément sera lu après R si H/X total et E sont constants ou après E si H/X total et E sont variables.

e) H/X total E s'ils sont variables.

f) K effectif nu de l'élément si un signe - est devant R.
Keff = 0 est réservé pour une suite.

Cartes d'options à mettre entre les cartes du paquet :

0 CØNS)
0 VAR) voir plus haut

0 ECRAN à partir de cette carte les éléments sont considérés comme des écrans, c'est-à-dire que ces éléments ne sont utilisés que pour porter ombre sur les éléments actifs. Ne pas mettre H/X total, E et Keff dans ce cas.

0 SUITE à partir de cette carte les éléments suivants constituent une suite. La fin de la suite est indiquée par - R, ce qui implique la lecture d'un Keff. Si Keff = 0 il y a alors à ajouter des données A B C R et, éventuellement, H/X total et E pour le calcul du Keff global de la suite.

0 FIN cette carte permet la séparation de plusieurs cas. Sa présence déclenche le calcul d'interaction pour les cartes qui précèdent.

0 ARRET cette carte permet d'arrêter le calcul d'interaction sans aller jusqu'à 0 FIN. Le total partiel est imprimé.

0 TOTAL cette carte permet de sortir un total partiel en plus du total général donné par la carte 0 FIN.

Remarques :

Si E = 0 le programme considère une solution de plutonium et dans les autres cas de l'uranium.

Plusieurs cas peuvent être traités à la suite. Toutes les entrées sauf la carte titre se font en PSLD1, c'est-à-dire en séparant par des virgules ou par des blancs.

IMPRESSION DES RESULTATS

Au début, il y a impression d'un tableau contenant les données ainsi que F et keff nu de chaque élément.

Puis, pour chaque élément l, si le détail est demandé, il y a impression d'un tableau contenant :

le numéro de l'élément. $\Sigma_j \Omega_{j \to 1}$, Kl et Kl1/2 suivis des $\Omega_{j \to 1}$ et des $\Omega_{j \to 1} F_j$ $\Omega_{1 \to 1} F_1$ est remplacé par $\frac{Kl + 1}{2}$

Les ombres trouvées sont indiquées.

$\Sigma_j \left| \Omega_{j \to 1} \right.$ A la fin, ou si un ordre TOTAL a été donné, sort le tableau contenant les et les Kl1/2. Le Kl1/2 maximum est indiqué comme étant le keff à prendre pour l'ensemble.

DETECTION DES ERREURS

a) *Erreurs de lecture :*

Dès que les données ne sont plus interprétables par le programme, il y a arrêt de la lecture. Il y a arrêt également si la carte 0 FIN n'est pas rencontrée à la fin du paquet de cartes.

b) *Erreurs pendant le calcul :*

Si des éléments sont trop rapprochés, il peut y avoir des erreurs de calcul comme par exemple le calcul d'une racine d'un nombre négatif, ou le calcul d'un angle solide à partir d'un point situé à l'intérieur d'un élément. Dans tous ces cas et lorsque l'angle solide calculé est plus grand que six stéradians, l'angle solide est remis à 0. Dans de nombreux cas l'opération est indiquée par : angle solide de j vers 1 = (valeur calculée) remplacé par 0.

DUREE DU CALCUL

Elle varie avec le nombre, le type et la position des éléments. Le temps d'impression quand le détail est demandé est d'environ 1/6 du temps total.

Sans ombre il faut environ :	(1 mn	pour	50	éléments
	) 4 "	"	100	"
	(16 "	"	200	"
	) 1 h	"	400	"

Avec ombres, le temps peut être doublé ou triplé.

Le nombre de lignes à prévoir si on a demandé le détail est environ

$$\frac{(\text{nombre d'éléments})^2}{3}$$

Remarque : Les impressions se font au fur et à mesure que le calcul avance. Si le calcul risque d'être arrêté au bout d'un certain temps, il est bon de prévoir des impressions dès le début.

MODIFICATION DU PROGRAMME

Après une autre évaluation de k effectif calculée avec les colonnes au lieu des lignes, le programme attaque le calcul de k effectif pour 100 éléments au maximum (une suite est considérée comme un élément).

On résoud le problème du calcul de la plus grande valeur propre (en module) d'une matrice par une méthode classique. La méthode utilisée est celle des puissances.

Un vecteur (de composantes égales à 1 au début) est multiplié n fois par la matrice. Le rapport de deux composantes successives tend vers la valeur propre cherchée. On normalise le vecteur à chaque multiplication. Le vecteur tend vers le vecteur propre.

Il est prévu d'augmenter la rapidité du calcul en utilisant la méthode polynomiale (TCHEBITCHEFF).

A N N E X E I I

SOUS PROGRAMME OMBRE

par F. PENET et J.C. SPINELLI

I - INTRODUCTION

Ce sous-programme FONCTION OMBRE (N_1 , N_2 , N_3) est destiné à une utilisation conjointe avec un programme principal (SEC043) traitant les interactions neutroniques entre récipients de formes géométriques simples (sphères, cylindres, parallélépipèdes rectangles), dont les axes sont parallèles aux arêtes d'un même triède trirectangle ; son but est d'analyser les effets d'écrans.

Plus précisément, étant données trois formes géométriques 1, 2 et 3 appelées par le programme principal, le sous-programme détermine si le corps n°2 forme écran total entre les corps 1 et 3; de plus, si le corps n°2 est un parallélépipède, le sous-programme détermine si ce corps forme écran partiel entre les deux autres.

Trois sorties sont donc prévues :

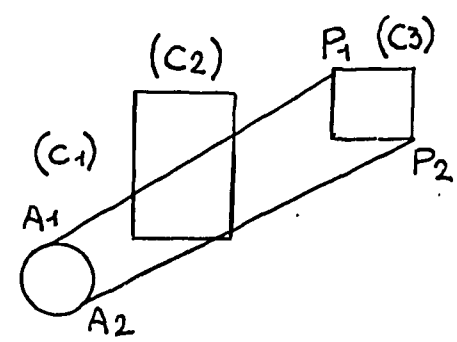
- ombre totale (OMBRE = 1)
- ombre partielle (OMBRE = -1)
- ombre nulle (OMBRE = 0)

Pour conclure à une ombre totale, le sous-programme détermine une *condition suffisante*, ce qui va dans le sens de la sécurité. Par contre, les résultats concernant les ombres partielles ne s'appuient que sur des *conditions nécessaires;* ils ne seront utilisables dans la suite que par un test de réunion, un ensemble de parallélépipèdes pouvant former une ombre totale entre deux récipients.

II - METHODE GENERALE DE RECHERCHE DES OMBRES

Elle consiste à chercher les ombres sur deux projections convenablement choisies.

1ère étape : Ombre sur chaque projection isolée. Test OTS

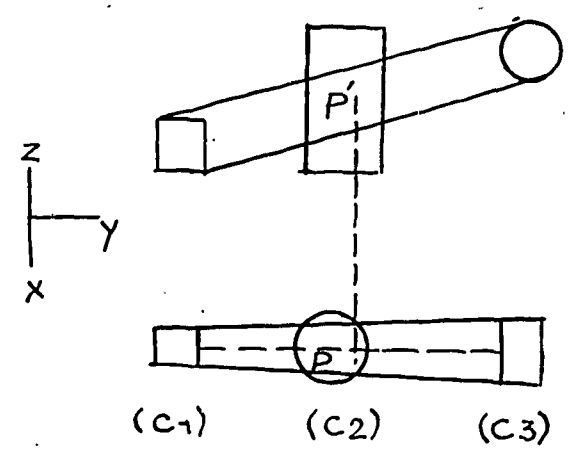


Une condition nécessaire pour l'ombre dans l'espace est qu'elle apparaisse sur chaque projection.

On cherche dans une projection l'enveloppe de tout "rayon lumineux" passant de C_1 à C_3: ce sont deux segments A_1P_1 et A_2P_2 appelés *segments de contour apparent*, qui joignent les contours apparents (CA) de C_1 et C_3.

Si chacun de ces segments possède au moins un point intérieur au CA de C_2, il apparaît une ombre totale sur cette projection : c'est le test "Ombre totale simple" (OTS).

2ème étape : Combinaison de deux projections. Test OTC



Supposons que les tests OTS soient positifs sur les deux projections XY et YZ.

Supposons de plus que C_2 n'est ni une sphère, ni un cylindre d'axe parallèle à OY.

La propriété suivante est alors évidente : la condition nécessaire et suffisante pour qu'un point soit réellement situé à l'intérieur de C est que ses projections sur XY et YZ soient à l'intérieur des CA correspondants de C_2.

Supposons alors, pour fixer les idées, que C_2 se projette sur YZ suivant un rectangle; soit un rayon lumineux *quelconque* joignant C_1 à C_3 ; en projection sur XY il possède au moins un point p à l'intérieur du CA de C_2 ; en projection sur YZ, ce point va se rappeler en p' à l'intérieur des segments de CA; *si ces segments de CA coupent le CA de C_2 suivant les côtés perpendiculaires à la coordonnée Y*, on sera sûr d'autre part que p' sera à l'intérieur du CA de C_2 : alors le point P dans l'espace est à l'intérieur de C_2 , et comme le rayon lumineux était quelconque, il y a nécessairement ombre totale entre C_1 et C_3 .

Ce test est appelé "Ombre totale complète" (OTC) dans le plan YZ, et relatif à la coordonnée Y.

En conclusion, la condition suffisante d'ombre totale est obtenue par :

1) - les tests OTS sur deux projections (Ex : XY et YZ)

2) - un test OTC sur l'une des deux projections, et relatif à la coordonnée commune à ces deux projections (Y).

III - APPLICATION PRATIQUE DE LA METHODE GENERALE

III.1 - Hypothèses de validité :

La possibilité d'effectuer les tests cités précédemment repose sur les hypothèses suivantes :

1) - Test OTS

Les CA de C_1 , C_2 , C_3 doivent être extérieurs les uns aux autres dans chacune des deux projections considérées. (*Exception* : Si le test OTS est évident d'après les dispositions relatives des trois corps, cette hypothèse n'est pas nécessaire. Voir plus loin paragraphe IV.1.7.d).

2) - Test OTC

Le CA de C_2 dans la projection considérée ne doit pas être un cercle.

3) - Réunion des tests OTS et *OTC*

C_2 ne doit être :

- ni une sphère (ce qui découle d'ailleurs de l'hypothèse précédente);
- ni un cylindre d'axe parallèle à la coordonnée commune des deux projections considérées.

III.2 - Déroulement pratique des tests :

Afin de vérifier ces différentes hypothèses, le sous-programme cherchera

donc les deux projections optima (si elles existent), et éventuellement remplacera l'écran C_2 par un écran pessimiste C'_2, qui sera toujours un parallélépipède inscrit dans C_2.

Dans la recherche du test OTS, différents cas peuvent se présenter :

1) - *Le CA de C_2 ne coupe aucun des "segments de CA"*

- Si C_2 est extérieur, l'ombre est nécessairement nulle et le sous-programme conclut immédiatement ;

- si C_2 est intérieur, l'ombre ne peut être que partielle ou nulle, et le test OTS est négatif.

2) - *Le CA de C_2 ne coupe qu'un des "segments de CA"*

- L'ombre ne peut être que partielle ou nulle et le test OTS est négatif.

3) - *Le CA de C_2 coupe les deux "segments de CA"*

- Le test OTS est positif.

Si les deux projections donnent lieu à un test OTS positif, le sous-programme recherche un test OTC. Dans le cas contraire, il conclut à une ombre partielle ou nulle (suivant la nature de l'écran : cf paragraphe I).

IV - ORGANIGRAMME

L'organigramme complet et détaillé, ainsi que les schémas explicatifs sont donnés à la suite de ce rapport.

Le sous-programme FONCTION OMBRE comporte une séquence principale d'instructions, et quelques séquences secondaires, jouant en quelque sorte le rôle de sous-programmes vis-à-vis de la séquence principale.

IV.1 - Séquence principale :

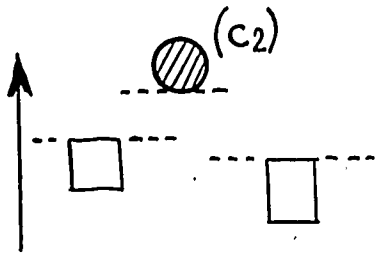
IV.1.1 – Définitions :

C'est la traduction en variables à double indice (corps et coordonnée) des données géométriques transmises du programme principal par l'instruction COMMUN. Seuls les numéros des corps à envisager sont transmis par les arguments de la FONCTION, l'écran se présentant obligatoirement en deuxième position.

IV.1.2 – Calcul des formes des CA :

Une autre variable à double indice est calculée, donnant la forme sur une projection d'un corps donné, et valant 0 pour un cercle et 1 pour un rectangle.

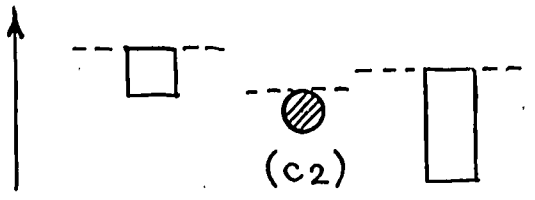
IV.1.3 – Tests rapides d'ombre nulle :



Sur chaque coordonnée (assimilée pour les facilités du langage à la verticale), on effectue le test suivant :

C_2 est-il tout entier au-dessus (ou en-dessous) du point le plus haut (ou le plus bas) des corps C_1 et C_3 ? Si oui, on conclut immédiatement à une ombre nulle.*

IV.1.4 – Tests rapides d'ombre partielle :



De même, sur chaque coordonnée, on effectue le test suivant:

L'extrémité supérieure (ou inférieure) de C_2 est-elle inférieure (ou supérieure) aux deux extrémités supérieures (ou inférieures) des corps C_1 et C_3 ? Si oui, on conclut immédiatement à une ombre "partielle". *

IV.1.5 – 1er test rapide d'ombre totale ("centres alignés) :

Si les centres des trois corps sont alignés, la comparaison de leurs dimensions et de leurs formes respectives permet de conclure rapidement à une ombre totale éventuelle.

Le déroulement de ce test est indiqué en annexe.

IV.1.6a – 2ème test rapide d'ombre totale :

Si dans une projection, les CA de C_1 et C_3 sont tous deux contenus dans le CA de C_2, on peut conclure immédiatement à une ombre totale (sous réserve bien entendu que C_1 et C_3 soient de part et d'autre de C_2).

IV.1.6b – Transformation des écrans sphériques et cylindriques :

Sphère :

A cet endroit du programme, un écran sphérique est remplacé par son cube inscrit et la séquence reprend en IV.1.3.

Cylindre :

Si, dans le plan de section droite de l'écran, les CA de C_1 et C_3 sont entièrement extérieurs à celui de C_2, l'écran est conservé et la séquence poursuit normalement ; dans les autres cas, C_2 est remplacé par son parallélépipède de base carrée inscrit et la séquence reprend en IV.1.3.

* Par la suite, ceci signifiera toujours une conclusion à une ombre partielle, si l'écran est un parallèlépipède, ou à une ombre nulle, dans les autres cas.

IV.1.7 – Recherche des projections optima d'étude :

On commence le travail dans une projection, par exemple XY.

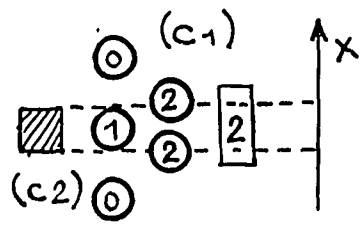
Il s'agit d'étudier les positions relatives des CA de C_1 et C_3 par rapport à celui de C_2 (assimilé dans le cas du cercle, au carré circonscrit).

IV.1.7a – Place de C_1 :

Sur la coordonnée X, par exemple (assimilée comme ci-dessus à la verticale), trois cas sont distingués pour C_1 :

Cas 0 :

L'extrémité supérieure (*ou* inférieure) de C_1 est inférieure (*ou* supérieure) à l'extrémité inférieure (*ou* supérieure) de C_2.



Cas 1 :

L'extrémité supérieure (*et* inférieure) de C_1 est inférieure (*et* supérieure) à l'extrémité supérieure (*et* inférieure) de C_2.

Cas 2 : autres cas.

Après le même travail en Y, on combine les deux résultats de la manière suivante :

Y \ X	0	1	2
0	1	2	3
1	4	5	6
2	7	8	9

Un chiffre de 1 à 9 représente ainsi, pour C_1, la catégorie de position qu'il occupe par rapport à C_2.

IV.1.7b – Place de C_3 :

On attribue de même un chiffre de 1 à 9 pour C_3.

IV.1.7c – Combinaison des résultats :

On ramène les différentes combinaisons des positions de C_1 et C_3 à sept types de traitement différents numérotés cette fois de 0 à 6, par le tableau symétrique suivant :

C_3 \ C_1	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	5	4	4	3	6	6	3	6	6
2	4	1	4	6	1	6	6	1	6
3	4	4	4	6	6	6	6	6	6
4	3	6	6	2	6	2	3	6	6
5	6	1	6	6	0	2	6	1	6
6	6	6	6	2	2	2	6	6	6
7	3	6	6	3	6	6	3	6	6
8	6	1	6	6	1	6	6	1	6
9	6	6	6	6	6	6	6	6	6

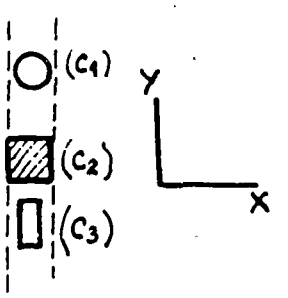
IV.1.7d – Etude des différents cas du tableau 9×9 :

Cas 0 :

Ce cas, en principe, a été éliminé en IV.1.6a. Toutefois, il peut subsister dans le cas de l'écran cylindrique se projetant suivant un cercle. La séquence renvoie alors à IV.1.6b pour transformation en parallélépipède et retour en IV.1.5.

Cas 1 :

Les tests OTS et OTC relatifs à Y sont évidents sur la projection XY. Si on peut obtenir un test OTS sur le plan YZ, on pourra conclure à l'ombre totale.



Exceptions :

- Si C_1 et C_3 se coupent sur la projection YZ, le test OTS est impossible et on conclut : ombre nulle.
- Si C_2 se projette suivant un cercle sur le plan XY, il faudra, de plus, un test OTC en YZ.

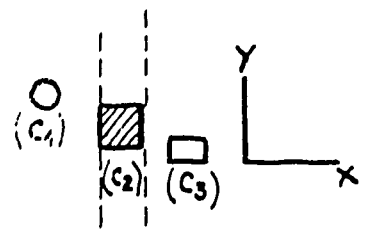
Cas 2 :

Tout à fait analogue au cas précédent en permutant X et Y.

Cas 3 :

Les deux plans d'étude optima sont XY et ZX.

Le test OTC pourra être cherché dans l'un ou l'autre des deux plans.



Exceptions. Ecran cylindrique :

- Si sa base est dans XY, OTC sera cherché dans XZ et vice-versa.
- Si sa base est dans YZ, il faudra le transformer en parallélépipède : la séquence renvoie à IV.1.6b.

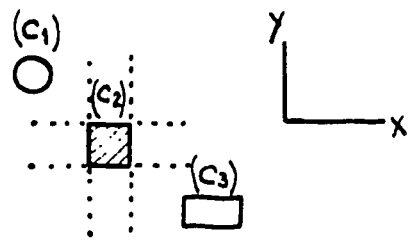
Cas 4 :

Tout à fait analogue au cas précédent en permutant X et Y.

Cas 5 :

Il est difficile de conclure sur les plans d'étude à adopter :

On reprend alors tout le travail IV.1.7 sur une autre projection.



Cas 6 :

La projection en question ne donne pas de positions particulières intéressantes : on reprend tout le travail IV.1.7 sur une autre projection.

IV.1.8 – Conclusion de la séquence principale :

- Les cas 0 à 4 du tableau 9 × 9 aboutissent nécessairement à une conclusion sans qu'il soit nécessaire de recommencer ce tableau dans une autre projection.

- Si un cas 5 est rencontré, il faudra recourir à d'autres projections : on rencontrera alors par la suite soit des cas 1 à 4, soit des cas 5 uniquement; dans cette dernière hypothèse, on combinera successivement les tests OTS et OTC de chaque couple de plans avec les restrictions indiquées au cas 3 pour l'écran cylindrique.

- Si un cas 6 est rencontré, il faudra de même recourir à d'autres projections : on rencontrera alors, soit des cas 1 à 4, soit des cas 6. Si les trois projections donnent le cas 6, alors la méthode utilisée ne peut conclure à une ombre, et le sous-programme donne ombre nulle.

IV.2 - Séquences secondaires :

IV.2.1 - Intersection de contours apparents :

Dans chaque cas : cercle-cercle, cercle-rectangle, rectangle-rectangle, la séquence détermine si :

- I est contenu dans K ($I \subset K$ LIK = 1)
- I contient K ($I \supset K$ LIK = 2)
- I et K se coupent ($I \cap K \neq \emptyset$ LIK = 3)
- I et K sont extérieurs l'un à l'autre ($I \cap K = \emptyset$ LIK = 4)

Cette séquence est appelée par IV.1.6b (cas cylindre) et IV.1.7d (cas 1 et 2).

IV.2.2 - Détermination des segments de CA :

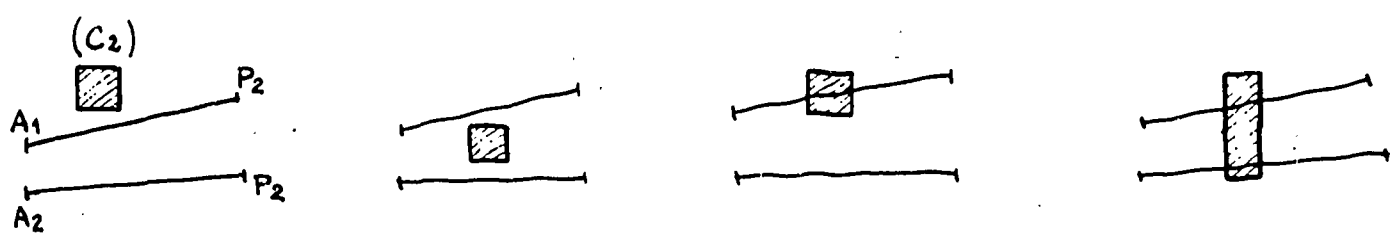
Dans les trois cas désignés ci-dessus, la séquence calcule les coordonnées des extrémités A_1, P_1, A_2, P_2 des segments de CA.

Cette séquence est appelée par toutes les recherches de test OTS.

IV.2.3 - Intersection de l'écran avec les segments de CA :

Dans les deux cas (écran se projetant suivant un cercle ou un rectangle), la séquence recherche la position relative du CA de C_2 avec les segments de CA :

- écran extérieur aux segments : ombre nulle avec conclusion immédiate;
- écran intérieur ou coupant un des segments : test OTS négatif (LV = 0);
- écran coupant les deux segments : test OTS positif (LV = 2).



Ombre nulle LV = 0 LV = 0 LV = 2

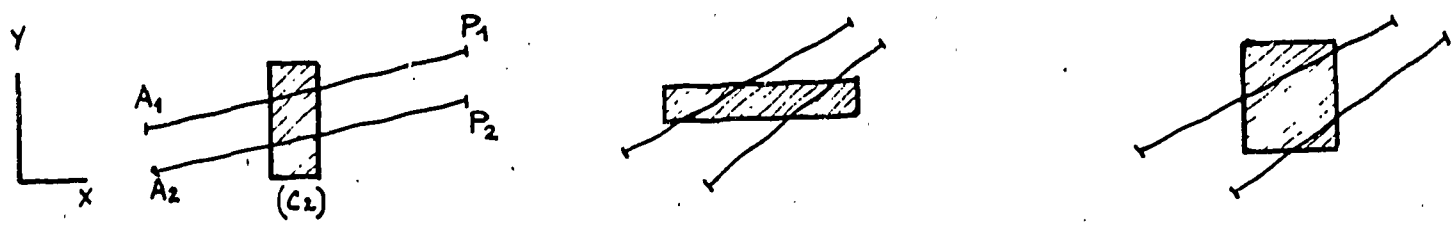
Cette séquence est appelée par la précédente.

IV.2.4 – Recherche du test OTC :

Dans le plan XY (par exemple), la séquence recherche si les segments de CA coupent C_2

- suivant les deux côtés perpendiculaires à la coordonnée X : test OTC positif pour la coordonnée X (LOTC = - 1);
- suivant les deux côtés perpendiculaires à la coordonnée Y : test OTC positif pour la coordonnée Y (LOTC = + 1).

Dans les autres cas, ainsi que si C_2 se projette suivant un cercle, le test OTC est négatif (LOTC = 0).



LOTC = - 1 LOTC = + 1 LOTC = 0

Cette séquence est appelée après la recherche du test OTS sur la même projection.

N.B. REMARQUE SUR LES ERREURS D'ARRONDI

Les erreurs d'arrondi commises dans certaines opérations arithmétiques peuvent perturber intempestivement des opérations logiques.

Supposons que dans l'instruction "SI (A-B) 1, 2, 1", A et B, variables en virgule flottante, soient le résultat d'opérations antérieures; à cause des arrondis, elles peuvent différer de leur valeur théorique à quelques "tops" binaires près ; si, de plus, leurs valeurs sont théoriquement égales, leur différence sera alors en pratique différente de zéro (à quelques tops binaires près) et le programme poursuivra à l'instruction 1 au lieu de l'instruction 2.

Afin de s'affranchir de ces difficultés, on a modifié les instructions SI du programme dans lesquelles simultanément :

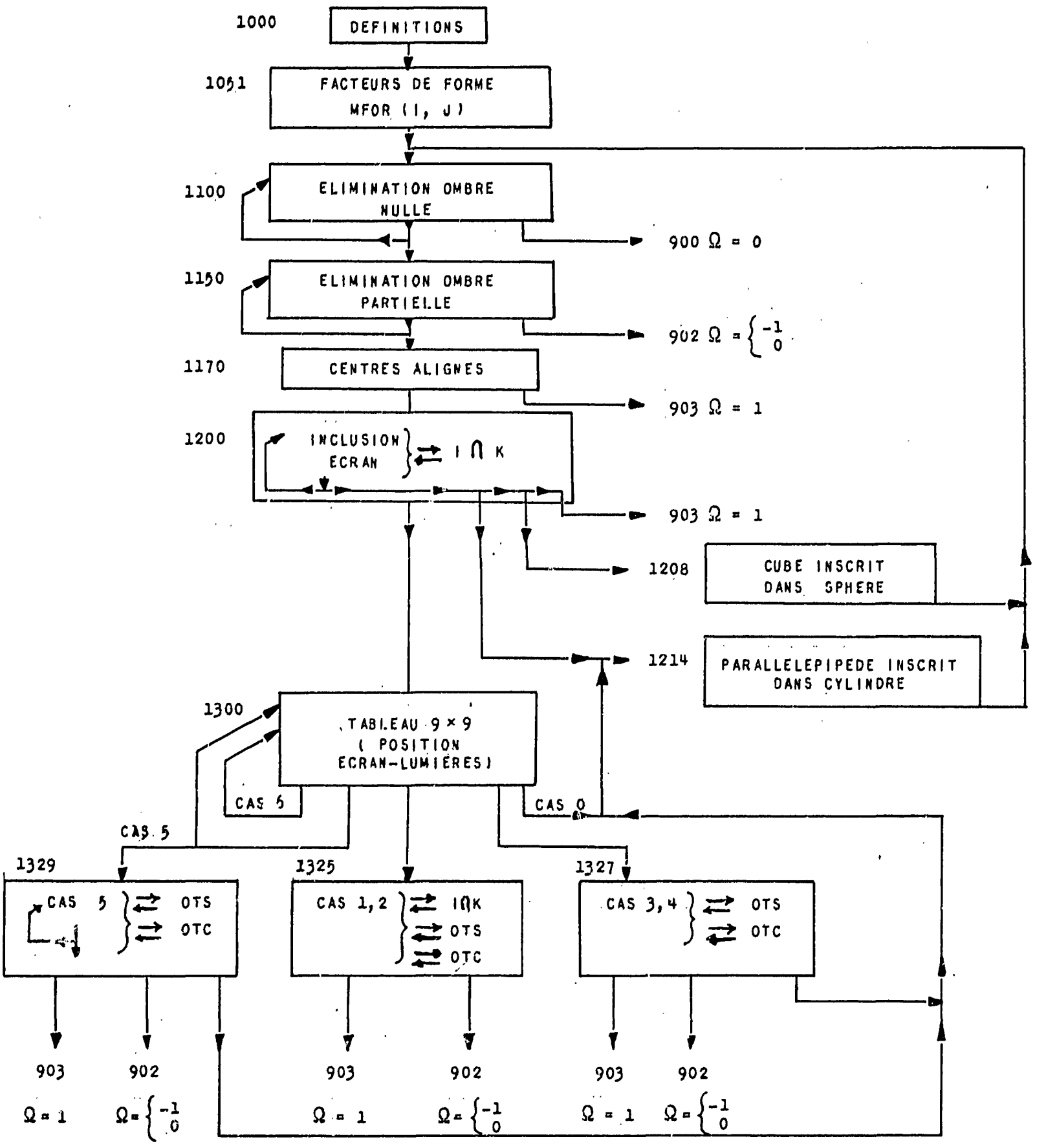
- l'erreur d'arrondi pouvait s'introduire,
- l'aiguillage de la valeur nulle n'était pas indifférent.

Cette modification revient à effectuer les tests à une précision physique donnée. Les instructions ainsi modifiées sont indiquées dans les schémas par un astérisque.

INSTRUCTION ORIGINALE	INSTRUCTI'' MODIFIEE
SI (X) 1, 1, 2	SI (X - E) 1, 1, 2
SI (X) 1, 2, 2	SI (X + E) 1, 2, 2
SI (X) 1, 2, 1	SI (ABSF (X) - E) 2, 1, 1
SI (X) 1, 2, 3	SI (ABSF (X) - E) 2, 4, 4 4 SI (X) 1, 2, 3

E est une quantité très petite, de même degré que l'expression arithmétique X, et calculée au début du programme à partir du maximum des longueurs données (coordonnées et dimensions des corps). E est désigné dans le programme par 00 si X est du 1er degré, ou 002 si X est du 2ème degré.

SCHEMA GENERAL



IΩK — 1250
OTS — 1600
OTC — 3100

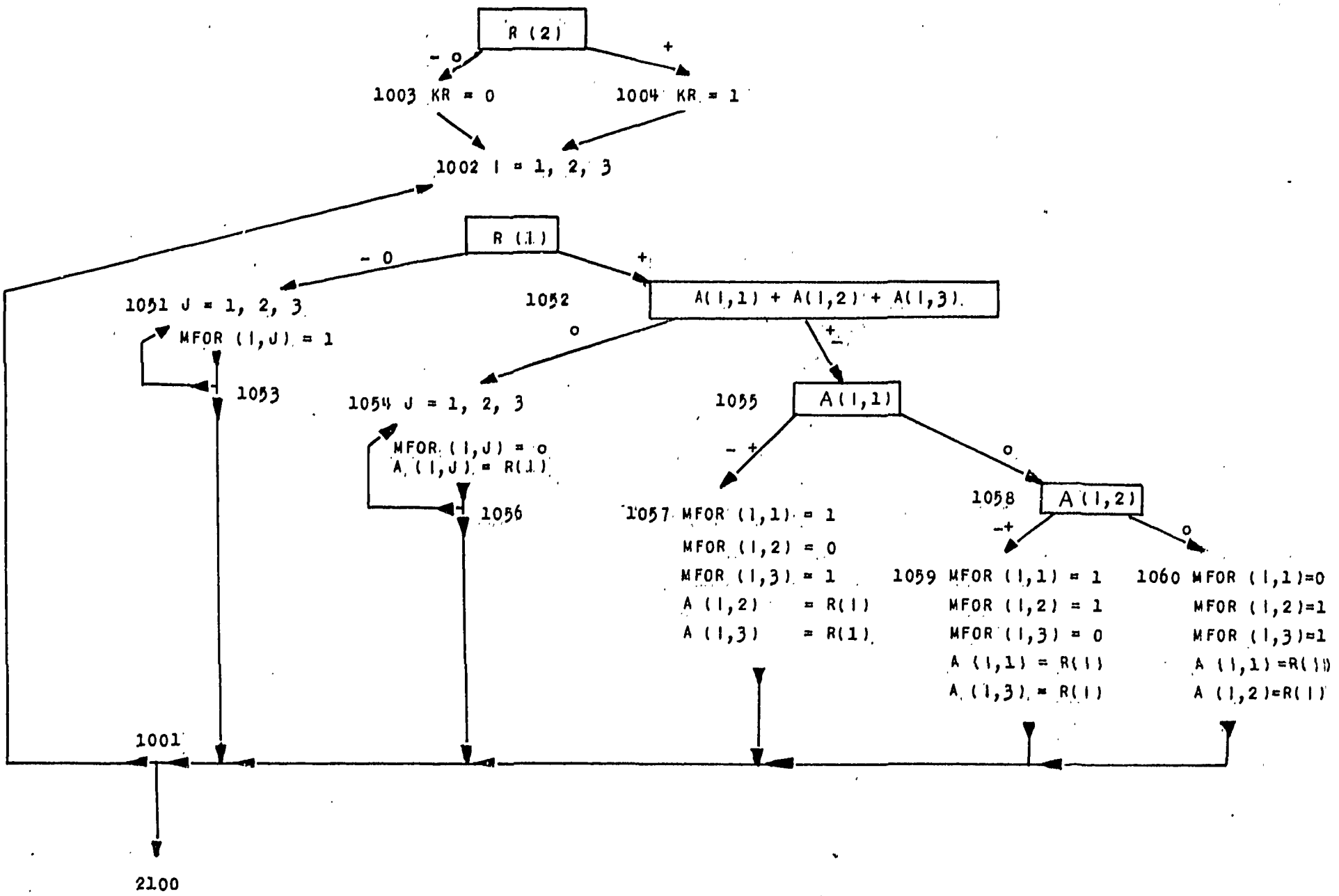
DEFINITIONS

```
DIMENSION      V(20), XP(500), YP(500), ZP(500), AP(500), BP(500), CP(500), RP(500),
               X(3,3), A(3,3), R(3), MFOR(3,3), M(3,3), MOTC(3).

COMMUN         V, XP, YP, ZP, AP, BP, CP, RP

1000     X(1,1)  =  XP(N1)
         X(1,2)  =  YP(N1)
         X(1,3)  =  ZP(N1)
         A(1,1)  =  AP(N1)
         A(1,2)  =  BP(N1)
         A(1,3)  =  CP(N1)
         R(1)    =  RP(N1)

         X(2,1)  =  XP(N2)
         X(2,2)  =  YP(N2)
         X(2,3)  =  ZP(N2)
         A(2,1)  =  AP(N2)
         A(2,2)  =  BP(N2)
         A(2,3)  =  CP(N2)
         R(2)    =  RP(N2)

         X(3,1)  =  XP(N3)
         X(3,2)  =  YP(N3)
         X(3,3)  =  ZP(N3)
         A(3,1)  =  AP(N3)
         A(3,2)  =  BP(N3)
         A(3,3)  =  CP(N3)
         R(3)    =  RP(N3)
```

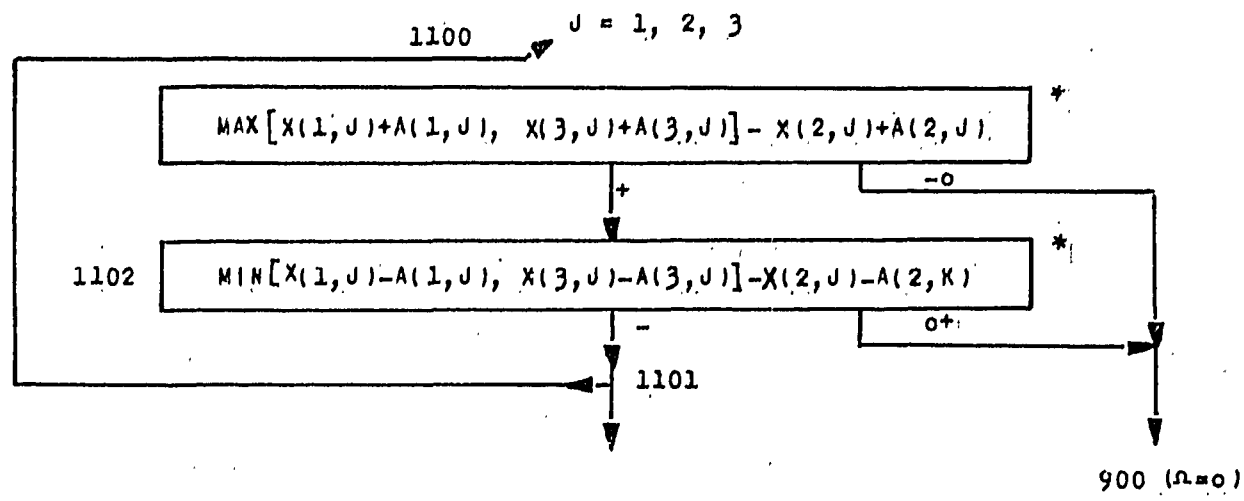
$$00 = \left\{ \begin{array}{l} \max\,[\ X(1,1)\ ,\ X(1,2)\ ,\ X(1,3)\ ,\ X(3,1)\ ,\ X(3,2)\ ,\ X(3,3)\ ] \\ +\max\,[A(1,1),\ A(1,2),\ A(1,3),\ A(2,1),\ A(2,2),\ A(2,3),\ A(3,1),\ A(3,2),\ A(3,3)] \end{array} \right\} 10^{-6}$$

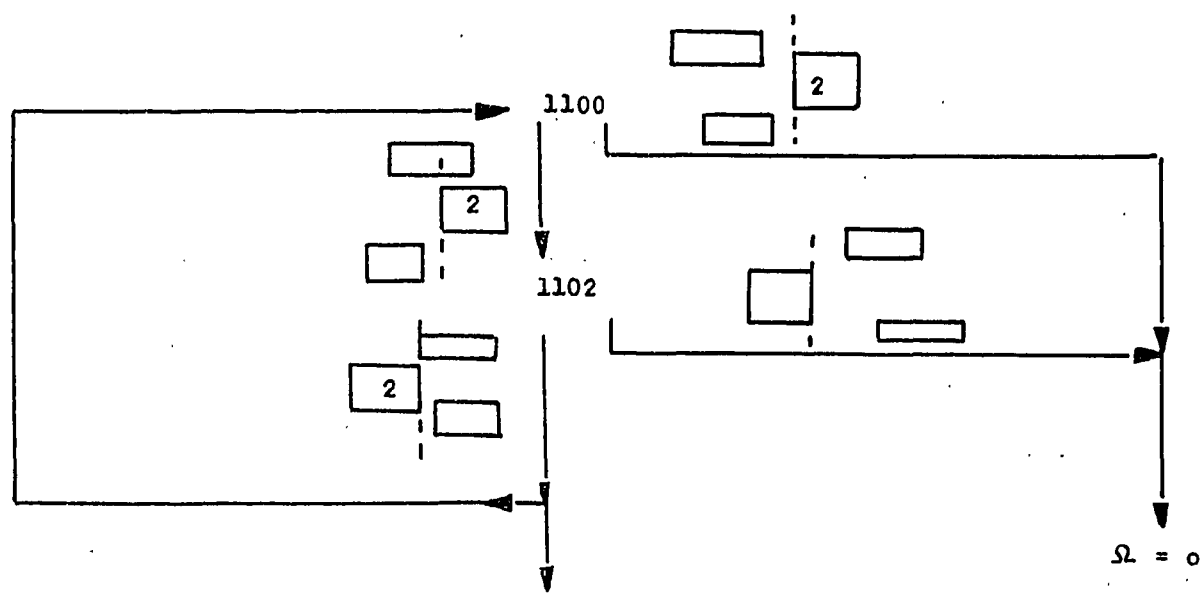
$$002 = 00^{2}.10^{-6}$$

FACTEURS DE FORME



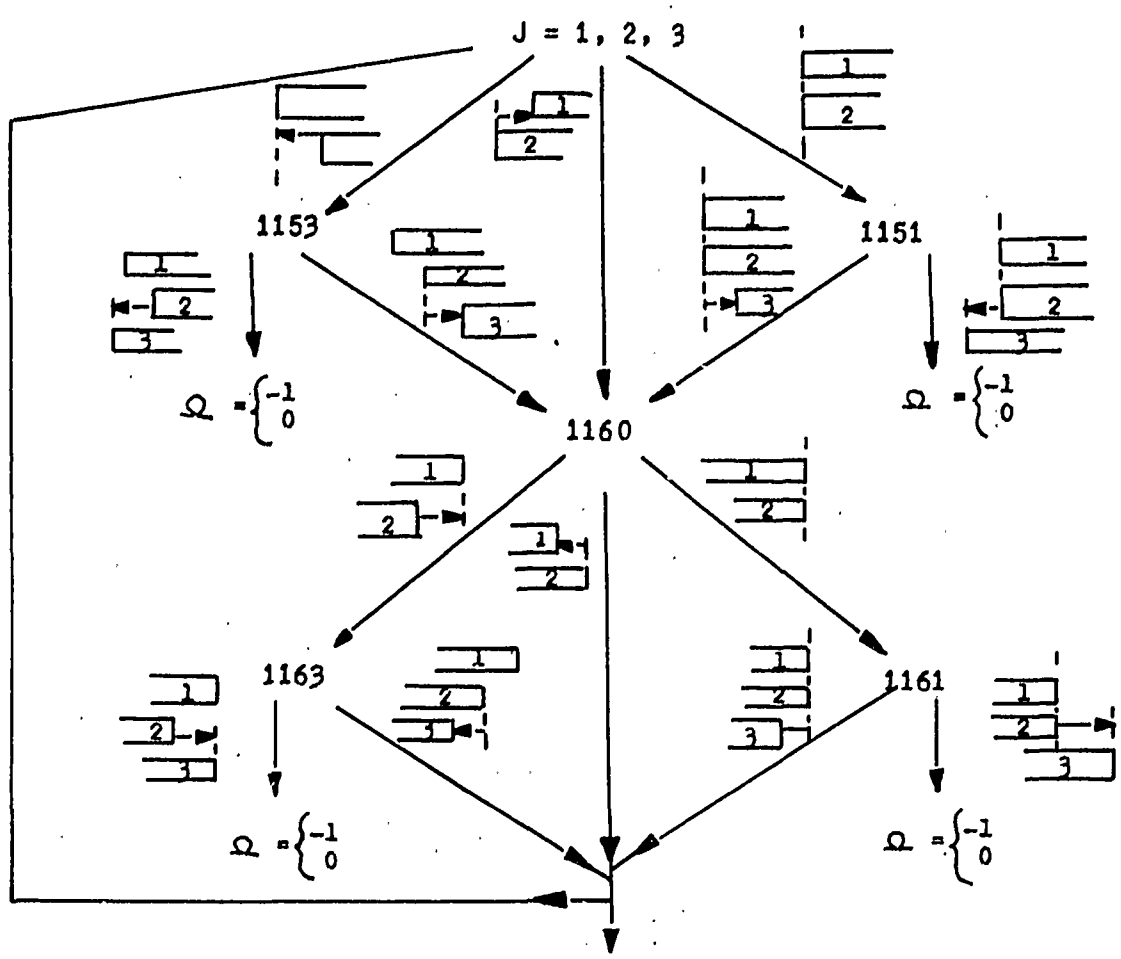
ELIMINATION OMBRE NULLE



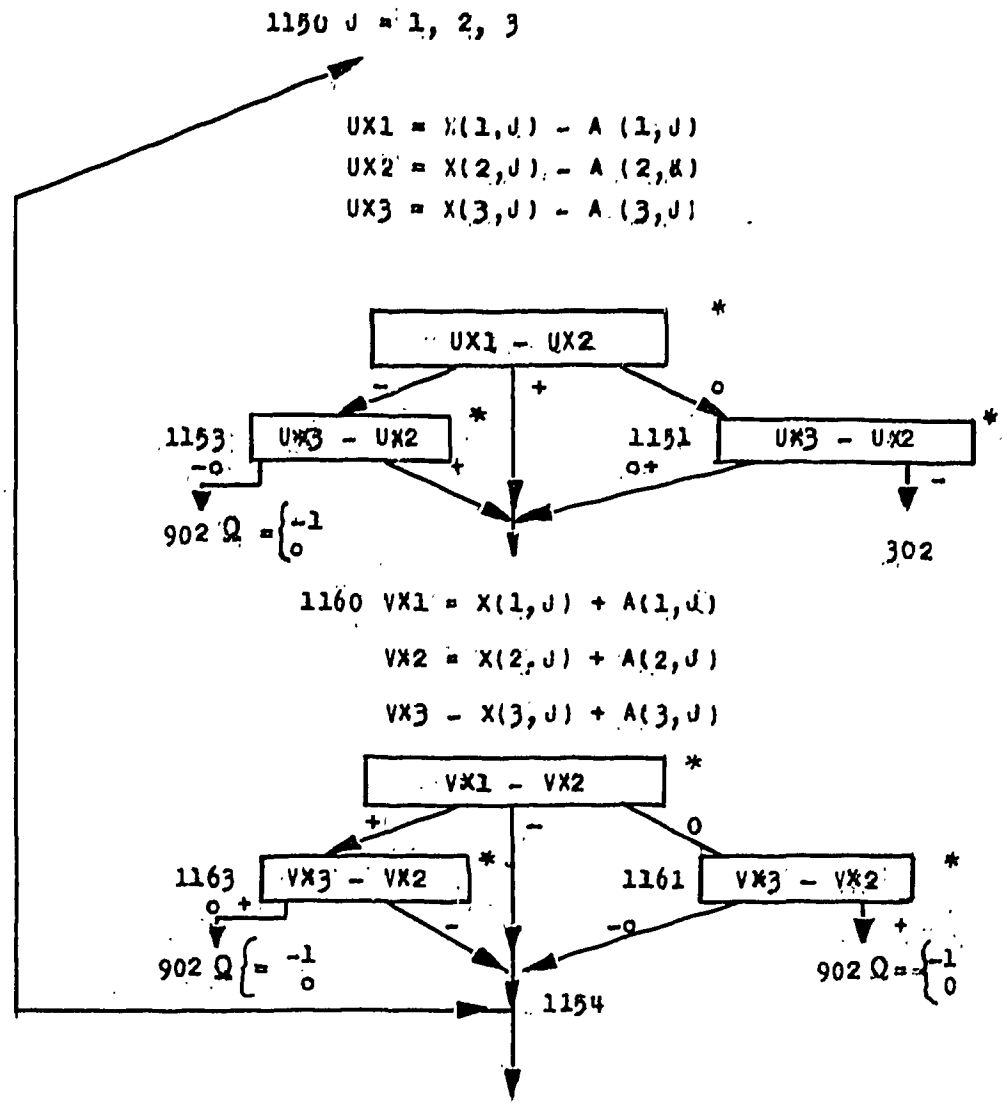


ELIMINATION OMBRE

PARTIELLE



ELIMINATION OMBRE PARTIELLE



CENTRES ALIGNES

Solution géométrique

O_1 , O_2 , O_3 centres des solides : $\overrightarrow{O_2 O_1} \wedge \overrightarrow{O_2 O_3} = 0$

1°) ECRAN PARALLELEPIPEDIQUE :

Si sur chacun des axes de coordonnée, la dimension de l'écran est supérieure à celles des lumières, on sort ombre totale.

2°) ECRAN SPHERIQUE :

a) les deux lumières sont sphériques :

le rayon de l'écran est supérieur aux rayons des lumières : ombre totale.

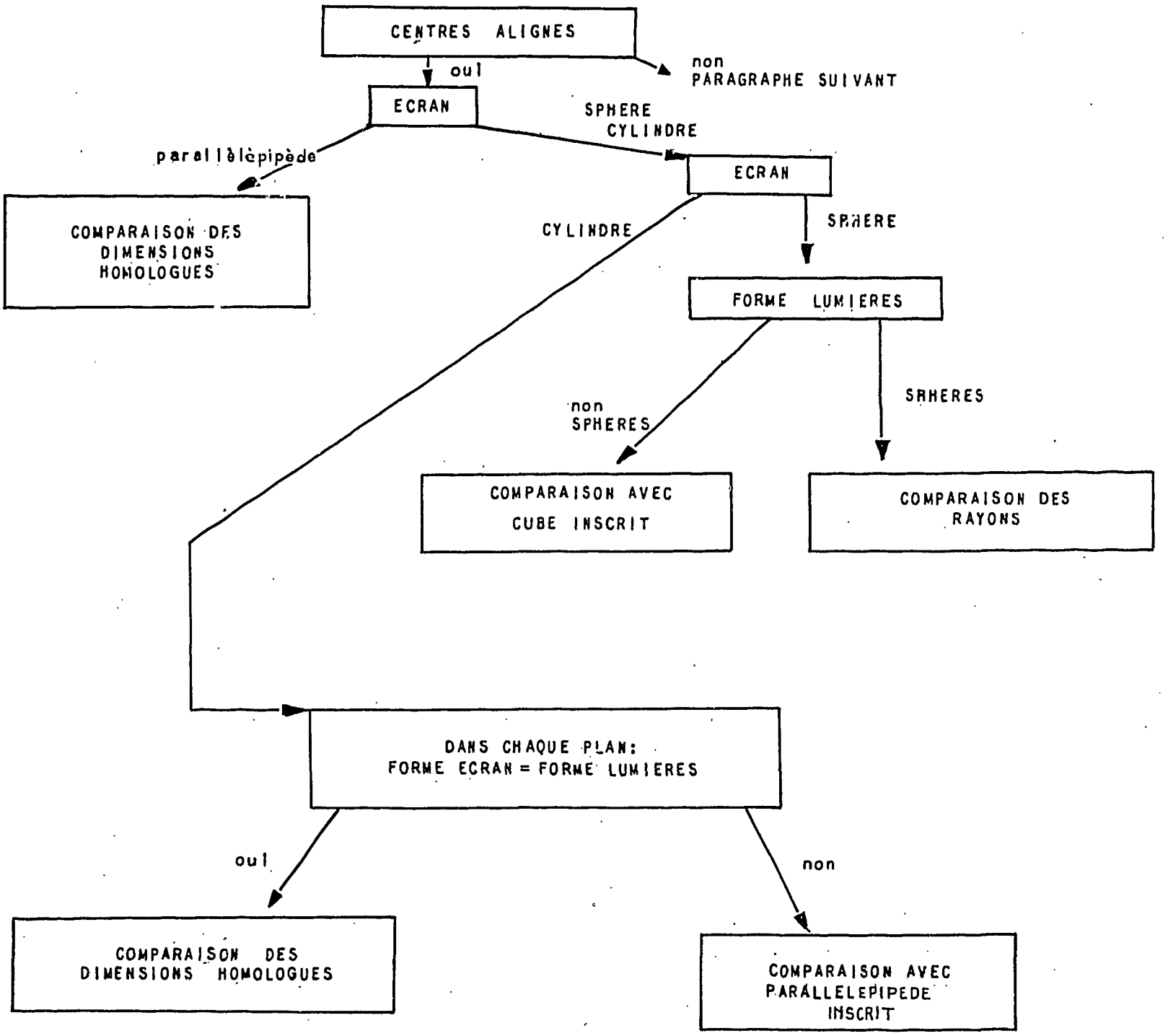
b) On remplace l'écran par le cube inscrit et on traite comme 1°).

3°) ECRAN CYLINDRIQUE :

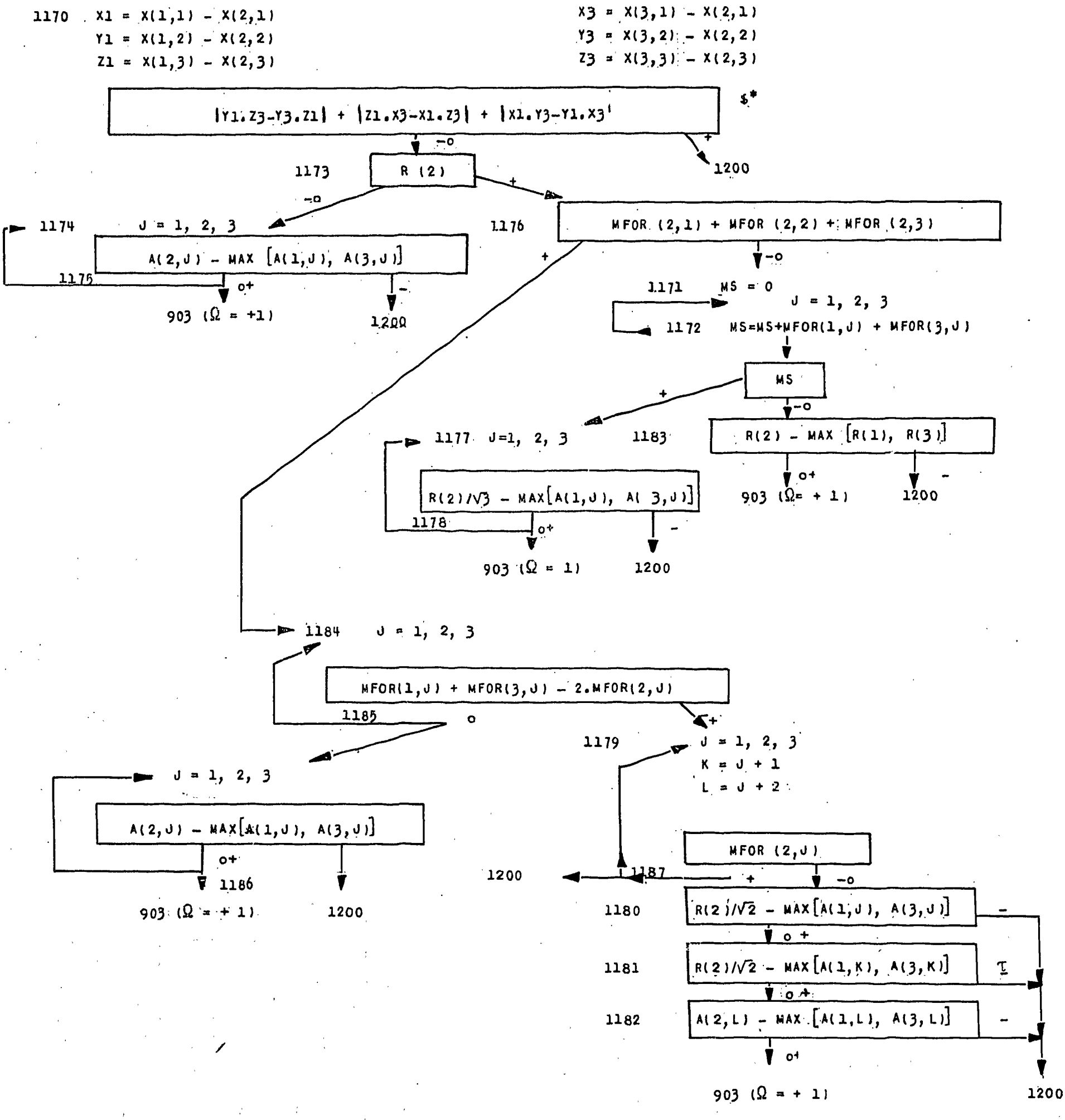
a) les lumières sont des cylindres d'axe parallèle à l'axe de l'écran : sur chaque coordonnée la dimension de l'écran est supérieure à celles des lumières : ombre totale.

b) On remplace le cylindre Ecran par le parallélèpipède inscrit et on traite comme 1°).

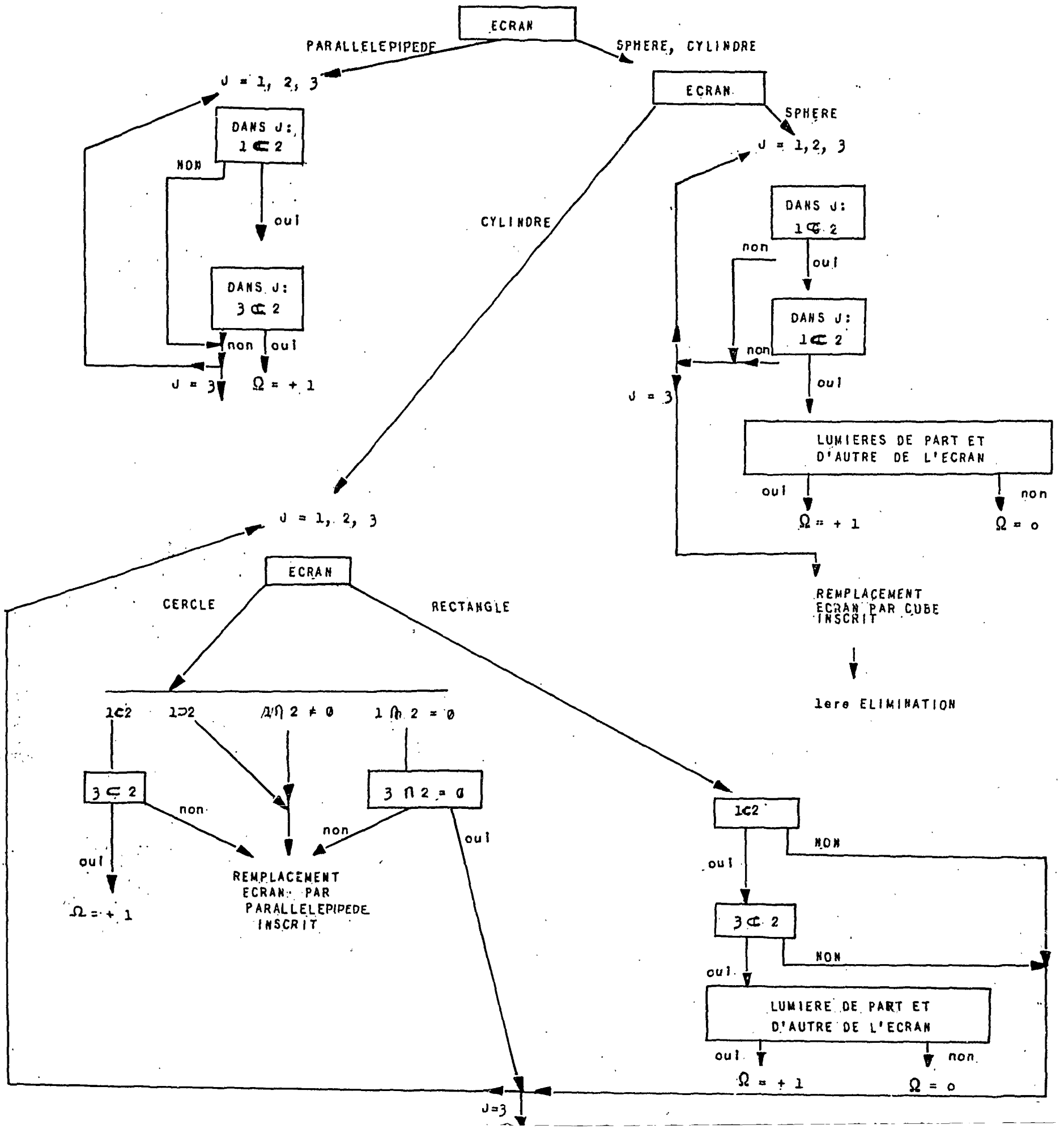
N.B. - Par supérieur il faut entendre supérieur ou égal


CENTRES ALIGNES
oui
non
PARAGRAPHE SUIVANT
ECRAN
SPHERE
CYLINDRE
parallèlèpipède
ECRAN
COMPARAISON DES DIMENSIONS HOMOLOGUES
CYLINDRE
SPHERE
FORME LUMIERES
non SPHERES
SPHERES
COMPARAISON AVEC CUBE INSCRIT
COMPARAISON DES RAYONS
DANS CHAQUE PLAN:
FORME ECRAN = FORME LUMIERES
oui
non
COMPARAISON DES DIMENSIONS HOMOLOGUES
COMPARAISON AVEC PARALLELEPIPEDE INSCRIT

CENTRES ALIGNES



INCLUSION DANS L'ECRAN



INCLUSION DANS L'ECRAN

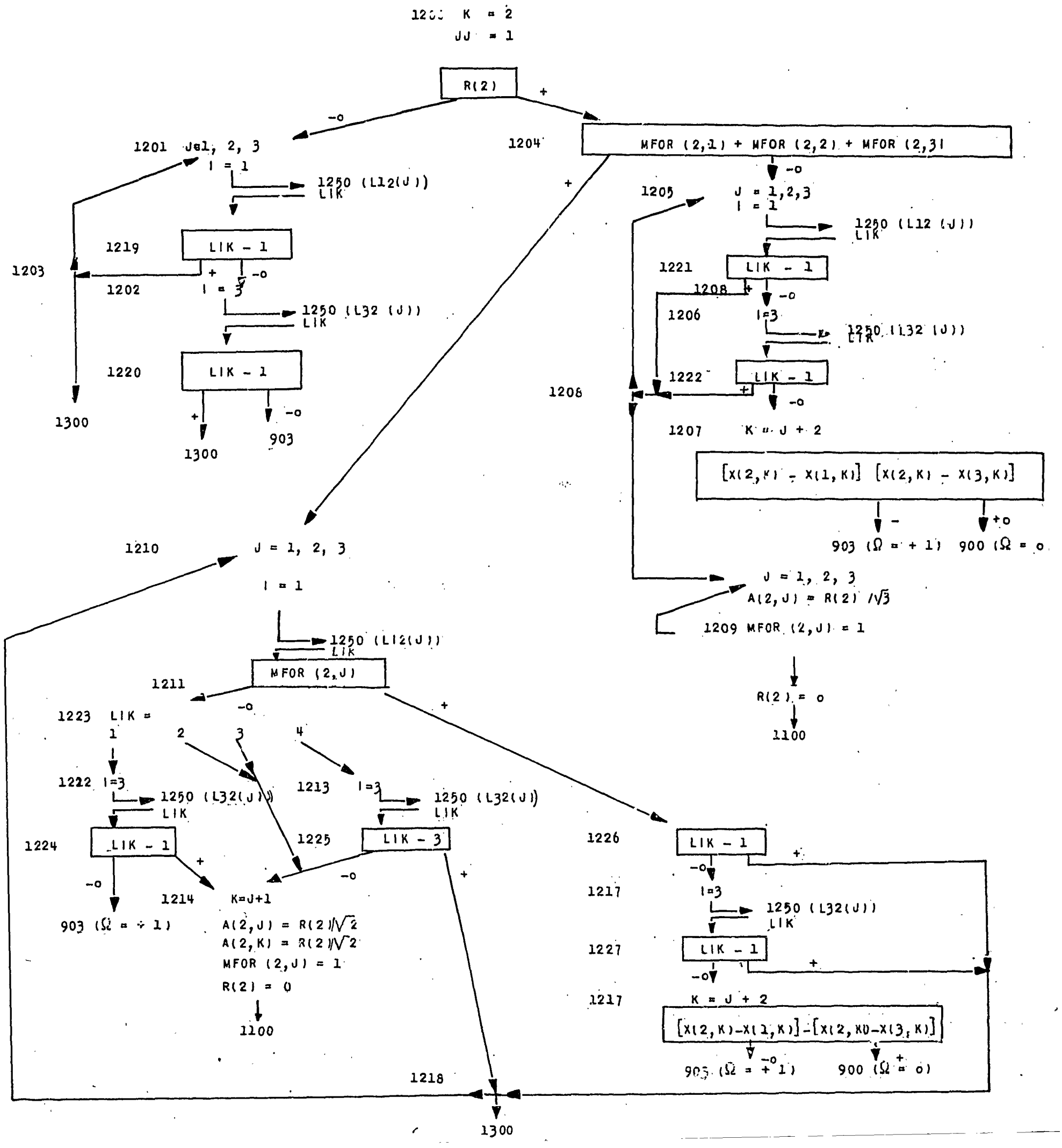
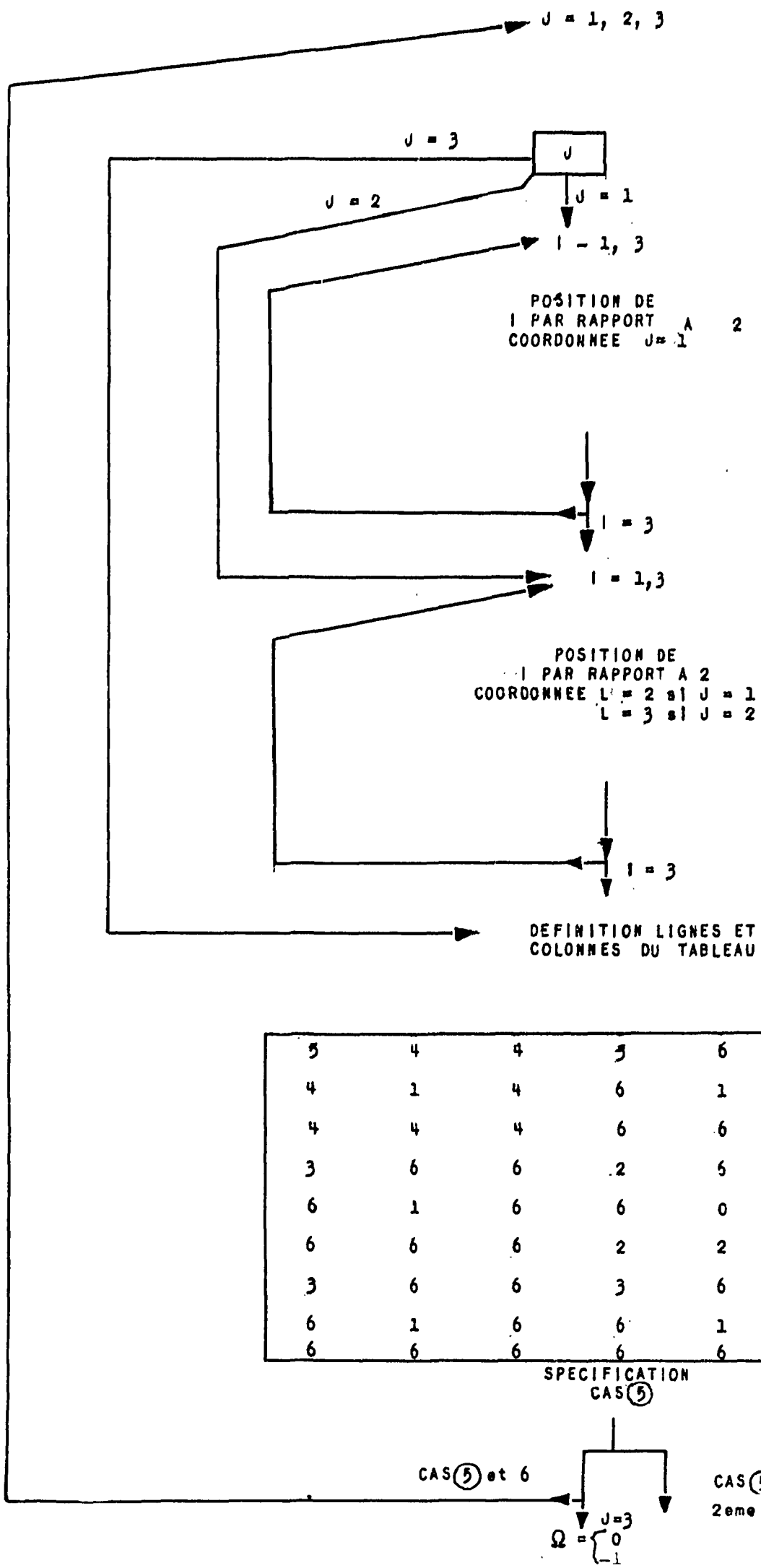
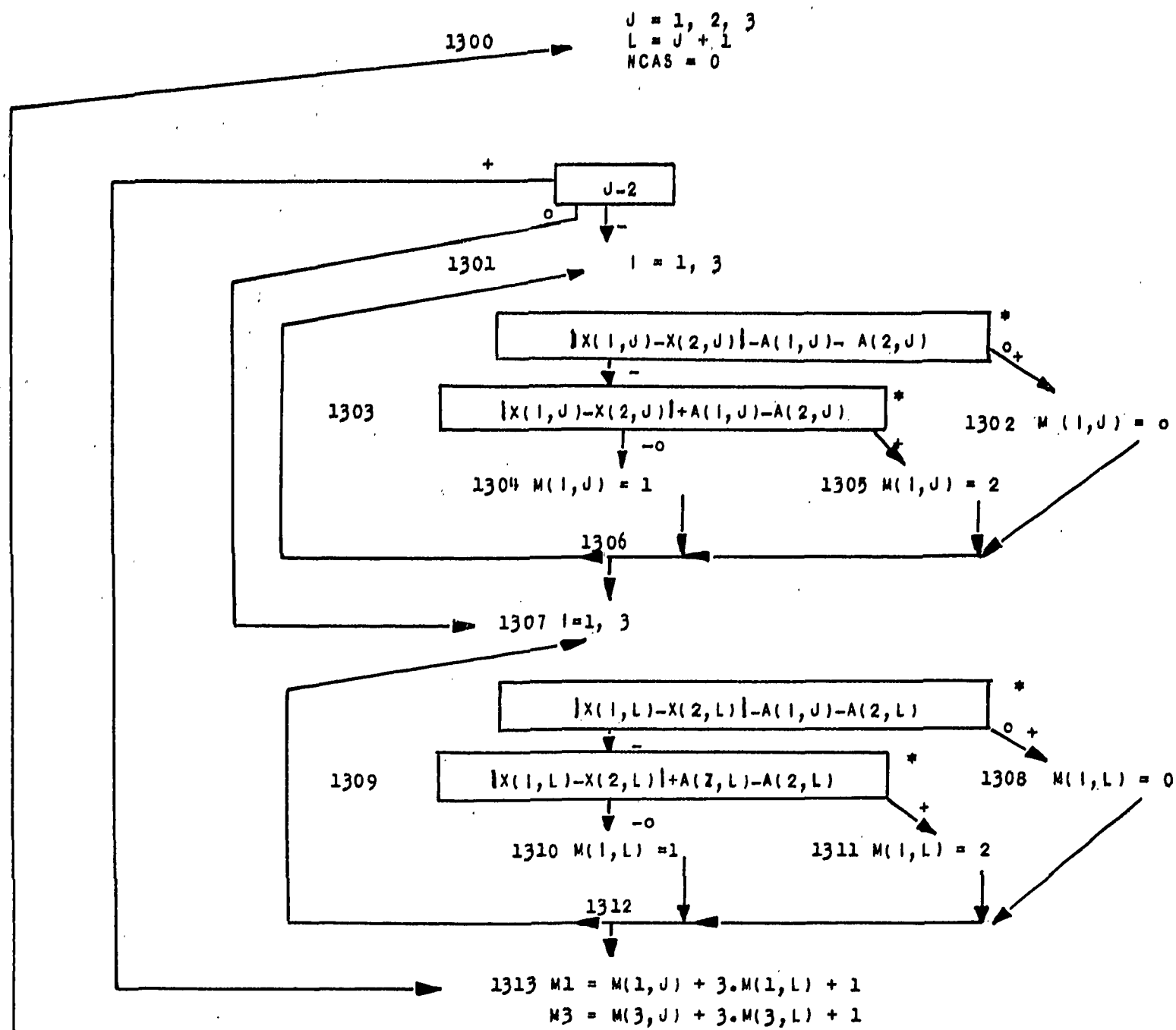


TABLEAU 9x9

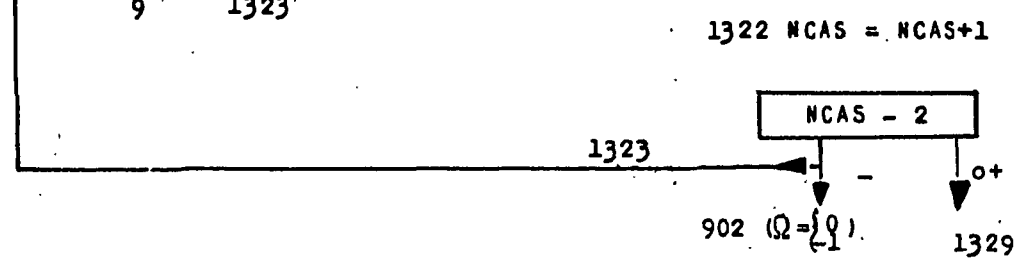


5	4	4	5	6	6	3	6	6
4	1	4	6	1	6	6	1	6
4	4	4	6	6	6	6	6	6
3	6	6	2	6	2	3	6	6
6	1	6	6	0	2	6	1	6
6	6	6	2	2	2	6	6	6
3	6	6	3	6	6	3	6	6
6	1	6	6	1	6	6	1	6
6	6	6	6	6	6	6	6	6

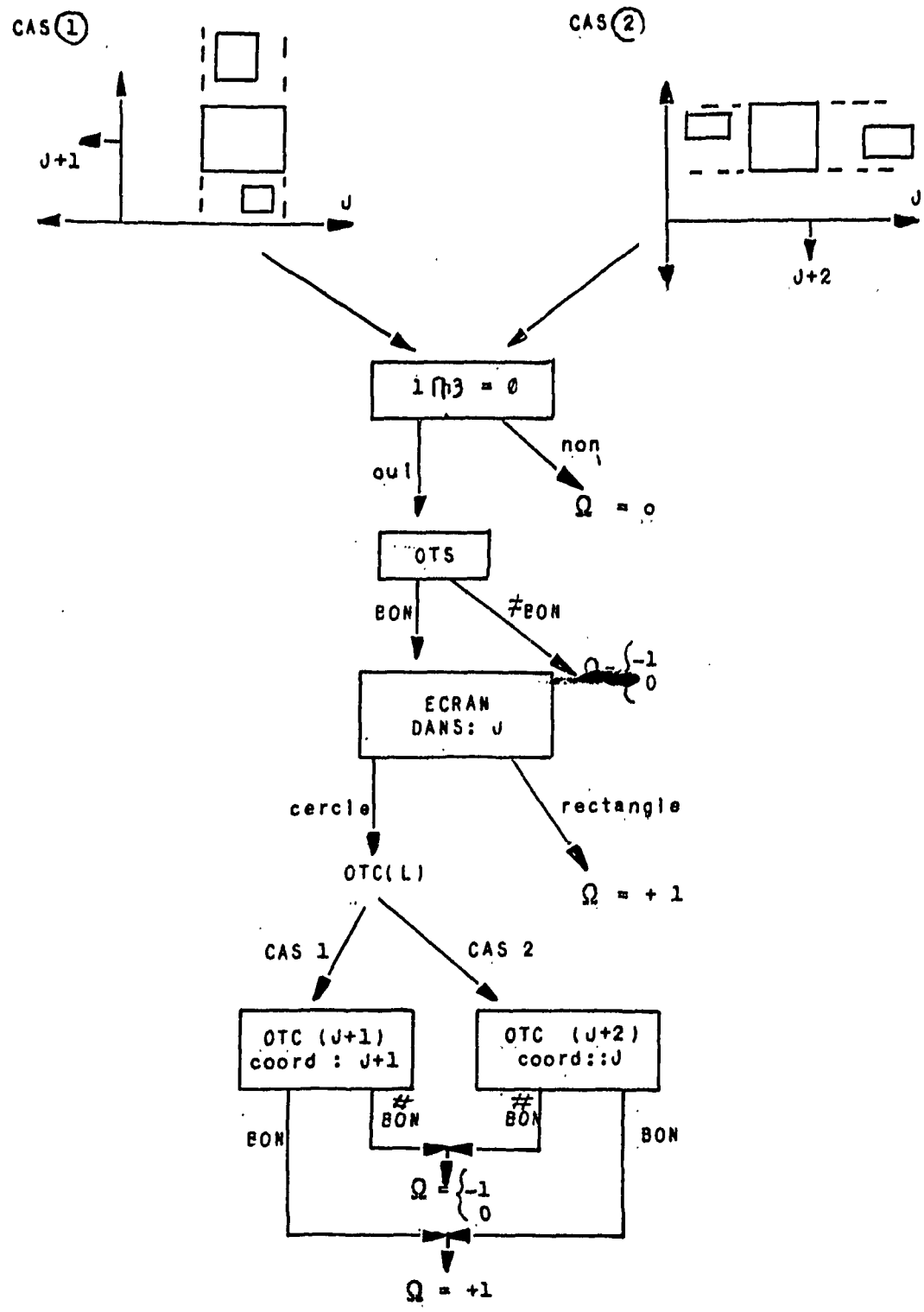
TABLEAU 9×9



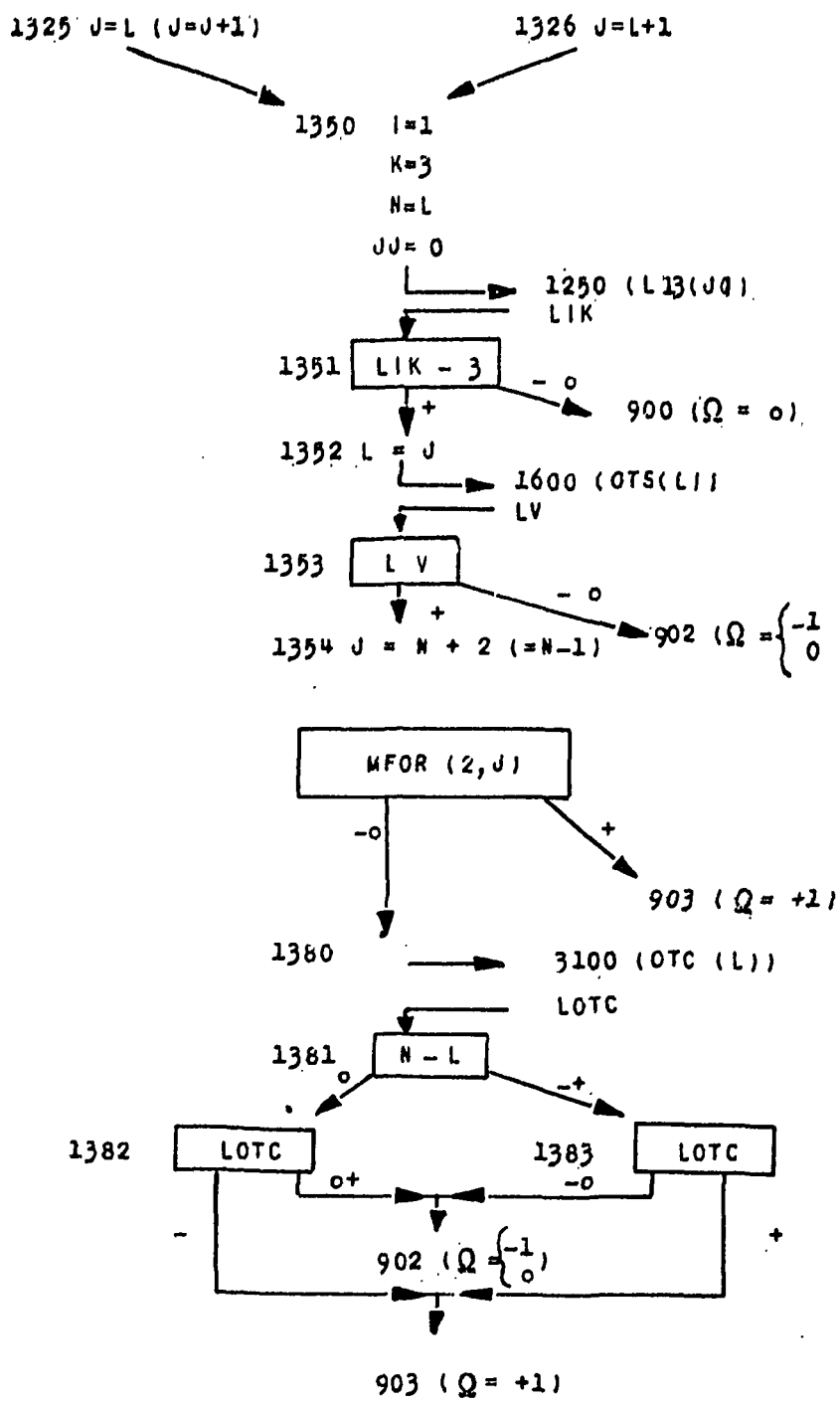
N1= \ N3=		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1314	1322	1328	1328	1327	1323	1323	1327	1323	1323
2	1315	1328	1325	1328	1323	1325	1323	1323	1325	1323
3	1316	1328	1328	1328	1323	1323	1323	1323	1323	1325
4	1317	1327	1323	1323	1326	1323	1326	1227	1323	1323
5	1318	1323	1325	1323	1323	1214	1326	1323	1325	1323
6	1319	1323	1323	1323	1326	1326	1326	1323	1323	1323
7	1320	1327	1323	1323	1327	1323	1323	1327	1323	1323
8	1321	1323	1325	1323	1323	1325	1323	1323	1325	1323
9	1323									



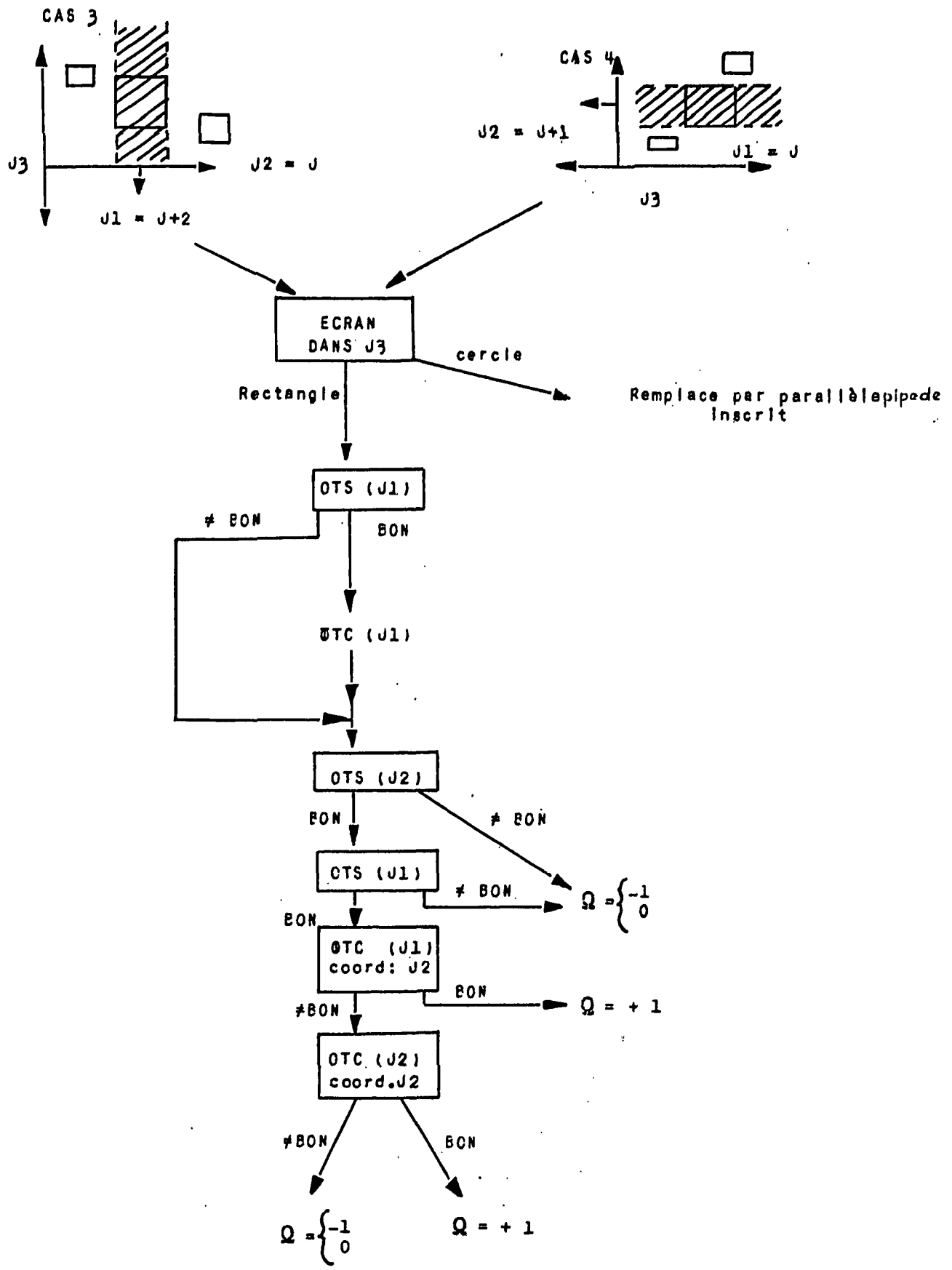
ETUDE DES DIFFERENTS CAS
DU TABLEAU 9x9



ETUDE DES DIFFERENTS CAS DU TABLEAU 9×9

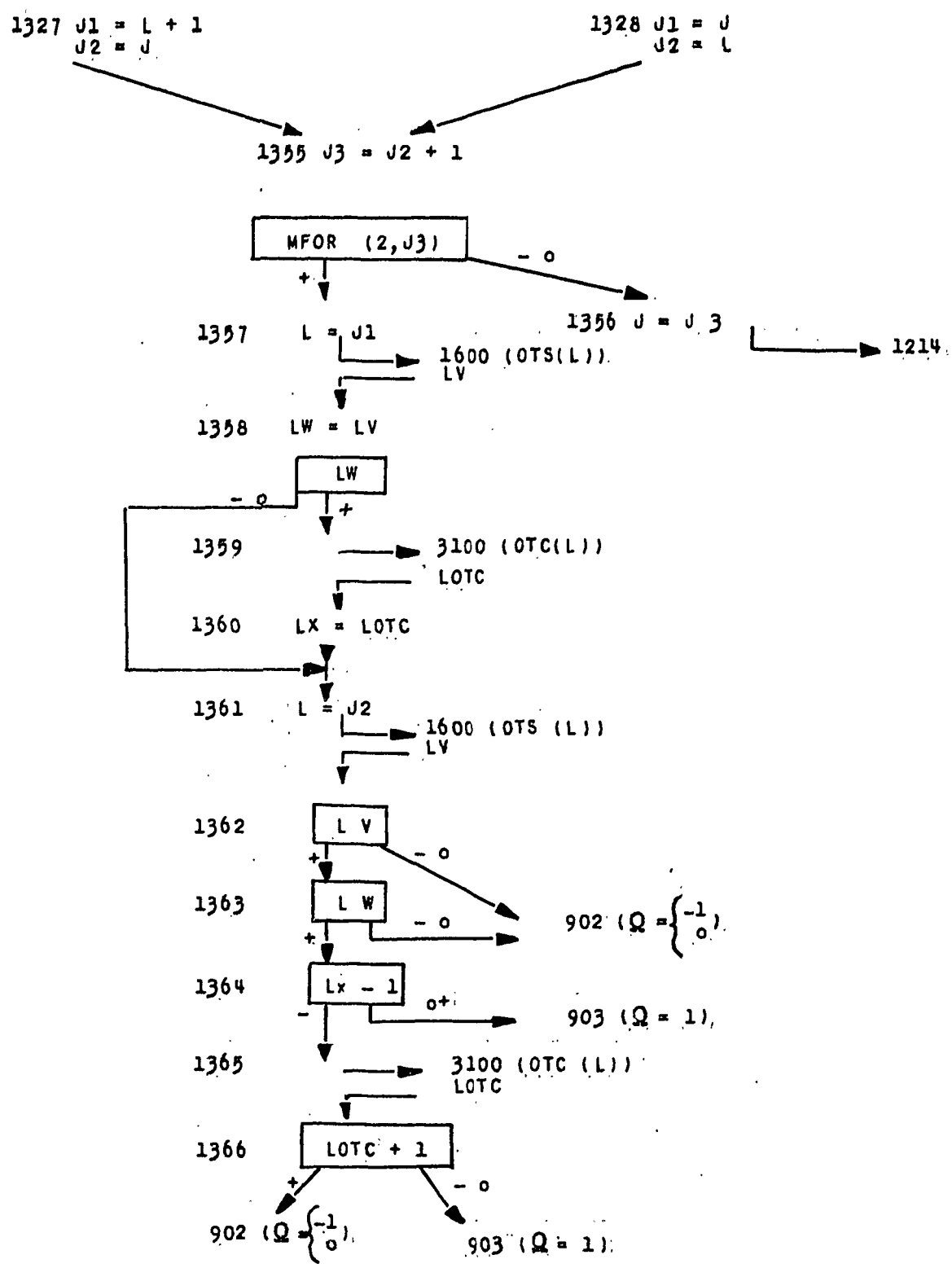


ETUDE DES DIFFERENTS CAS
DU TABLEAU 9x9 (Suite)

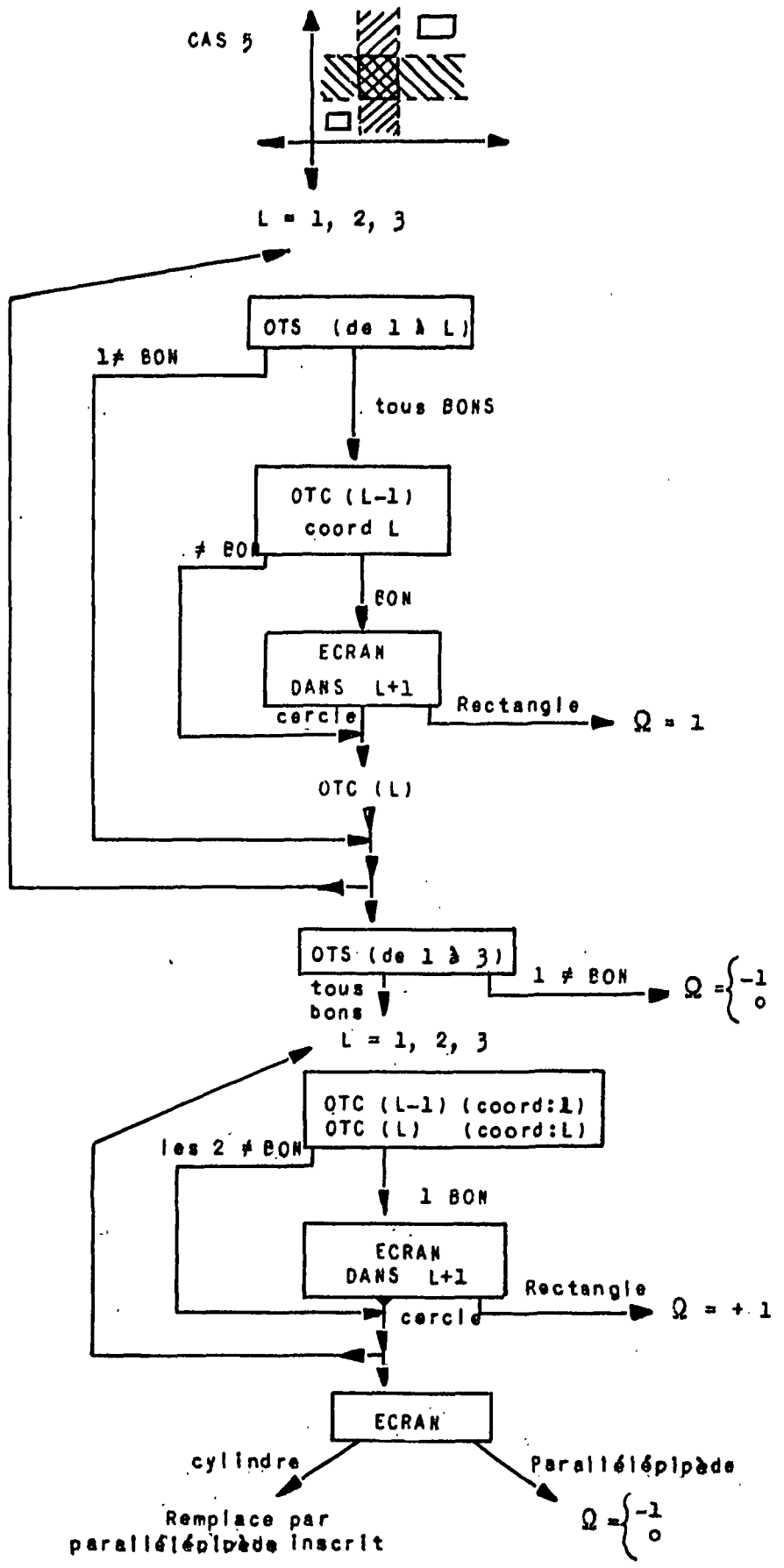


ETUDE DES DIFFERENTS CAS

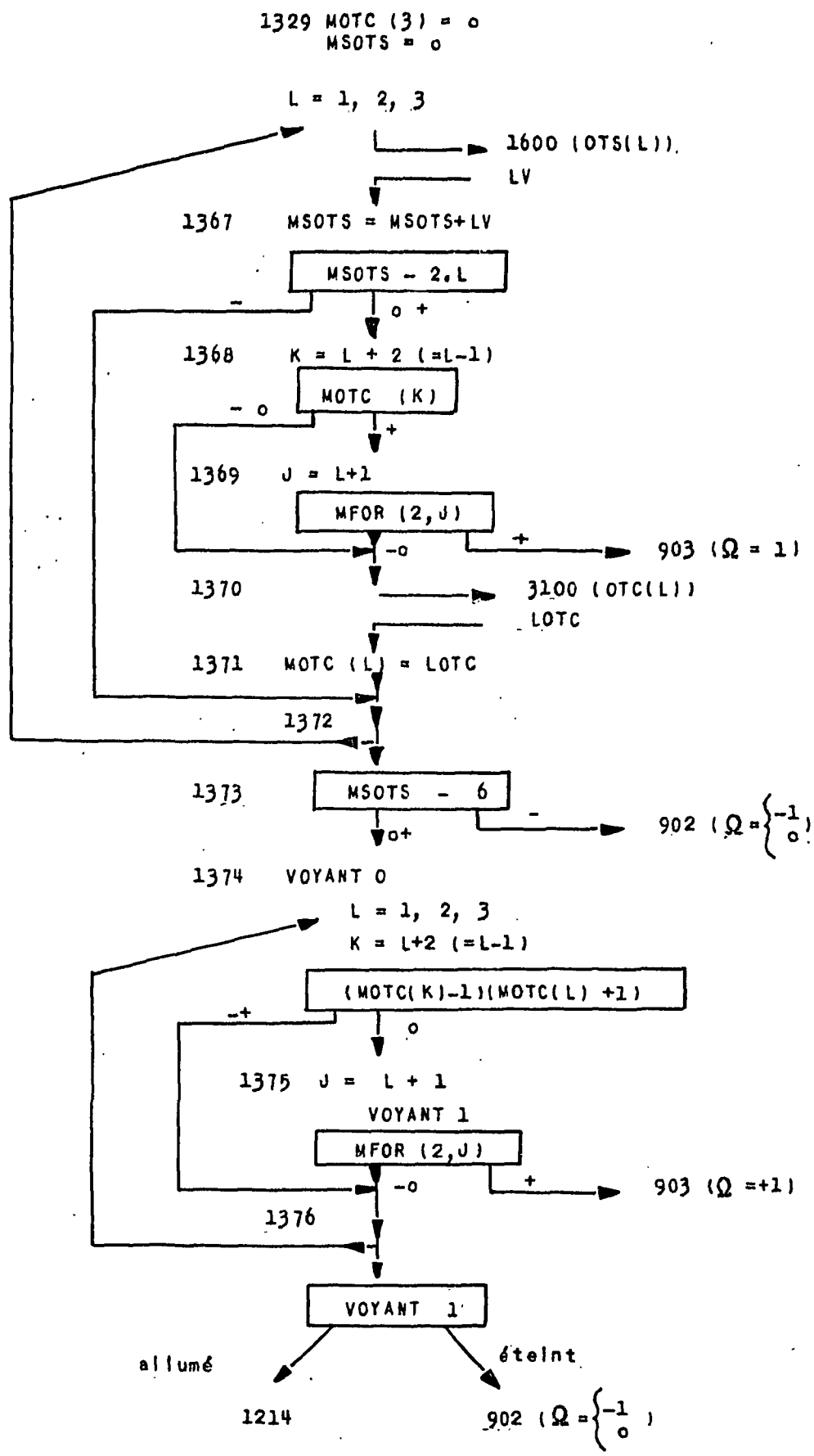
DU TABLEAU 9x9 (suite)



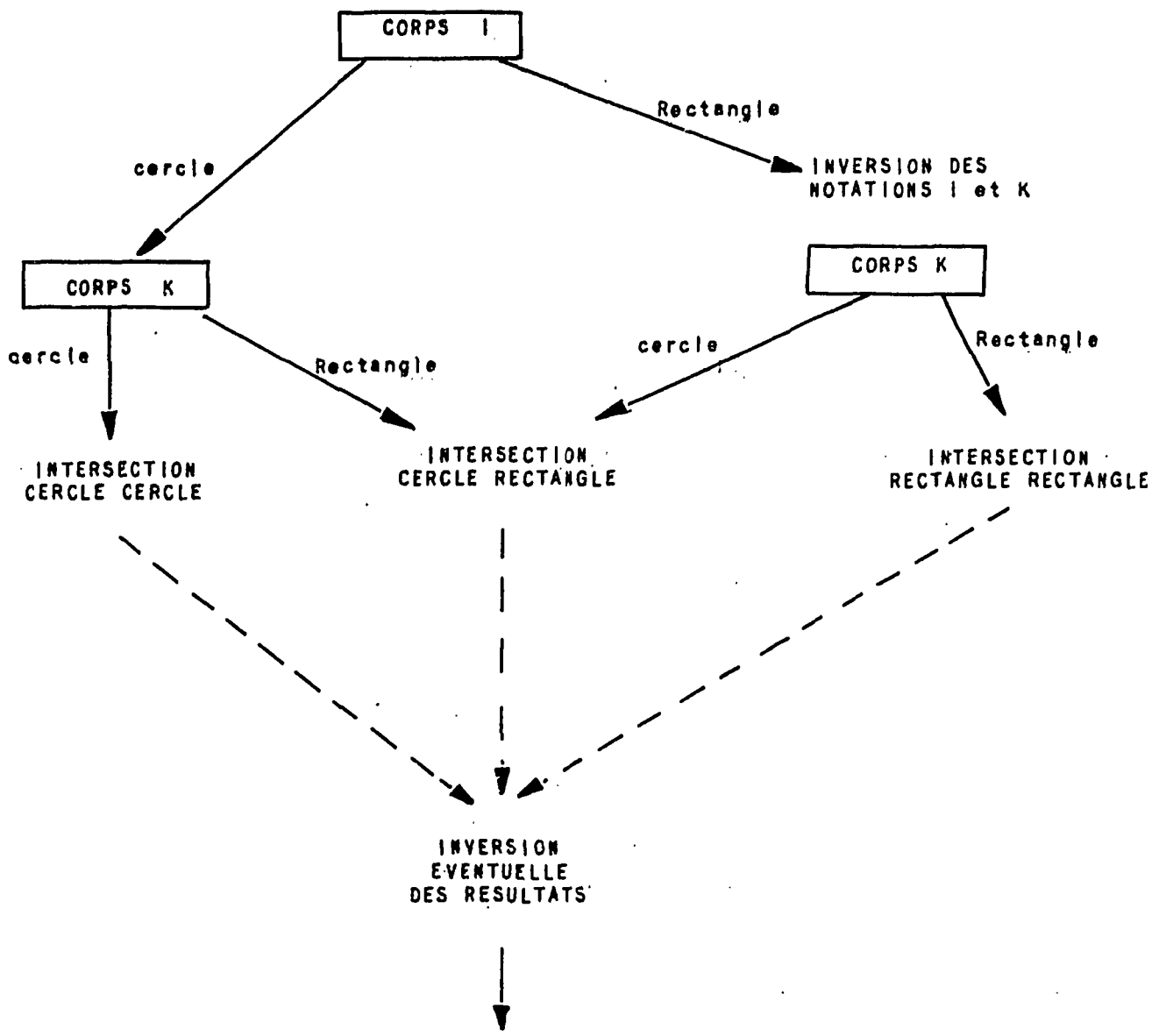
ETUDE DES DIFFERENTS CAS DU TABLEAU 9x9 (Suite)



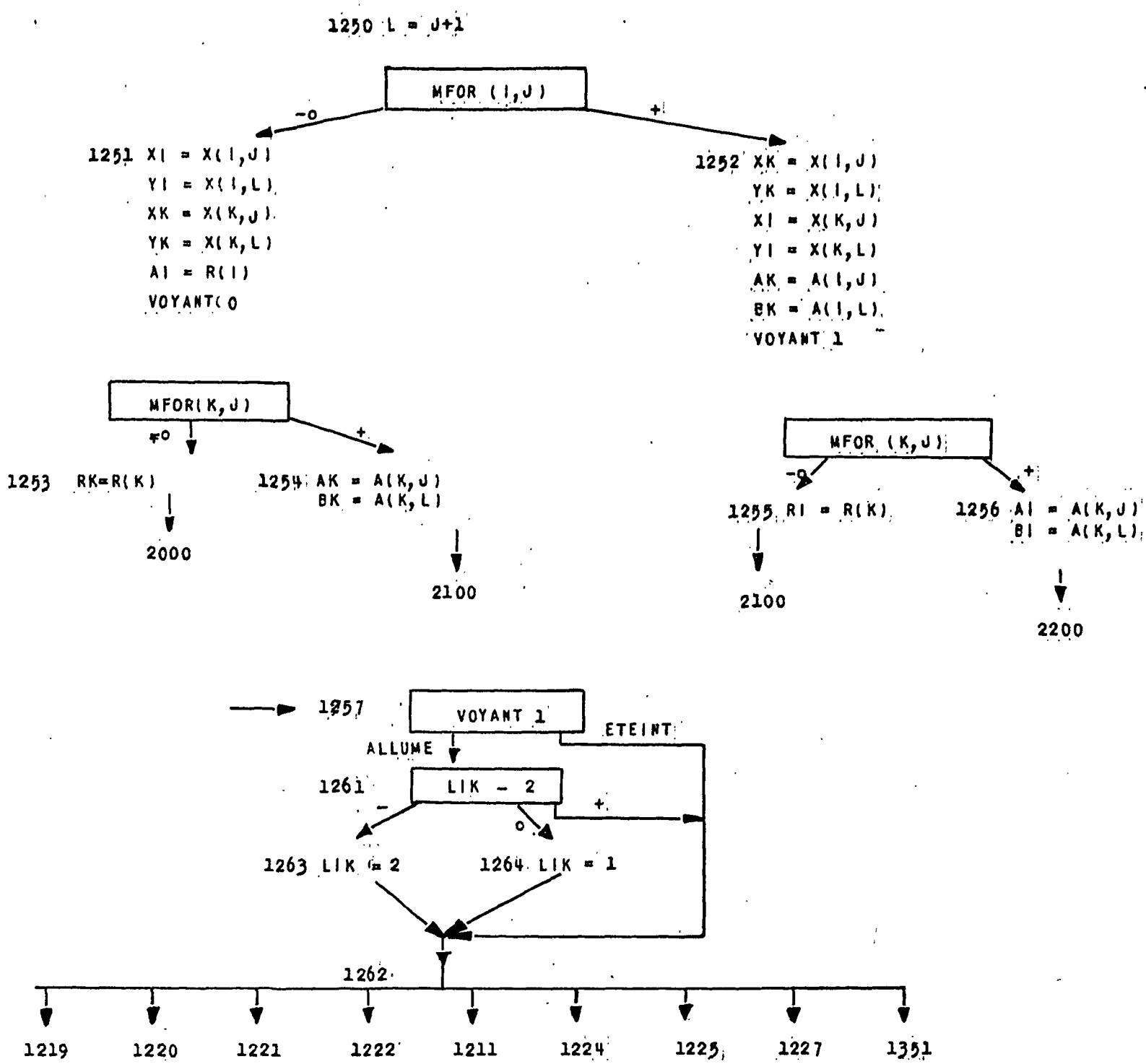
ETUDE DES DIFFERENTS CAS
DU TABLEAU 9x9 (suite)



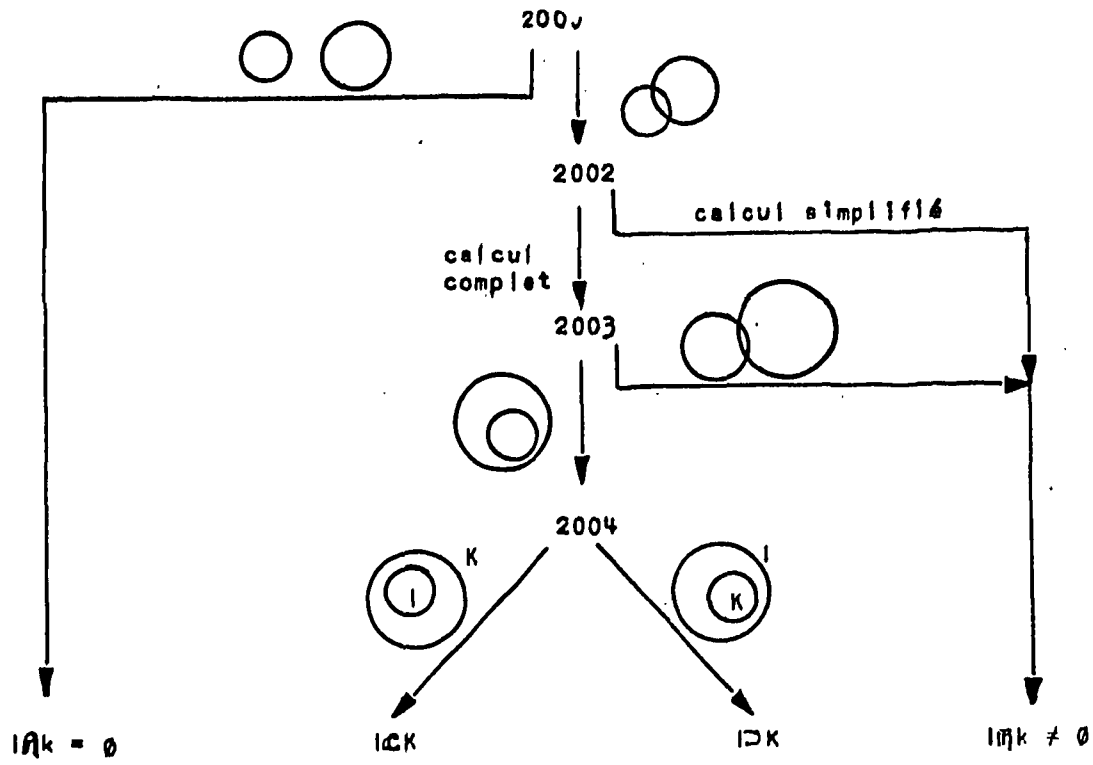
INTERSECTION DES VOLUMES
I et K DANS LE PLAN J



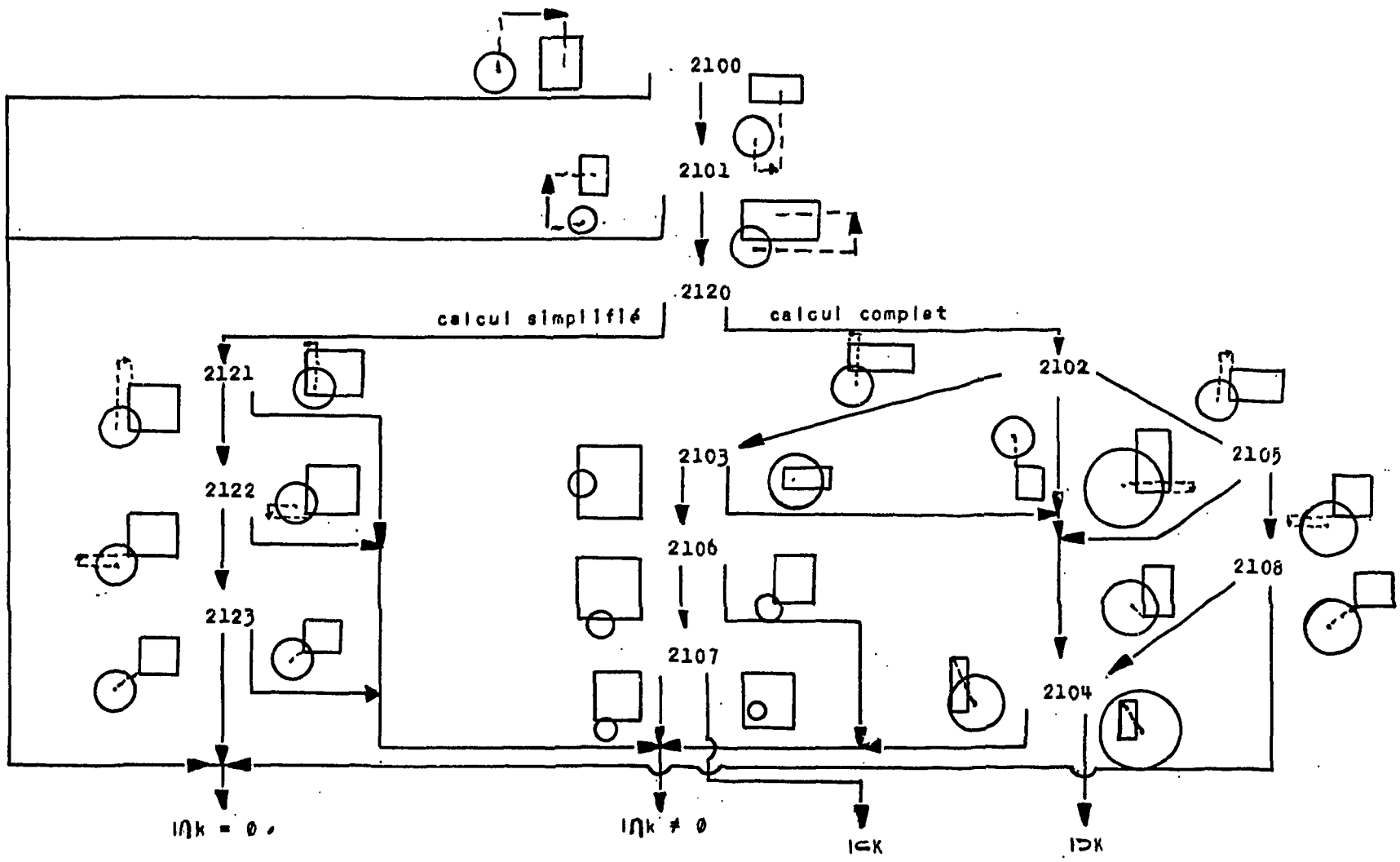
INTERSECTION DES VOLUMES I et K DANS LE PLAN J



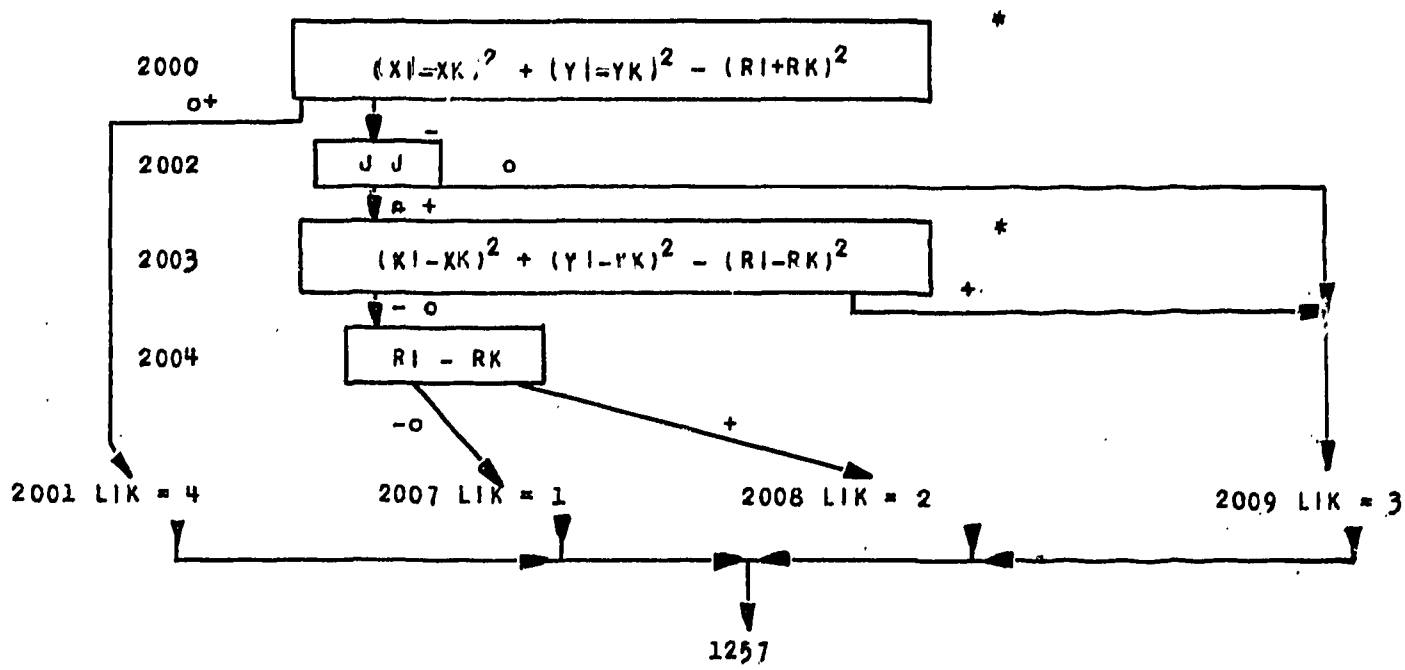
INTERSECTION DE DEUX CERCLES



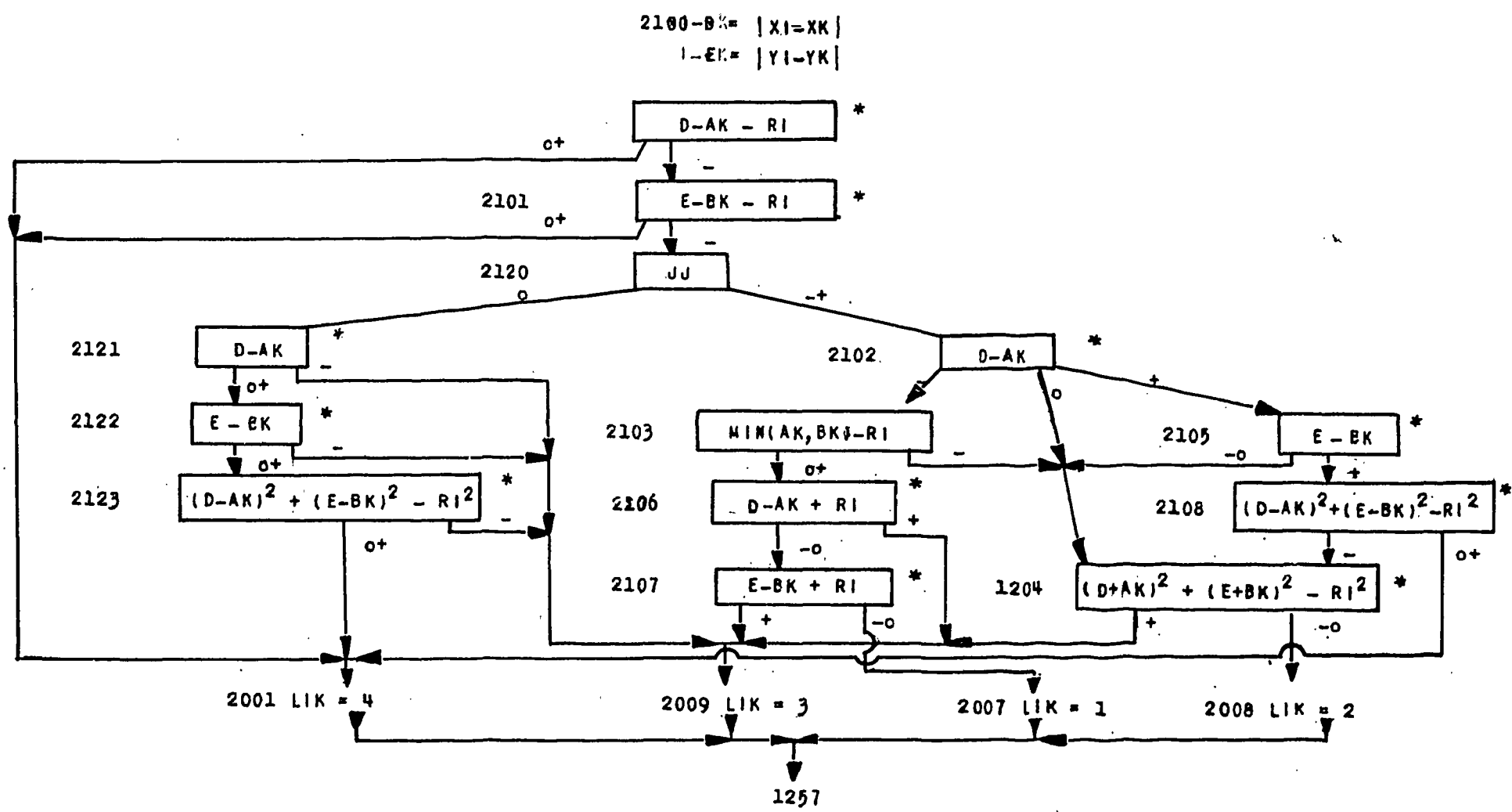
INTERSECTION D'UN CERCLE (I) ET D'UN RECTANGLE (K)



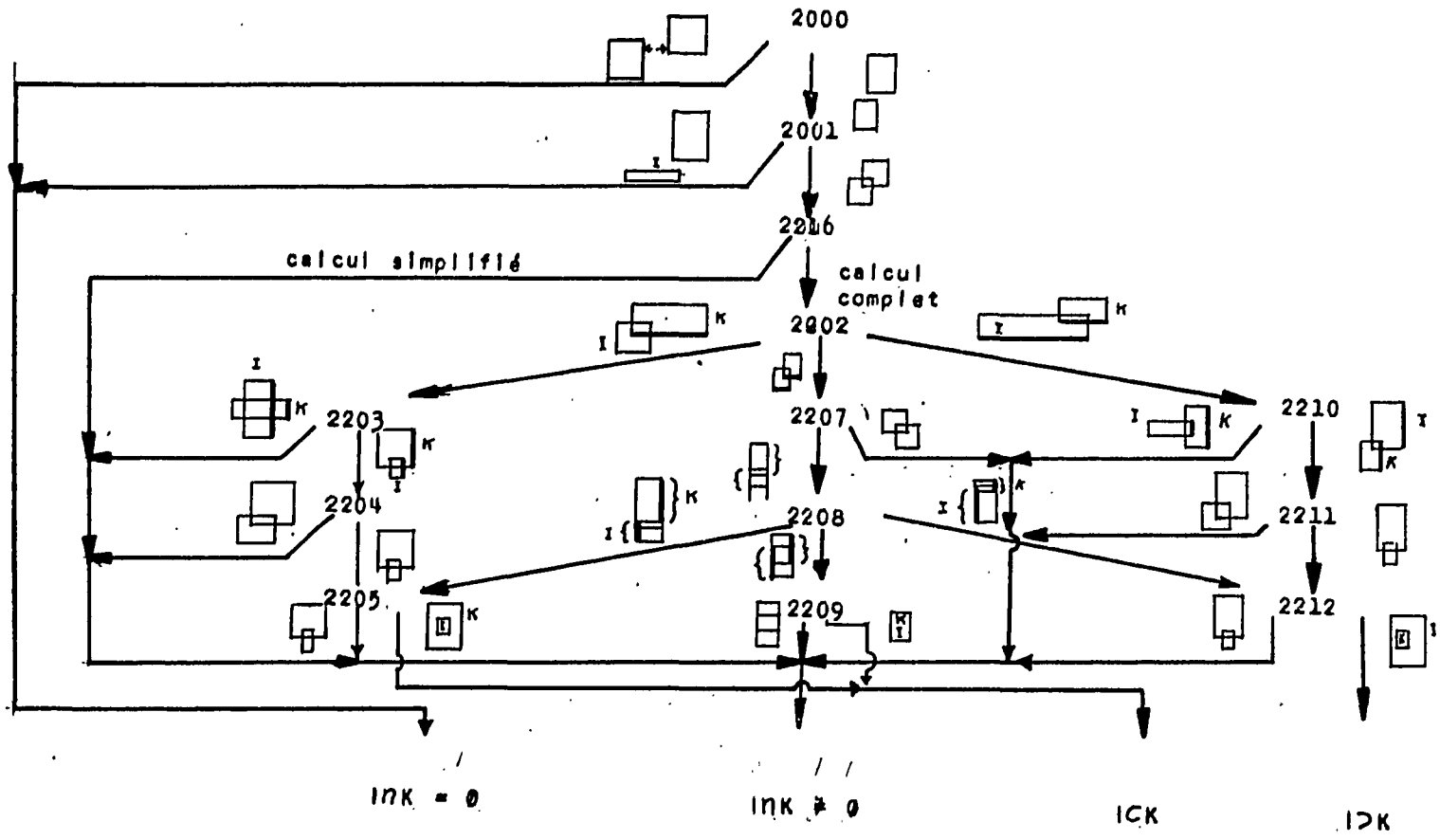
INTERSECTION DE DEUX CERCLES



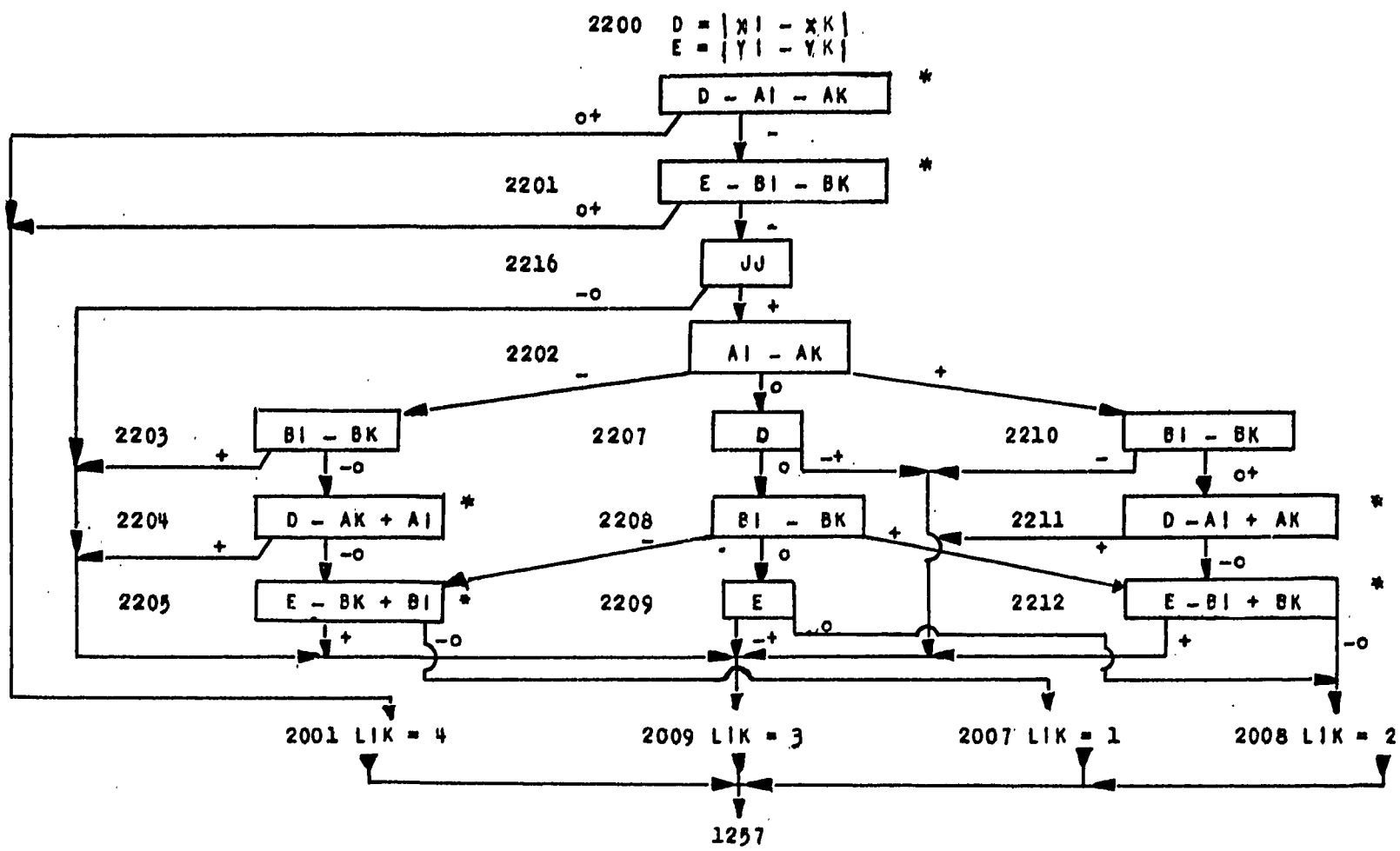
INTERSECTION D'UN CERCLE (I) ET D'UN RECTANGLE (K)



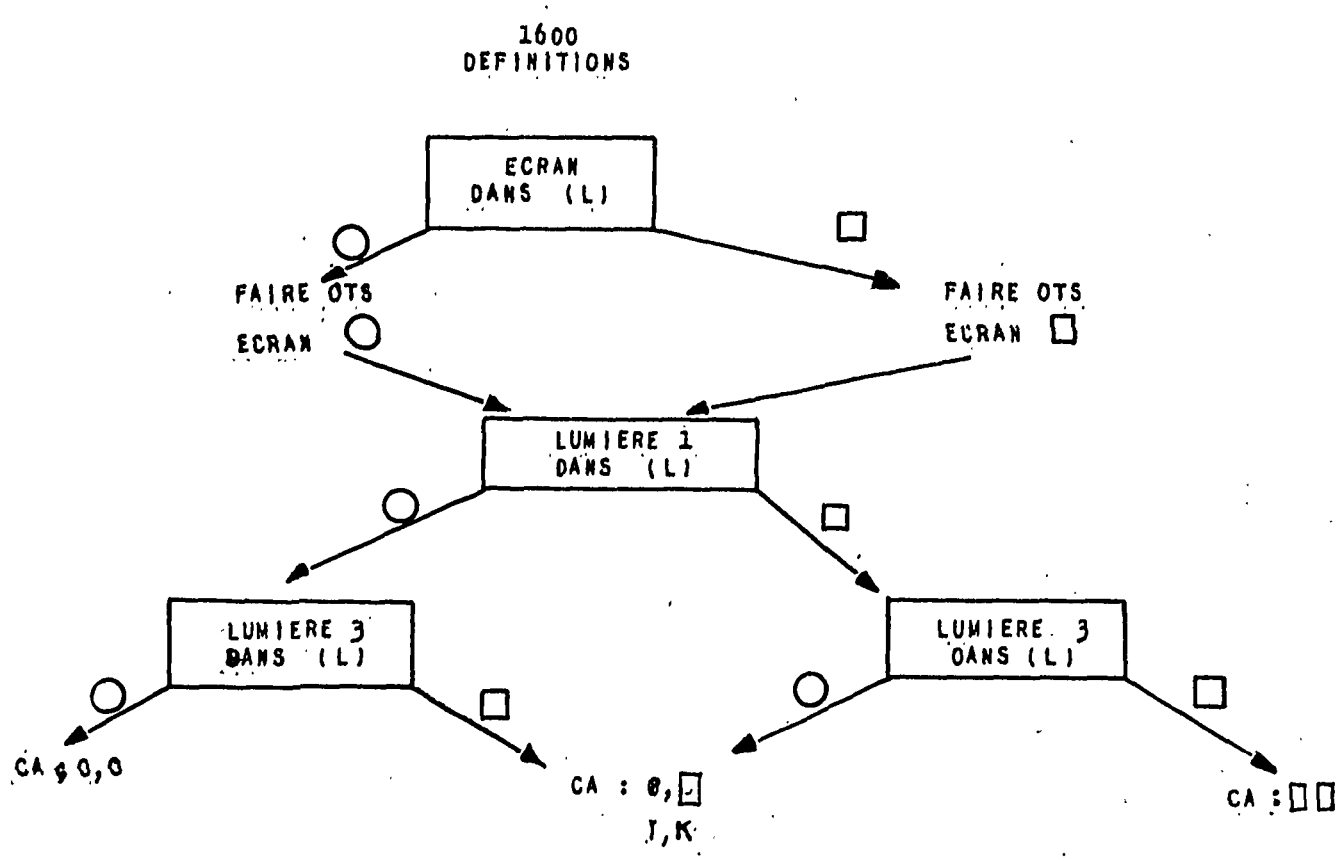
INTERSECTION DE DEUX RECTANGLES



INTERSECTION DE DEUX RECTANGLES

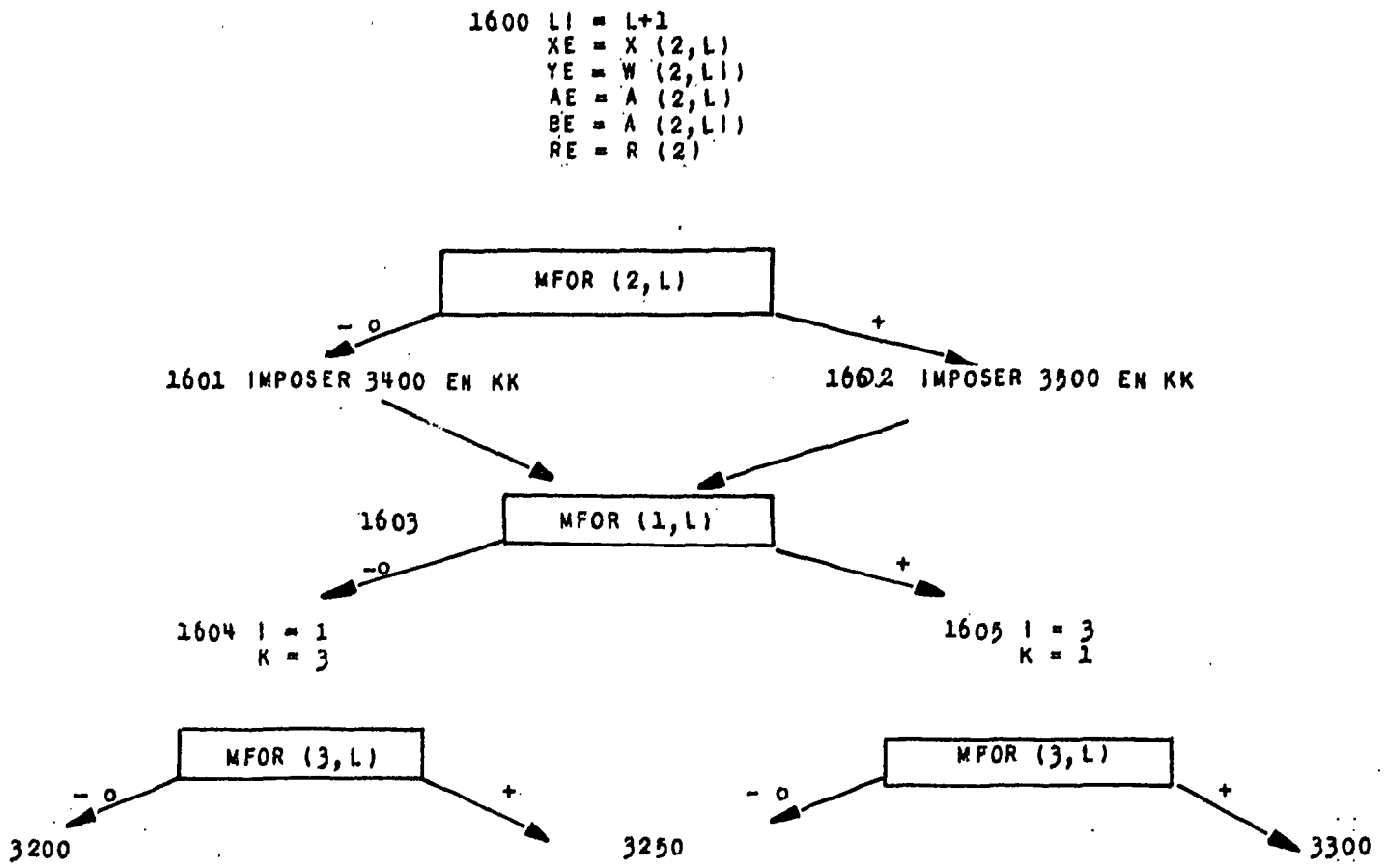


CALCUL OTS (L)
DEFINITION DU CONTOUR APPARENT

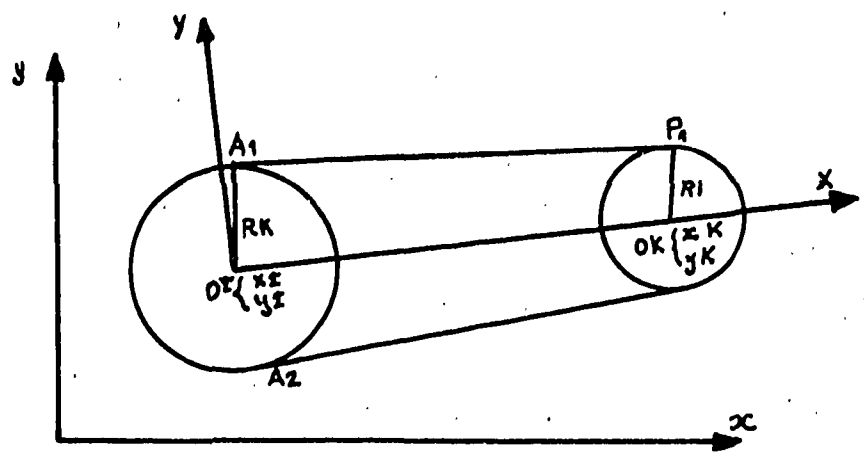


CA : CONTOUR APPARENT DANS LE PLAN L

CALCUL OTS (L)
DEFINITION DU CONTOUR APPARENT



CONTOUR APPARENT (Cercle-cercle)



$$\delta x = x_K - x_I \qquad \delta R = R_I - R_K$$

$$\delta y = y_K - y_I$$

$$d = \sqrt{(x_K - x_I)^2 + (y_K - y_I)^2}$$

$$\begin{cases} x = x_I + x\dfrac{\delta x}{d} - y\dfrac{\delta y}{d} \\ y = y_I + x\dfrac{\delta y}{d} + y\dfrac{\delta x}{d} \end{cases}$$

$$XA1 = XA2 = \frac{R_I\,\delta R}{d}$$

$$XP1 = XP2 = d + \frac{R_K\,\delta R}{d}$$

$$YA1 = -YA2 = R_I\sqrt{1 - \left(\frac{\delta R}{d}\right)^2}$$

$$YP1 = YP2 = R_K\sqrt{1 - \left(\frac{\delta R}{d}\right)^2}$$

CONTOUR APPARENT (Cercle-Cercle)

$$3200 \quad DD = \sqrt{[X(K,L) - X(I,L)]^2 + [X(K,LI) - X(I,LI)]^2}$$

$$XX = \frac{X(K,L) - X(I,L)}{DD}$$

$$DR = R(I) - R(K)$$

$$X1A = \frac{R(I) - DR}{DD}$$

DR

o

$$3201 \quad X1P = DD$$

$$Y1A = R(I)$$

$$Y1P = R(K)$$

-+

$$3202 \quad X1P = DD + \frac{R(K) \cdot DR}{DD}$$

$$DEL = \sqrt{1 - \left(\frac{DR}{DD}\right)^2}$$

$$Y1A = R(I) . DEL$$

$$Y1P = R(K) . DEL$$

$$23203 \quad XA1 = X(I,L) + X1A.XX - Y1A . YY$$

$$XA2 = XA1 + 2.Y1A.YY$$

$$XP1 = X(I,L) + X1P.XX - Y1P.YY$$

$$XP2 = XP1 + 2.Y1P.YY$$

$$YA1 = X(I,LI) + X1A.YY + Y1A.XX$$

$$YA2 = YA1 - 2.Y1A.XX$$

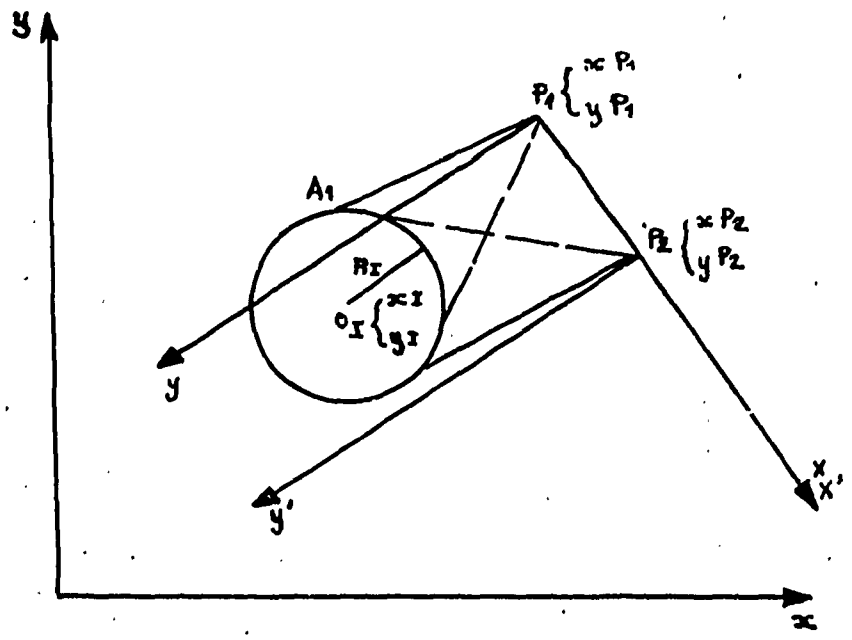
$$YP1 = X(I,LI) + X1P.YY + Y1P.XX$$

$$YP2 = YP1 - 2\ Y1P.XX$$

↓

KK = 3400, 3500

CONTOUR APPARENT (Cercle-Rectangle)



$$d = \left| \overrightarrow{P_1 P_2} \right|$$

$$\delta_x = x_{P2} - x_{P1}$$

$$\delta_y = y_{P2} - y_{P1}$$

$$\begin{cases} x = x_{P1} + X \dfrac{\delta_x}{d} - y \dfrac{\delta_y}{d} \\ y = y_{P1} + X \dfrac{\delta_y}{d} + y \dfrac{\delta_x}{d} \end{cases}$$

$$\begin{cases} X = x' + d \\ Y = Y' \end{cases}$$

$$\delta^2 = X_1^2 + Y_1^2 - R_1^2$$

$$\delta'^2 = X_1'^2 + Y_1'^2 - R_1^2$$

Cercle de centre O_1 : $(X-X_1)^2 + (Y-Y_1)^2 - R_1^2 = 0$

Cercle de diamètre O_1P_1 : $X(X-Y_1) + Y(Y-Y_1) = 0$

$$\Rightarrow \begin{cases} X^2 + y^2 - 2 X_1 X - 2 Y_1 Y + \delta^2 = 0 \\ X^2 + Y^2 - X_1 X - Y_1 Y = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Y = \dfrac{\delta^2 - X_r X}{Y_1} \\ X^2 + \dfrac{\delta^2 - X_1 X^2}{Y_1} - X_1 X - (\delta^2 - X_1 X) = 0 \end{cases}$$

$$(X_1^2 + Y_1^2) X^2 - 2 X_1 \delta^2 X + \delta^2 (\delta^2 - Y_1^2) = 0$$

$$(X_1^2 + Y_1^2) X^2 - 2 X_1 \delta^2 X + \delta^2 (X_1^2 - R_1^2) = 0$$

$$\Delta = (X_1 \delta^2)^2 - (X_1^2 + Y_1^2) \delta^2 (X_1^2 - R_1^2) = \delta^2 \left[X_1^2 (X_1^2 + Y_1^2 - R_1^2) - (X_1^2 + Y_1^2)(X_1^2 - R_1^2) \right]$$

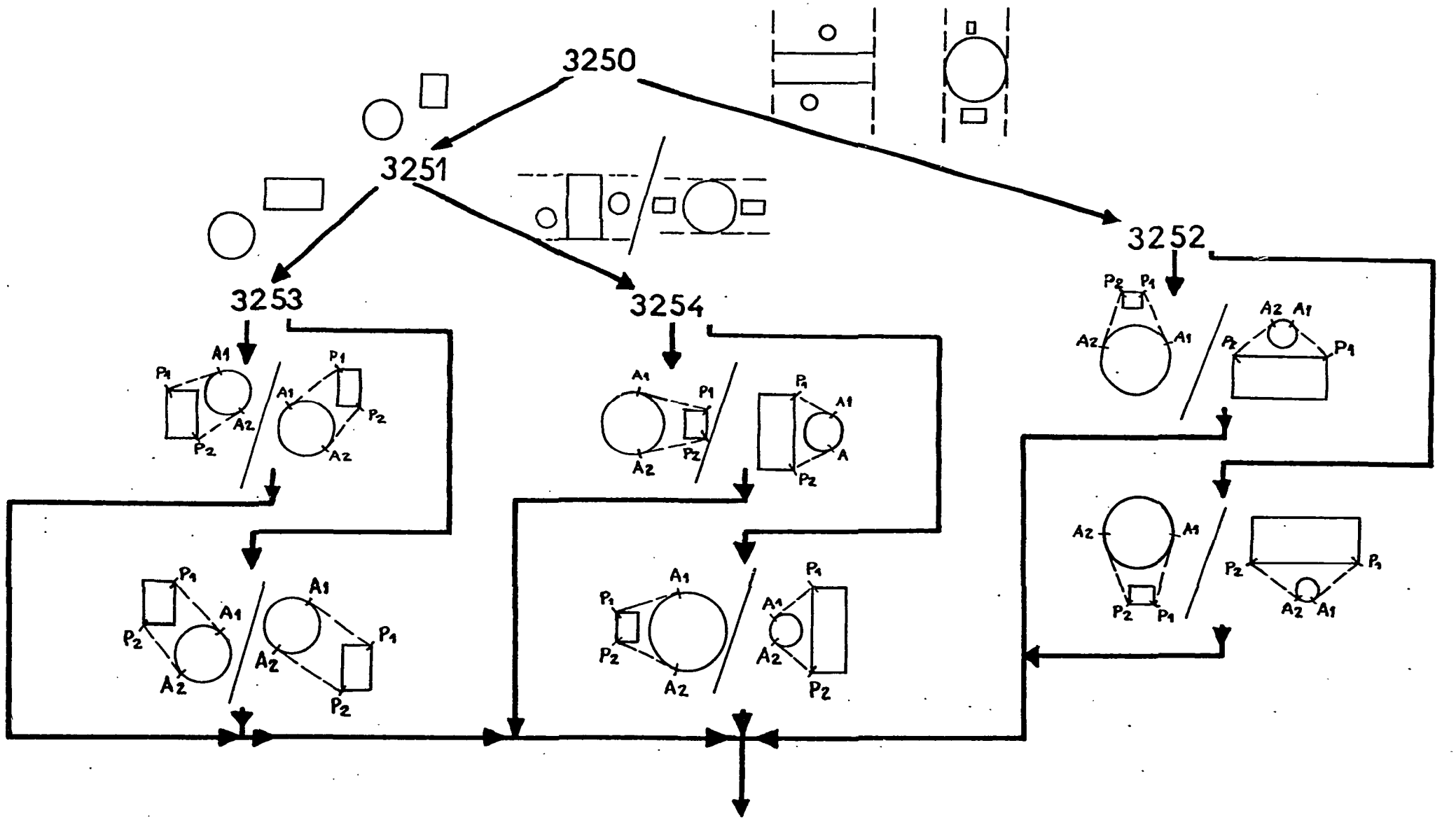
$$= \delta^2 \left[- X_1^2 R_1^2 + (X_1^2 + Y_1^2) R_1^2 \right] = \delta^2 Y_1^2 R_1^2$$

$$\Rightarrow X = \frac{X_1 \delta^2 \pm |Y_1| R_1 \sqrt{\delta^2}}{X_1^2 + Y_1^2}$$

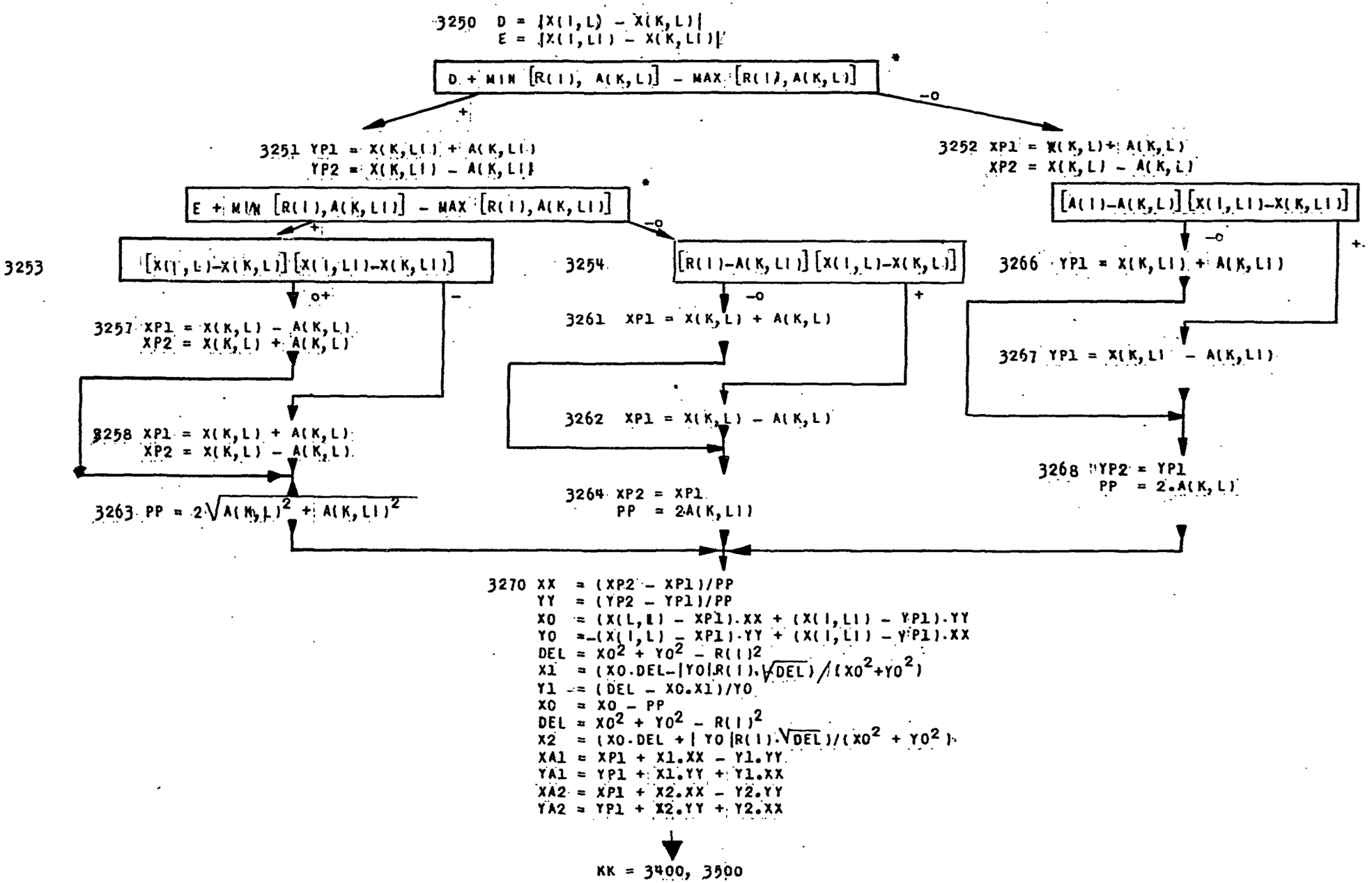
$$A_1 : X_{A1} = \frac{X_1 \delta^2 - |Y_1| R_1 \sqrt{\delta^2}}{X_1^2 + Y_1^2} \qquad Y_{A1} = \frac{\delta^2 - X_1 X_{A1}}{Y_1}$$

$$A_2 : X'_{A2} = \frac{X'_1 \delta'^2 + |Y'_1| R_1 \sqrt{\delta'^2}}{X'^2_1 + Y'^2_1} \qquad Y'_{A2} = \frac{\delta'^2 - X'_1 X'_{A2}}{Y'_1}$$

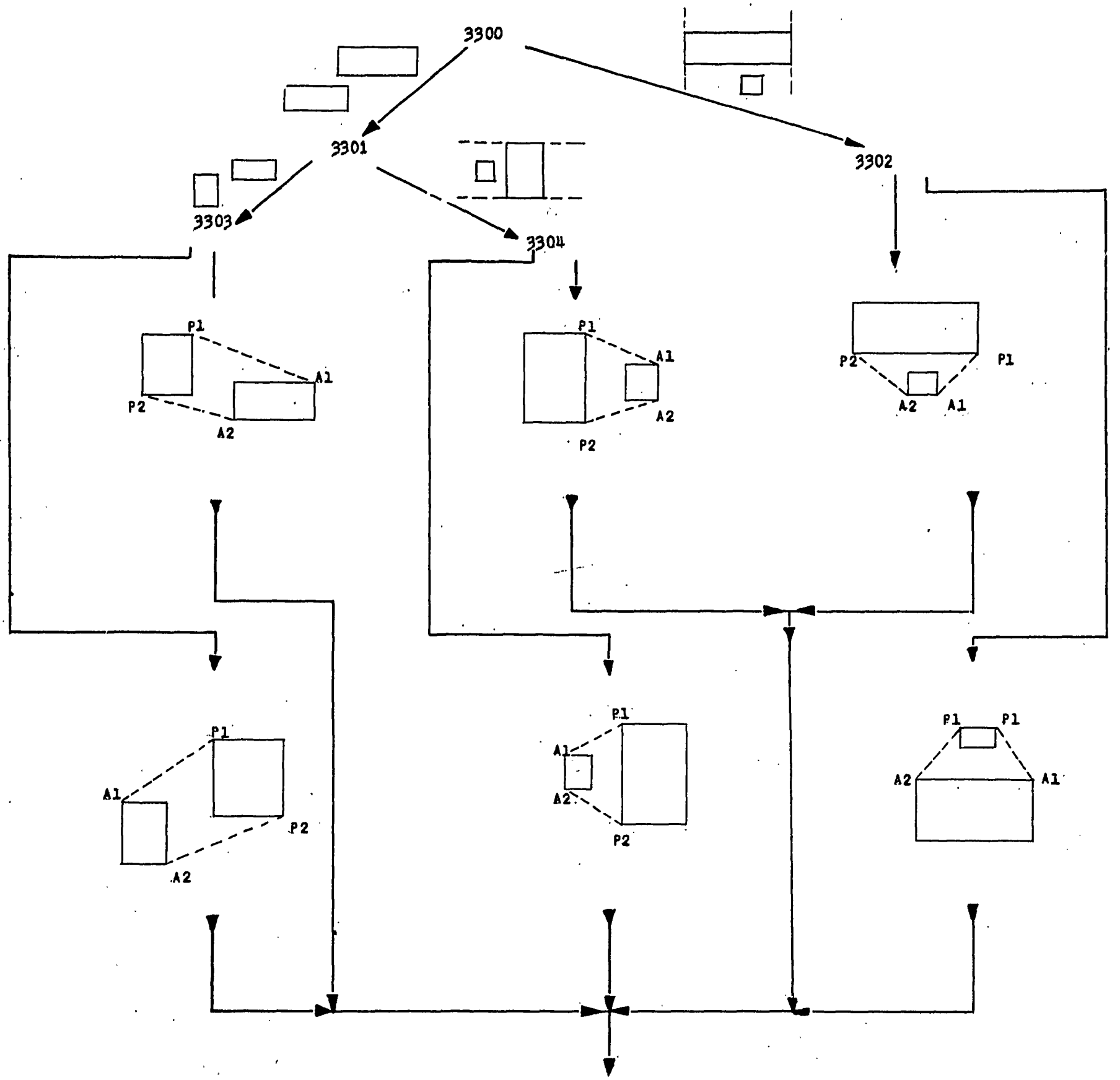
CONTOUR APPARENT (Cercle I, Rectangle K,).-



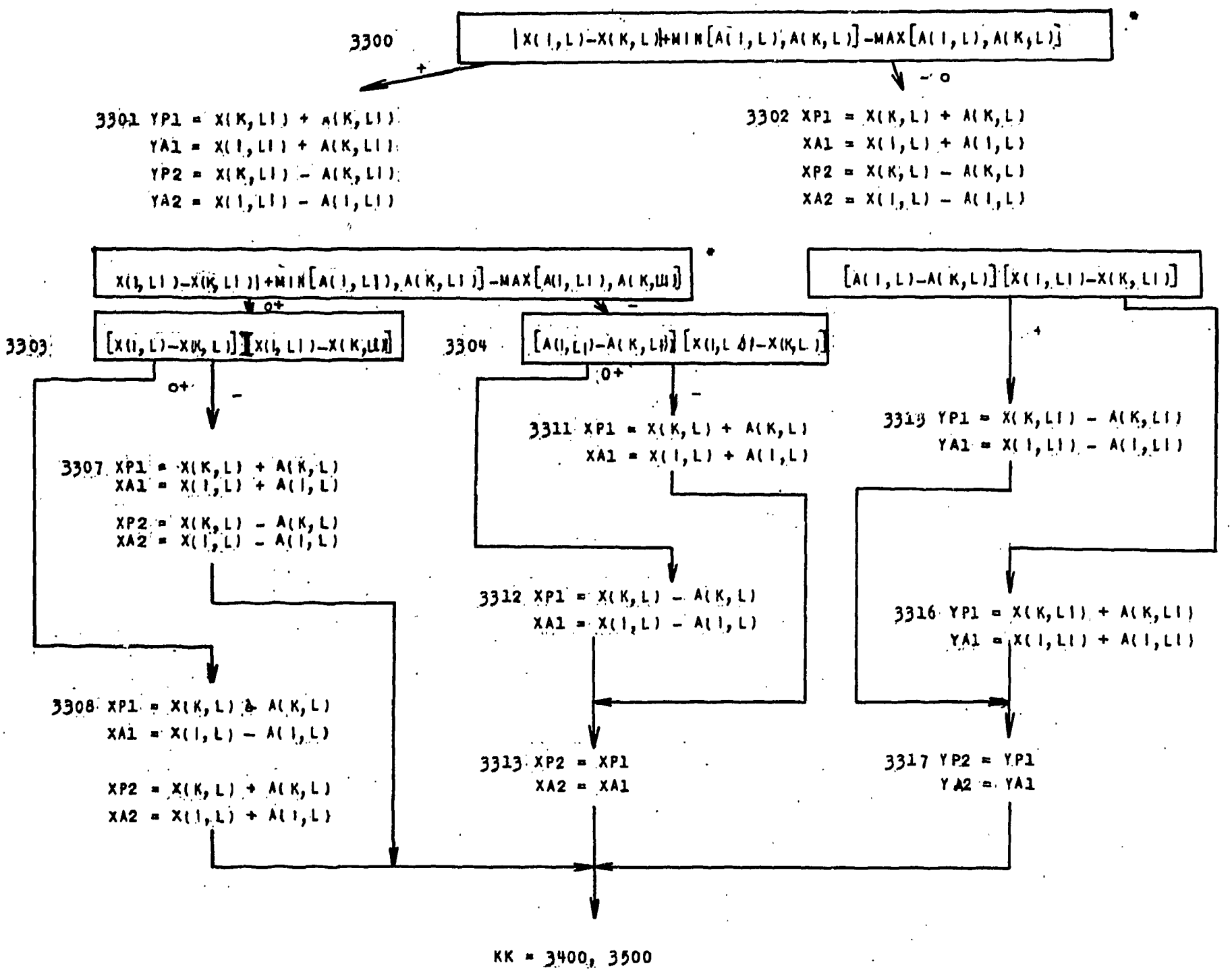
CONTOUR APPARENT (cercle I - rectabgle K)



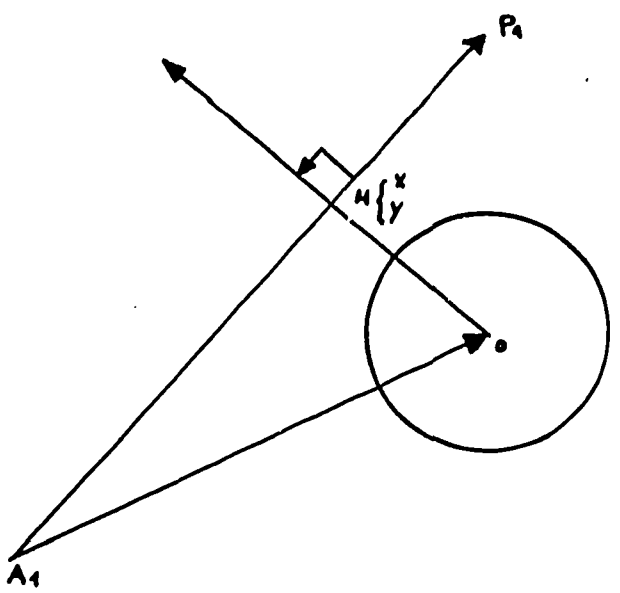
CONTOUR APPARENT (Rectangle - Rectangle)



CONTOUR APPARENT (Rectangle-Rectangle)



INTERSECTION ECRAN-CONTOUR APPARENT
(Ecran Circulaire)



$\overrightarrow{A1P1}$ à pour cosinus directeurs $\begin{cases} \dfrac{XP1 - XA1}{\sqrt{UN}} \\ \dfrac{XP1 - YA1}{\sqrt{UN}} \end{cases}$

$\overrightarrow{OH}$ " " " " $\begin{cases} \dfrac{XP1 - YA1}{\sqrt{UN}} \\ \dfrac{XP1 - YA1}{\sqrt{UN}} \end{cases}$

avec $UN = |\overrightarrow{A1F1}|^2$

$$UN = (XA1 - XP1)^2 + (YA1 - YF1)^2$$

Soit $\vec{z}$ le vecteur unitaire de l'axe oz orthogonal au plan ox, oy (ox,oy,oz direct)

$$\overline{OH} = \frac{(\overrightarrow{A1O} \wedge \overrightarrow{A1P1})}{[\overline{A1\ P1}]}\vec{z} = \frac{(XA1-XE)(YA1-YP1) - (XA1-XF1)(YA1-YE)}{\sqrt{UN}}$$

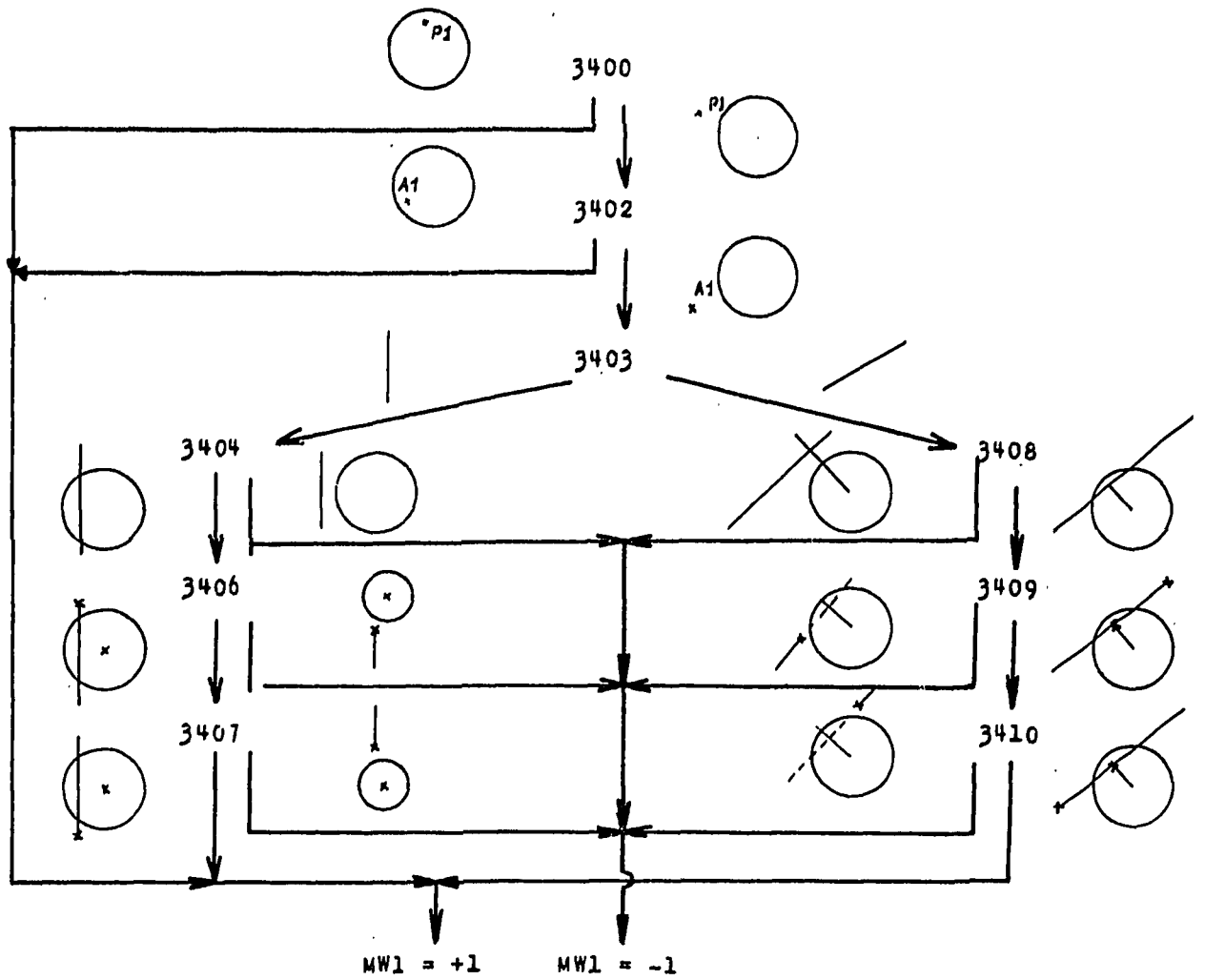
En posant : $(OH) = (XA1-XE)(YA1-YP1) - (XA1-XF1)(YA1-YE)$

$$\overline{OH} = \frac{(OH)}{\sqrt{UN}}$$

$$X - XE = -\frac{YP1 - YA1}{\sqrt{UN}}\ \overline{OH}$$

$$X = XE + (YA1-YP1)\ \frac{(OH)}{UN}$$

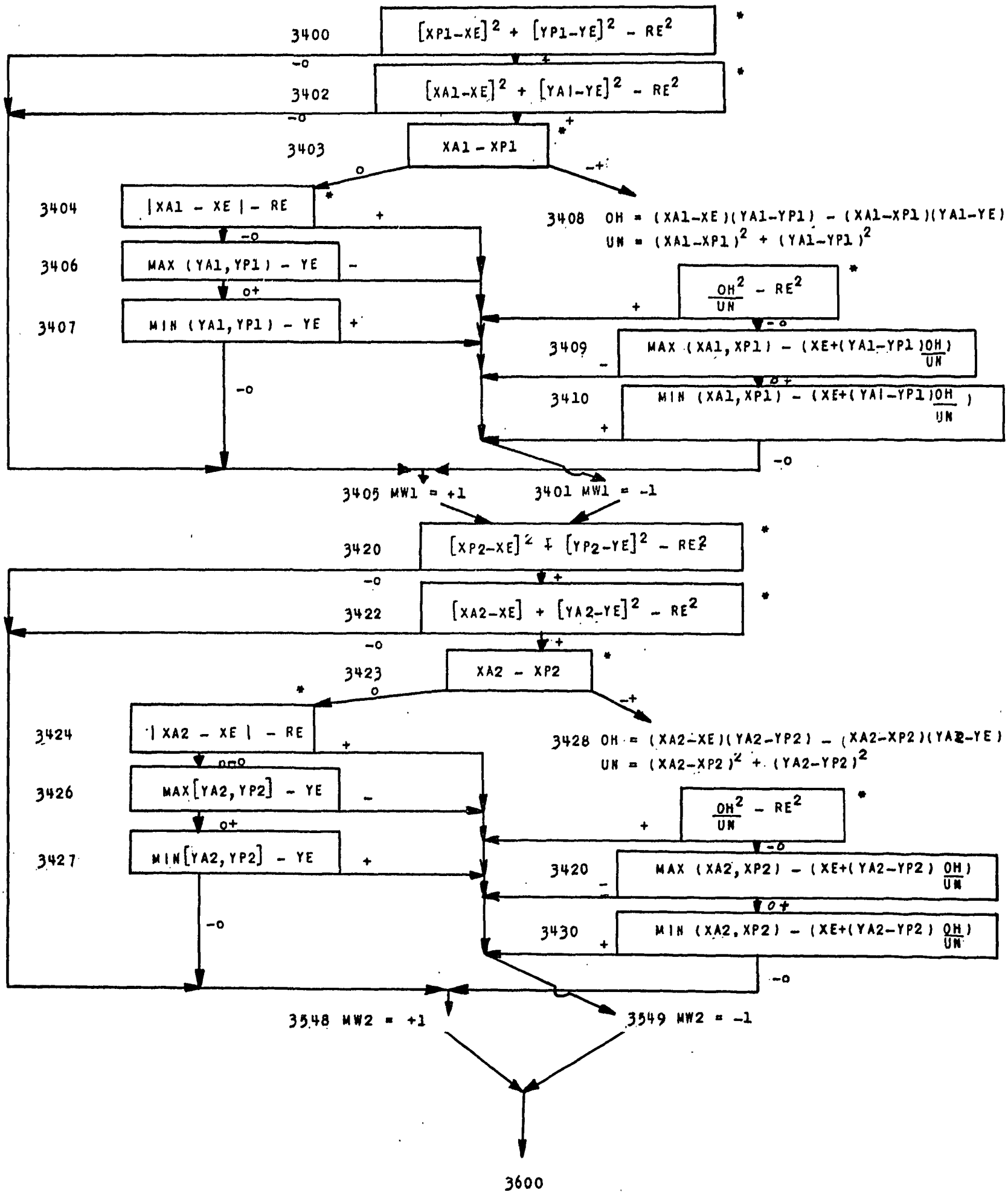
INTERSECTION ECRAN-CONTOUR PPARENT
(Ecran Circulaire)



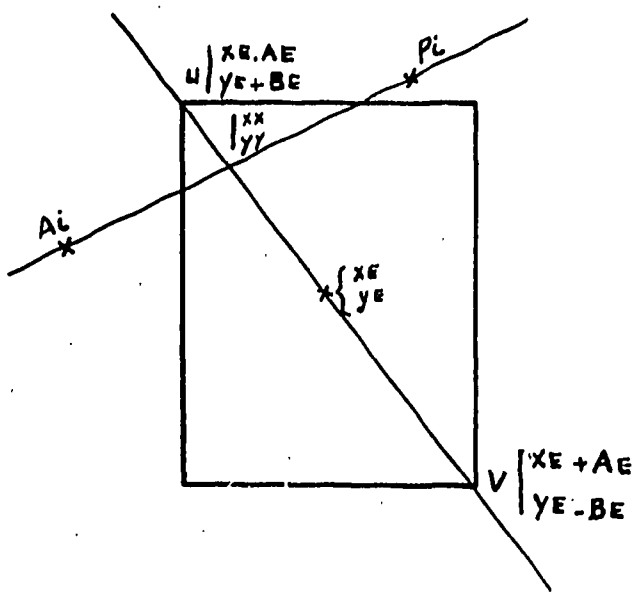
De 3420 à 3430 même solution. Il suffit de changer :

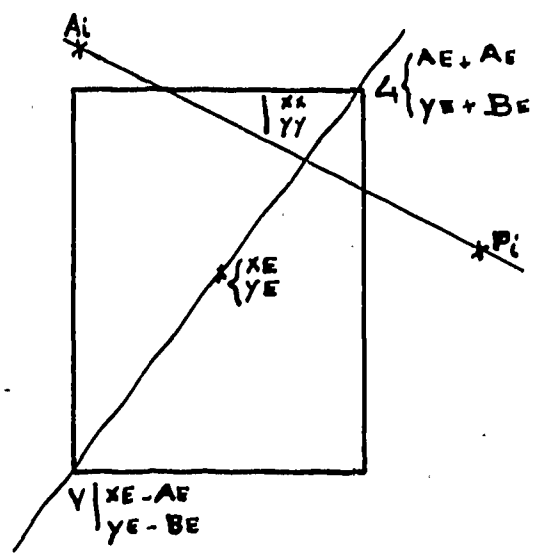
A1 en A2
P1 en P2
W1 en W2

INTERSECTION ECRAN-CONTOUR APPARENT
(Ecran Circulaire)



INTERSECTION ECRAN CONTOUR APPARENT
(Ecran Rectangulaire)





$$\frac{XX - XAi}{XPi - XAi} = \frac{YY - YAi}{YPi - YAi}$$

$$(XPi-XAi)YY - (YPi-YAi)XX = -(YPi-YAi)XAi + (XPi-XAi)YAi$$

(1) $$(XPi-XAi)YY - (YPi-YAi)XX = XPi.YAi - XAi.YPi$$

$$\frac{XX - (XE + AE)}{(XE-AE) - (XE + AE)} = \frac{YY - (YE-BE)}{(YE+BE)-(YE-BE)}$$

$$\frac{XX - (XE-AE)}{-2AE} = \frac{YY-(YE-BE)}{2BE}$$

(2) $$AE.YY+BE.XX = BE.XE.+YE.AE$$

$- AE.(1) + (XPi-XAi).(2)$ donne →

$$\left[(XPi-XAi)BE+(YPi-YAi)AE\right]XX =$$

$$(XPi-XAi)\ (BE.XE+AE.YE) - (XPi.YAi-XAi.YPi)AE$$

$$XX=\frac{(XPi-XAi)(BE.XE+AE.YE)-(XPi.YAi-XAi.YPi)AE}{(XPi-XAi)\ BE+(YPi-YAi)\ AE}$$

$$\frac{XX - (XE+AE)}{(XE-AE) - (XE+AE)} = \frac{YY - (YE+BE)}{(YE-BE)-(YE+BE)}$$

$$\frac{XX - (XE+AE)}{-2AE} = \frac{YY - (YE+BE)}{-2BE}$$

(2') $$AE.YY-BE.XX = -BE.XE+YE.AE$$

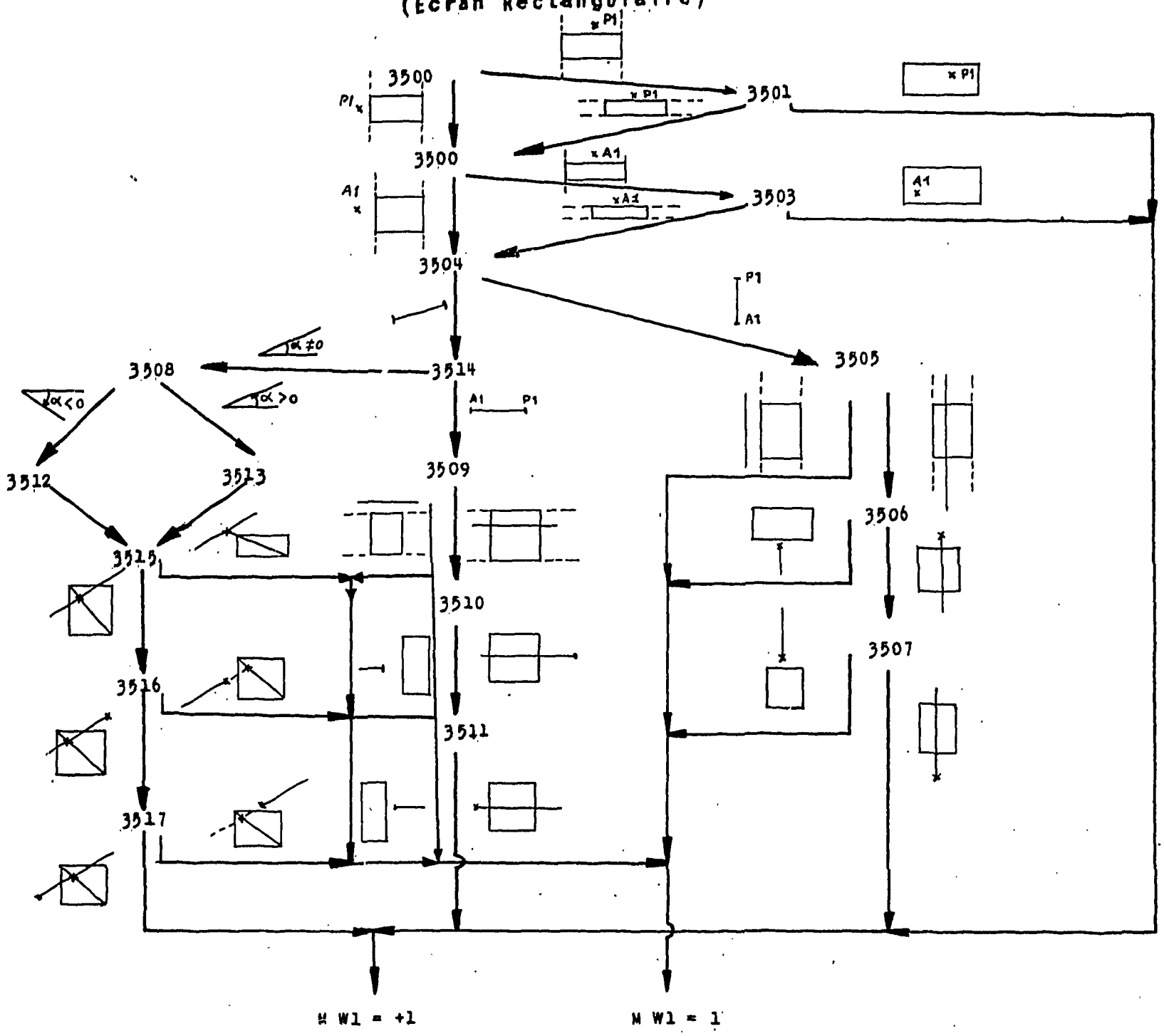
$AE.(1) - (XPi-XAi).(2')$ donne →

$$\left[(XPi-XAi)\ BE - (YPi-YAi)AE\right]XX =$$

$$(XPi-XAi)(BE.XE-AE.YE)+(XPi.YAi-XAi.YPi)AE$$

$$XX=\frac{(XPi-XAi)(BE.XE-AE.YE)+(XPi-YAi-XAi.YPi)AE}{(XPi-XAi)BE - (YPi-YAi)AE}$$

INTERSECTION-ECRAN CONTOUR APPARENT
(Ecran Rectangulaire)



De 3530 à 3545 même solution. Il suffit de changer :

A1 en A2
P1 en P2
W1 en W2

INTERSECTION ECRAN CONTOUR APPARENT
(Fin)

LV = MW1 + MW2 — 3 cas possibles

1°) MW1 = MW2 = 1 LV = 2 → Ombre totale possible

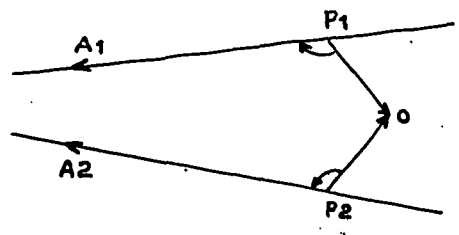
2°) MW1 = + 1 MW2 = - 1 / MW1 = - 1 MW2 = + 1 } LV = 0 → Ombre partielle possible

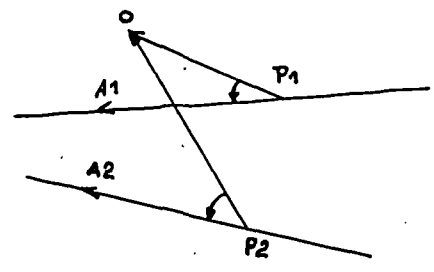
3°) MW1 = MW2 = - 1 LV = 2 → Ombre partielle possible / → Ombre nulle

Soit O le centre de l'écran.

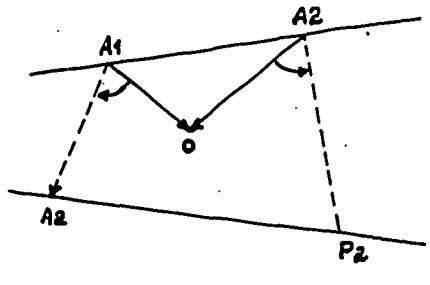
Pour que l'écran soit contenu dans le contour apparent, il faut :

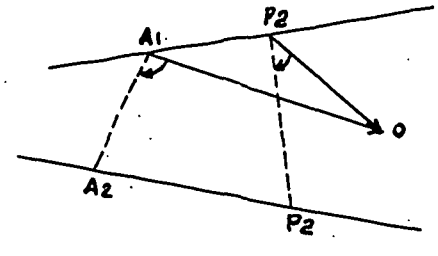
1°) $(\overrightarrow{P10} \wedge \overrightarrow{P1A1}) \cdot (\overrightarrow{P20} \wedge \overrightarrow{P2A2}) < 0$



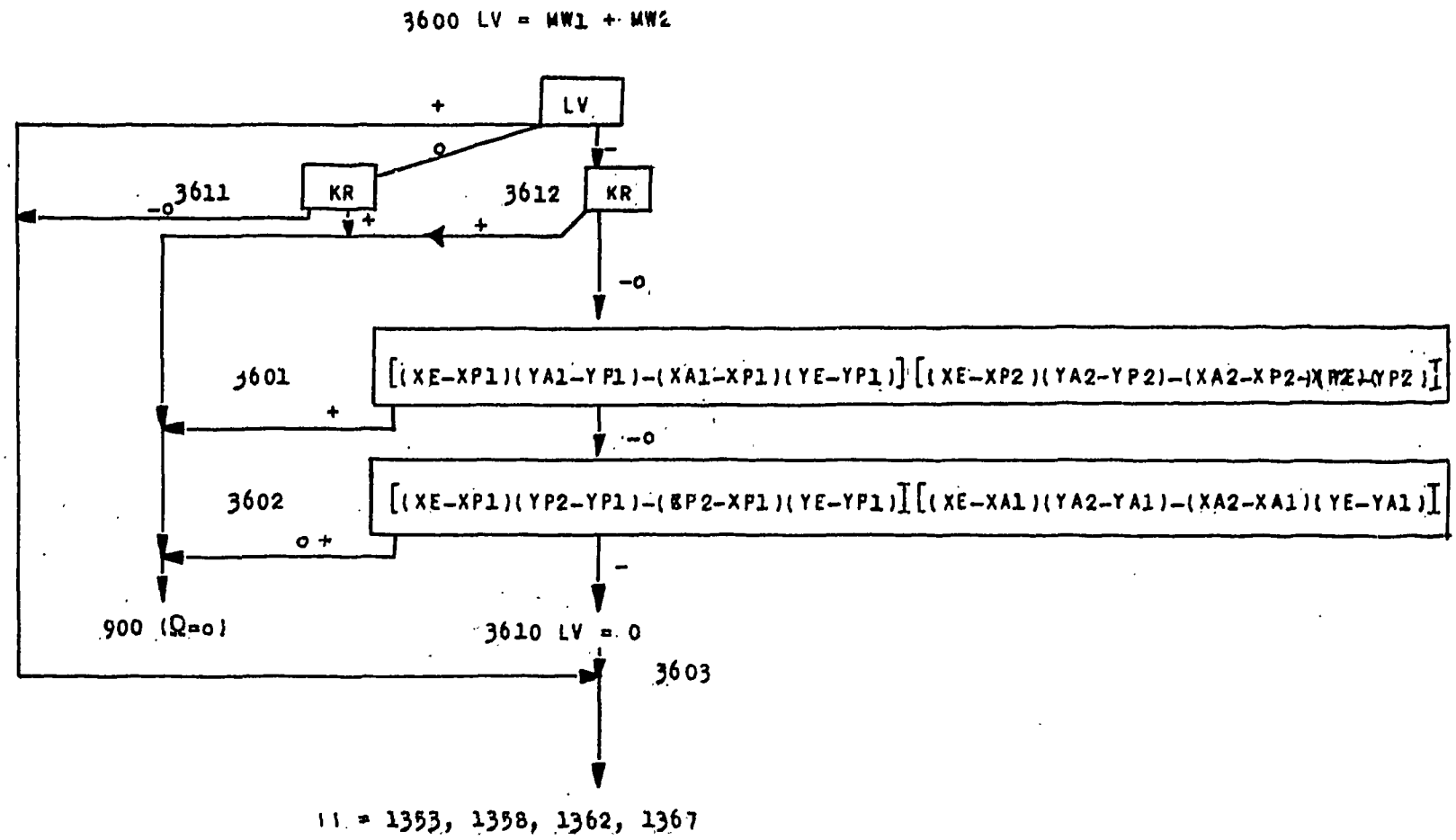


2°) $(\overrightarrow{P10} \wedge \overrightarrow{P1P2}) \cdot (\overrightarrow{A10} \wedge \overrightarrow{A1A2}) < 0$

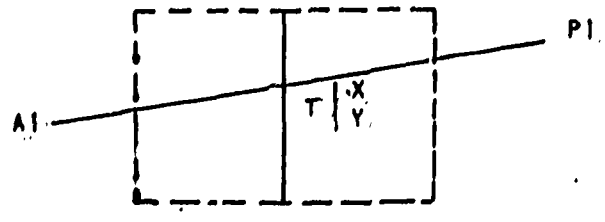




INTERSECTION ECRAN CONTOUR APPARENT
(FIN)



OMBRE TOTALE COMPLETE (O.T.C) (L)



$$T \left\{ \begin{matrix} X \\ Y \end{matrix} \right. = XE \pm AE$$

$$\frac{X-XA1}{Y-YA1} = \frac{XP1-XA1}{YP1-YA1} \Rightarrow Y = YA1 + \frac{(X-XA1)\,(YP1-YA1)}{(XP1-XA1)}$$

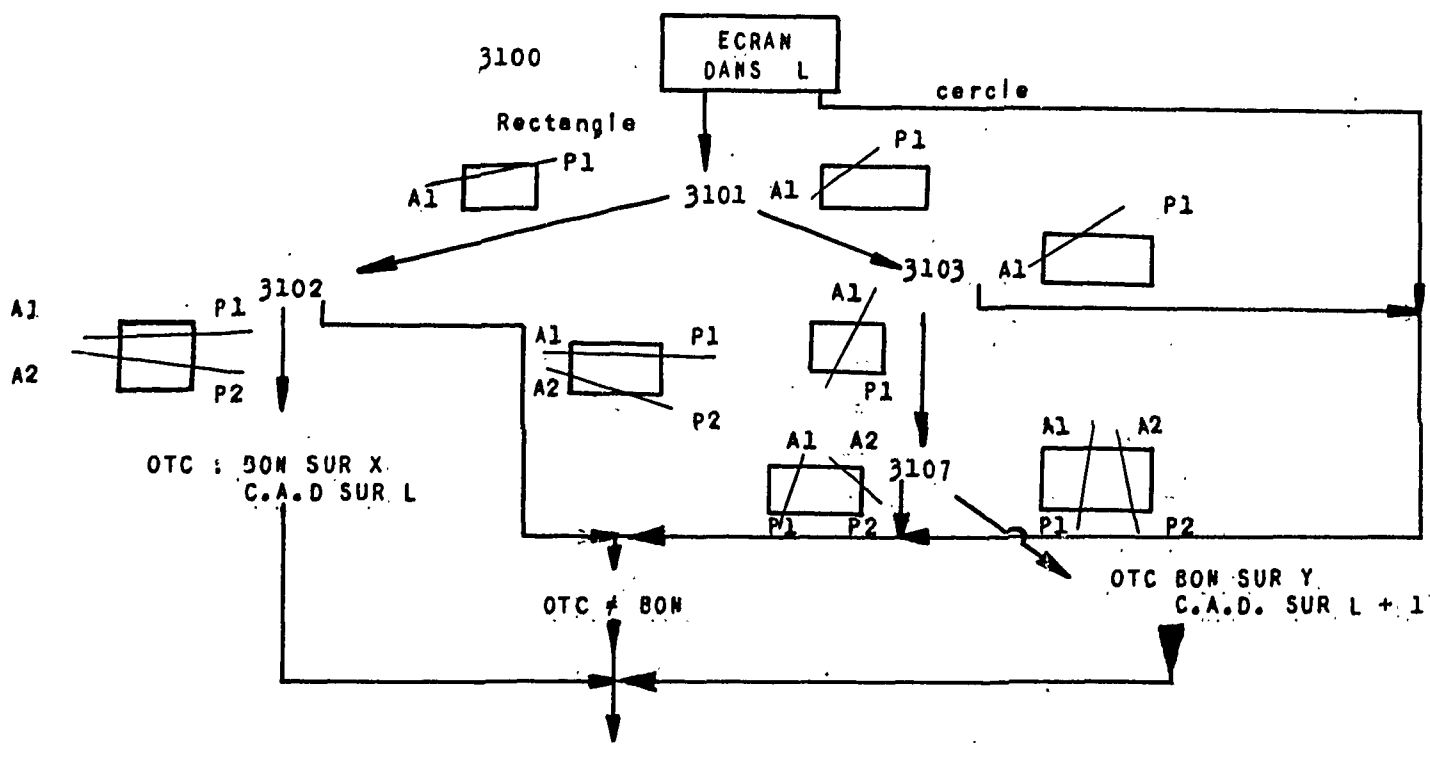
condition : $|Y - YE| \leqslant BE \Rightarrow$

$$\left| YA1 + \frac{(X-XA1)\,(YP1-YA1)}{XP1-XA1} - YE \right| \leqslant BE \Rightarrow$$

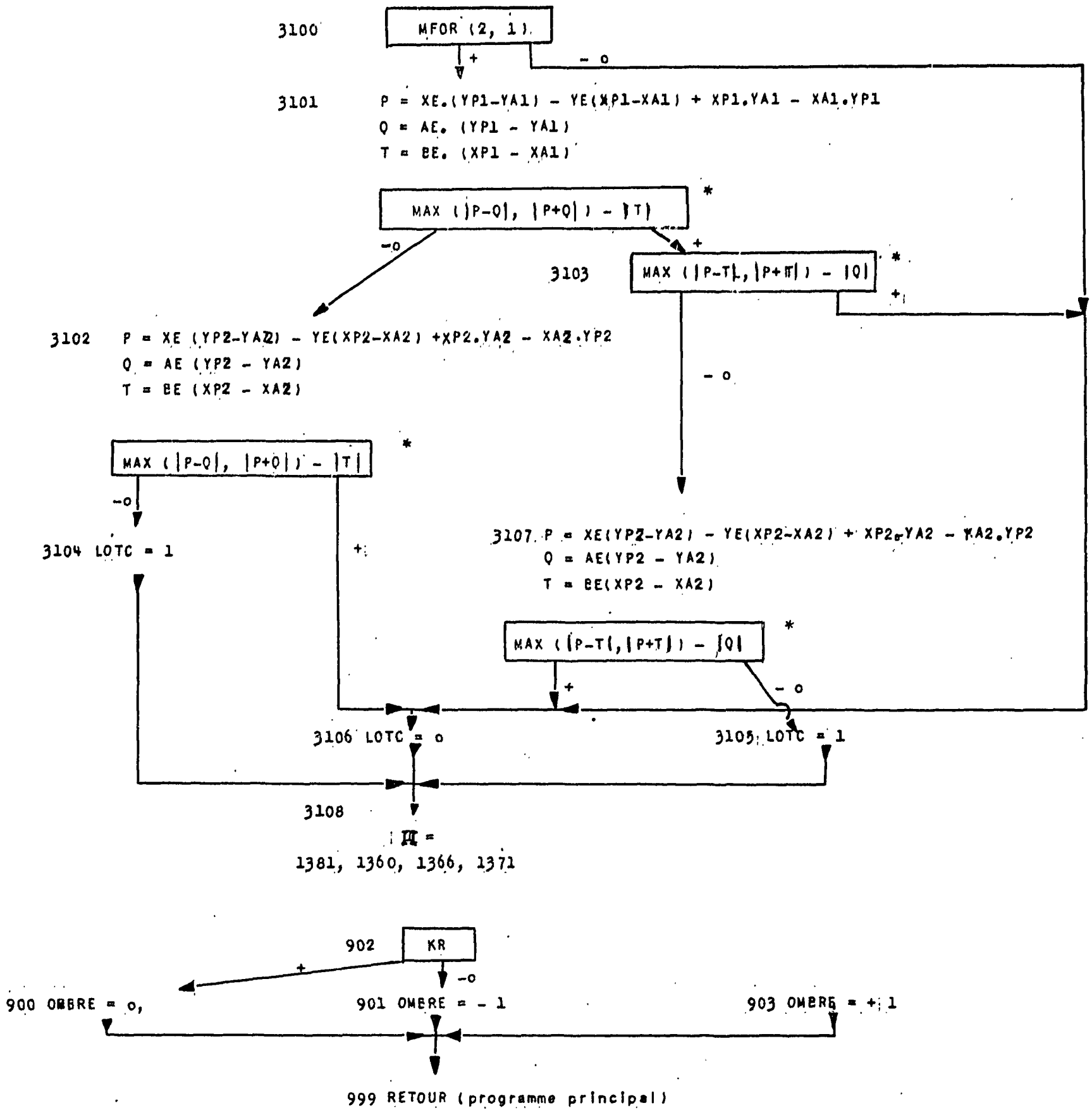
$$\left| (XP1-XA1)(YA1-YE) + (XE \pm AE - XA1)(YP1-YA1) \right| \leqslant BE \left| XP1-XA1 \right| \Rightarrow$$

$$\left| XE\,(YP1-YA1) - YE(XP1-XA1) + XP1 \cdot YA1 - XA1 \cdot YP1 \pm AE(YP1-YA1) \right| \leqslant BE \left| XP1-XA1 \right|$$

Remarques : La condition doit être réalisée pour les deux valeurs de X : $X = XE \pm AE$ si $XA1 - XP1 = 0$ il vient : $(YP1-YA1)(XE \pm AE - XP1) = 0$ qui ne peut être réalisé deux fois.



OMBRE TOTALE COMPLETE (O.T.C) (L)



FIN

A N N E X E I I I

PROGRAMME D'INTERACTION
SORTANT D'UNE TABULATRICE

```
CSEC043KEFFSPHERES CYLINDRES PLAQUES MINCES   NU ET SEMI REFLECHI
      DIMENSION X(500),K(501),Y(500),Z(500),YY(6) ,A(500),B(500),C(500),
     1R(500),EFFK(500)  ,AV(500)          ,AVV(500)        ,HHH(14),S(500),
     2AW(500),AWW(500),U(500)          ,W(9),          IY(1038)
     3,AM(100,100)
      COMMUN HHH,YY,X,Y,Z,A,B,C,R,XA,YA,ZA,AJ,BJ,CJ,RJ,AL,BL,CL,RL,AS,AM
B     HHH=607407033000
B     HHH(14)=616134606060
      P=12.5664
      APPEL CONTRL
      JY=1082
    4 LIRE54,(HHH(J),J=2,13)
      KL=0
      LCOMPT=0
      KAR=500
      IMPRIMER410
      IMPRIMER HHH
      USUITE=1.
      I=1
      APPEL PSLDE(UNITE,AMAX)
      APPEL PSLDM(AVEC,SANS)
      SI(AVEC-4HAVEC)13,59,13
13    I=0
59    U8=50.*UNITE
      U9=100.*UNITE
      IMPRIMER11,UNITE,AMAX     ,AVEC,SANS
12    IMPRIMER 15
      KM=500
      FAIRE5L=1,501
      S(L)=0.
 1008 APPEL PSLDI(K(L))
       SI(K(L))55,1005,55
 1005 APPEL PSLDM(ECRAN)
      SI(ECRAN-4HCONS)80,81,80
80    SI(ECRAN-3HVAR)82,83,82
82    SI(ECRAN-3HFIN)1007,1006,1007
1007  SI(ECRAN-5HECRAN)33,28,33
33    SI(ECRAN-5HARRET)14,17,14
14    SI(ECRAN-5HTOTAL)9,8,9
9     SI(ECRAN-5HSUITE)27,34,27
17    KAR=L-1
1009  IMPRIMER46,ECRAN
      ALLER A 1008
88    EFFK(L-502)=EFFK(L-502)+2
      ALLER A 1009
81    III=0
      APPEL PSLDF(HU,E)
      IMPRIMER88
      ALLER A 1008
83    III=1
      IMPRIMER89
      ALLER A 1008
28    KM=L-1
      III=-1
      ALLER A 1009

34    IMPRIMER35
      KL=1
B     DEBUT=1
      ALLER A 1008
   55 APPEL PSLDE(X(L),Y(L),Z(L),A(L),B(L),C(L),R(L))
      IMPRIMER3,K(L),X(L),Y(L),Z(L),A(L),B(L),C(L),R(L)
      X(L)=X(L)*U9
      Y(L)=Y(L)*U9
      Z(L)=Z(L)*U9
      R(L)=R(L)*U9
      A(L)=A(L)*U8
      B(L)=B(L)*U8
      C(L)=C(L)*U8
B     EFFK(L-501)=EFFK(L-501)+DEBUT
B     DEBUT=0
B     RLLL=R(L)+001000000000
21    SI(III) 5,57,56
56    APPEL PSLDE(W(5),W(6))
      ALLER A32
57    W(5)=HU
      W(6)=E
32    SI(RLLL)20,27,25
20    APPEL PSLDE(W(9))
      R(L)=-R(L)
      W(7)=1.
      ALLER A 24
37    APPEL PSLDE(W(2),W(3),W(4),W)
      SI(III)156,157,156
156   APPEL PSLDE(W(5),W(6))
157   IMPRIMER72,W(2),W(3),W(4),W(1)
      W(7)=0.
      W(2)=W(2)*U8
      W(3)=W(3)*U8
      W(4)=W(4)*U8
      W=W*U9
      APPEL UK(W)
      EFFK(L)=W(9)
      IMPRIMER79,W(5),W(6),EFFK(L)
      SI(W(6))71,87,71
 87   IMPRIMER86
      ALLER A 71
85    IMPRIMER86
      ALLER A 84
500   LCOMPT=LCOMPT+1
      IMPRIMER4000,LCOMPT
      ALLER A 5
2025  EFFK(L)=0.
      ALLER A 5
25    W(7)=0.
24    W=R(L)
      W(2)=A(L)
      APPEL UK(W)
      U(L)=(1.-W(8))
      EFFK(L)=W(9)
      IMPRIMER58,W(5),W(6),U(L),EFFK(L)
      SI(W(6))84,85,84
84    U(L)=U(L)/P
      SI(KL)70,500,70
70    USUITE=MIN1F(USUITE,U(L))
      SI(W(7))77,2025,77
77    LCOMPT=LCOMPT+1
      IMPRIMER4000,LCOMPT
      SI(EFFK(L))71,37,71
71    KL=0
B     EFFK(L-501)=EFFK(L-501)+10
      IMPRIMER36
      U(L)=USUITE
      USUITE=1.
5     CONTINUER
27    APPEL EXIT
143   SI(KL)2022,61,61
61    KJ=-1
      ASUITE=0.
      ALLER A 63
 1006 KMB=L-1
      IMPRIMER46,ECRAN
      KM=XMINOF(KM,KMB)
      KAR=XMINOF(KM,KAR)
      KK=(KM+9)/10
      KX=0
      JX=0
      SI DC AC 4,416
416   IMPRIMER 410
      Q=0.
      KL=-1
      LCOMPT=1
      FAIRE146L=1,KAR
      W=EFFK(L)*0.5+0.5
      AWW(L)=0.
      AVV(L)=0.
      SI(K L )74,47,47
B74   SI(EFFK(L-501)*00001)75,49,75
75    IMPRIMER 35
47    KL=1+KL
49    JCOMPT=0
      FAIRE142J=1,KM
      SI(J-L)7,143,7
7     X3=X(J)-X(L)
      Y3=Y(J)-Y(L)
      Z3=Z(J)-Z(L)
      ZA=ABSF(Z3)
      SI(I)705,704,705
 705  RR3=X3*X3+Y3*Y3
      R3=RACF(RR3)

      FAIRE700IX=1,KMB
      X2=X(IX)-X(L)
      Y2=Y(IX)-Y(L)
      RI=R(IX)+A(IX)+B(IX)
      XY2=X2*X2+Y2*Y2
      SI(RI*RI-XY2)701,702,702
 701  SI( ABSF(X2*Y3-Y2*X3)-RI*R3)703,700,700
 703  SI(X2*X3)706,706,707
 706  SI(Y2*Y3)700,700,707
 707  SI(R(IX)) 712,716,712
 712  SI(XY2-RR3)708,700,700
 716  SI(L-IX)714,700,714
 714  SI(IX-J)708,700,708
 708  SI(OMBRE(L,IX,J))713,700,709
713   JTABLE=XMODF(JTABLE,22)+1
      SI(JTABLE-1)249,249,250
249   JY=JY-88
      SI(JX-JY)250,700,700
250   JY=JY+2
      IY(JY-1)=K(IX)
      IY(JY)=K(J)
      ALLER A 700
709   AS=0.
      JX=       JX+2
      IY(JX-1)=K(IX)
      IY(JX)=K(J)
      ALLER A 1132
 702  SI(R(IX))715,716,715
 715  Z2=Z(IX)-Z(L)
      SI(Z2+XY2)710,700,710
 710  SI(Z3*Z2)700,700,711
 711  SI(ZA-ABSF(Z2))700,700,708
 700  CONTINUER
 704  XA=ABSF(X3)
      YA=ABSF(Y3)
      BJ=B(J)
      CJ=C(J)
      AL=A(L)
      BL=B(L)
      CL=C(L)
      AJ=A(J)
      RJ=R(J)
      RL=R(L)
      APPEL OMEGA
  132 SI DC AC 1003,1002
 1002 SI(6.-AS)1003,1132,1132
 1003 IMPRIMER1004,K(J),K(L),AS
      AS=0.
B1132 SI(EFFK(J-501)*00001)41,140,41
41    KJ=1
140   SI(KL)64,64,48
64    AV(J)=AS
62    SI(KJ)63,43,42
```

```
48      AV(J)=AV(J)+AS
        ALLER A 62
876     SI(EFFK(L-501)*00010)68,142,68
42      ASUITE=MAX1F(ASUITE,AV(J))
863     SI(EFFK(J-501)*00010)45,142,45
45      AV(J)=ASUITE
        KJ=0
        ASUITE=0.
43      SI(KL)68,76,76
68      AW(J)=U(J)*AV(J)
        S(J)=S(J)+AW(J)
         AWW(L)=AWW(L)+AW(J)
         AVV(L)=AV(J)+AVV(L)
2022    SI(JCOMPT-100)2001,142,2001
2001    JCOMPT=JCOMPT+1
        AM(LCOMPT,JCOMPT)=-AW(J)/W
  142   CONTINUER
        AV(L)=0.
        SI(KL)65,67,67
78      IMPRIMER44,K(L)
        ALLER A 69
867     SI(EFFK(L-501)*00010)66,78,66
66      KL=-1
        IMPRIMER410
65      AWWNU=1.-AWW(L)
        AW(L)=W
        AWW(L)=AW(L)/AWWNU
        AWWNU=EFFK(L)/AWWNU
        EFFK(L)=AW(L)
        SI(LCOMPT-100)2002,2002,2003
2002    AM(LCOMPT,LCOMPT)=AW(L)
2021    LCOMPT=LCOMPT+1
2003     Q=MAX1F(Q,AWW(L))
        SI(AVV(L)-AMAX)144,144,145
  144   SI(K(L))145,148,148
  145   LA=1
        LB=0
        KT=(KK+16)/17
        FAIRE414LKL=1,KT
        IMPRIMER404,K(L),AVV(L),AWWNU,AWW(L)
 809    SI(LKL-KT)2,1,2
2       KKT=17
        ALLER A 6
    1   KKT=KK-((KK-1)/17)*17
    6   FAIRE401N=1,KKT
        LB=XMINOF(LB+10,KM)
        IMPRIMER405,(K(LL),LL=LA,LB)
        IMPRIMER4051,(AVV(LL),LL=LA,LB)
        IMPRIMER4052,(AW(LL),LL=LA,LB)
401     LA=LA+10
        SI(LKL-KT)415,414,415
415     IMPRIMER410
414     CONTINUER

69      SI(JX)810,246,810
810     JZZ=0
        FAIRE300M=1,23
        N1=JZZ+1
        JZZ=JZZ+44
        JZ=XMINOF(JZZ,JX)
        N2=N1+1
        IMPRIMER812,(IY(LX),LX=N1,JZ,2)
        IMPRIMER811,(IY(LX),LX=N2,JZ,2)
        SI(JZ-JX)300,301,300
300     CONTINUER
301     JX=0
246     SI(JY-1082)814,147,814
814     JZ=1038
        FAIRE302M=1,23
        N1=JZ-43
        SI(N1-JY)247,247,248
247     JZ=XMINOF(JZ,JY)
248     N2=N1+1
        IMPRIMER815,(IY(LX),LX=N1,JZ ,2)
        IMPRIMER811,(IY(LX),LX=N2 ,JZ,2)
        SI(JZ-JY)302,303,302
302     JZ=JZ-44
303     JY=1082
        JTABLE=0
147     SI(KL)417,148,148
417     IMPRIMER 410
  406   MODELE(6H TOTAL)
8148    SI(EFFK(L-501)*2)601,146,601
601     VOYANT1
        ALLER A 600
 602    VOYANT0
  146   CONTINUER
  600   LA=1
        LB=0
        FAIRE403LKL=1,KT
        IMPRIMER HHH
        IMPRIMER 10,Q
        IMPRIMER406
        SI(LKL-KT)407,408,407
407     KKT=17
        ALLER A 409
  408   KKT=KK-((KK-1)/17)*17
409     FAIRE413N1=1,KKT
        LB=XMINOF(LB+10,KM)
        IMPRIMER405,(K(N),N=LA,LB)
        IMPRIMER4051,(AVV(N),N=LA,LB)
        IMPRIMER4053,(AWW(N),N=LA,LB)
413     LA=LA+10
403     IMPRIMER410
        SI(VOYANT1)602,2016
2016    Q=0.
        AS=0.

        FAIRE2023J=1,KAR
        SI(EFFK(J))2027,2023,2027
2027    AS=MAX1F(AS,(1.+S(J))/EFFK(J))
        S(J)=EFFK(J)/(1.-S(J))
2023    Q=MAX1F(Q,S(J))
        IMPRIMER HHH
        IMPRIMER2024,(S(J),J=1,KAR)
2024    MODELE(13H0KEFF. MAX. =/(10F12.8))
        IMPRIMER10,Q
        JCOMPT=LCOMPT-1
2017    FAIRE2004M=1,JCOMPT
        AM(M,M)=1./AM(M,M)-AS
2004    AV(M)=1.
        FAIRE2026LKL=1,3
        FAIRE2005LL=1,100
        FAIRE2006M=1,JCOMPT
        W=AM(M,1)*AV(1)
        FAIRE2007 N=2,JCOMPT
2007    W=AM(M, N)*AV( N)+W
2006    U(M)=W
        UMAX=U(1)
        JJ=1
        FAIRE2008J=2,JCOMPT
        SI(U(J)-UMAX)2009,2008,2008
2009    UMAX=U(J)
        JJ=J
2008    CONTINUER
        B(LL)=1./(UMAX/AV(JJ)+AS)
        K(LL)=JJ
2011    FAIRE2012M=1,JCOMPT
2012    AV(M)=U(M)/UMAX
2005    CONTINUER
        IMPRIMER2013,B(100),(B(LL),LL=1,100)
        IMPRIMER2014,(K(LL),LL=1,100)
        IMPRIMER2015,(AV(M),M=1,JCOMPT)
2026    CONTINUER
        SI DC AC 4,4
2013    MODELE(16H0VALEUR PROPRE = F9.5//(10F12.8))
2014    MODELE(27H0PLACE DE L ELEMENT CENTRAL//(10I12))
2015    MODELE(42H0VECTEUR PROPRE (REPARTITION DES NEUTRONS)//(10F12.8))
3       MODELE(1H I8,3F11.2, X,3F11.2,F11.3)
4000    MODELE(1H+I3)
   54   MODELE(12A6)
11      MODELE(8H0UNITE =F8.4,33H METRE * ANGLE SOLIDE DE SORTIE =F8.4,13H
       1 STERADIAN * A4,1H A6)
15      MODELE(1H0,15X,1HX10X,1HY10X,1HZ12X,1HA10X,1HB10X,1HC 9X,1HR7X,
       14HH/XT5X,1HE,7X,1HF8X,1HK//)
88      MODELE(19H H/X ET E CONSTANTS)
89      MODELE(19H H/X ET E VARIABLES)
46      MODELE(1H A6)
35      MODELE(6H SUITE)
79      MODELE(1H+86X,F8.1,F8.3,F17.4)
86      MODELE(1H+100X,2HPU)

72      MODELE(1H 40X,3F11.2,F13.3,F8.1,F8.3,F17.4)
58      MODELE(1H+86X,F8.1,F8.3,F9.5,F8.4)
36      MODELE(1H )
44      MODELE(8H ELEMENTI6//)
410     MODELE(1H1)
10      MODELE(34H0KEFF DE L ENSEMBLE PLUS PETIT QUE F10.6//)
815     MODELE(9H00.PAR.DE22I5)
404     MODELE(8H ELEMENTI6,F20.8,13H STERADIAN(S)5X,9HKEFF.NU =F11.8,5X13
       1HKEFF.SEMI-R.=F11.9//)
  812   MODELE(9H0OMBRE DE22I5)
  811   MODELE(1H 5X,3HSUR22I5)
1004    MODELE(15HANGLE SOLIDE DEI5,5H VERSI5,2H =F7.4,15H REMPLACE PAR 0/
       1/)
405     MODELE(1H I16,9I11)
4051    MODELE(10H ANG. SOL.10F11.8)
4052    MODELE(10H AS*F,K1/210F11.8)
4053    MODELE(10H KEFF MAX 10F11.8)
        FIN
```

```
      SOUS PROGRAMME UK(R)
      DIMENSION R(9)
      PI=3.14159265
      X=R(5)
      E=R(6)
      RR=R(2)+R(3)+R(4)
      SI(RR)9,10,9
9     SI(R)4,5,4
4     B1H=(PI/(RR+5.0))**2
      B2H=(PI/(RR+.72))**2
      B1R=(2.405/(R+2.5))**2
      B2R=(2.405/(R+.36))**2
      BT1=B1H+B1R
      BT2=B2H+B2R
      ALLER A 6
5     BT1=(PI/(2.*R(2)+5.))**2 +(PI/(2.*R(3)+5.0))**2+(PI/(2.*R(4)+5.0))
     1**2
      BT2=(PI/(2.*R(2)+.72))**2+(PI/(2.*R(3)+.72))**2+(PI/(2.*R(4)+.72))
     1**2
6     SI(E)12,11,12
12    GG=695.25*E+2.75
      G=GG/(GG+0.33  *X)
13    B=8.29-8.29*G
      R(8)=1./((1.+B*BT2)*(1.+BT1)*(1.+4.2*BT1)*(1.+20.16*BT1))
      SI(R(7))8,7,8
7     SI(E)14,15,14
14    S=24.5*X/(1.0001-E)
      ETA=1451.4*E/GG
      SI(S-1000.)1,1,2
    1 A=3.9*S**0.415
      ALLER A 3
    2 A=240.*EXPF(-1.2463*EXPF(-0.324*LOGF(0.001*S)))
    3 P=EXPF((E-1.)*A   /X/22.7115)
      R(9)=ETA*P*G*R(8)
8     RETOUR
1     BT1=(PI/(R+2.5))**2
      BT2=(PI/(R+.36))**2
      ALLER A 6
11    G=1065./(1065.+0.33*X)
      ALLER A 13
15    R(9)=2.03*G*R(8)
      ALLER A 8
      FIN


*     FAP
       ENTREE  ANGLEP
*FONCTION ANGLEP(X Y Z A B C)
       COMPT   150
ANGLEP SXD     *-2,4
       SXA     FIN,2
       SXA     R,1
       RST*    4,4
       AVF*    1,4
       SOR     AX
       RST*    5,4
       AVF*    2,4
       SOR     BY
       RST*    6,4
       AVF*    3,4
       SOR     CZ
       RAD*    4,4
       AVF*    1,4
       SOR     XA
       PRA
       MFL     XA
       SOR     XA
       RAD*    5,4
       AVF*    2,4
       SOR     YB
       PRA
       MFL     YB
       SOR     YB
       RAD*    6,4
       AVF*    3,4
       SOR     ZC
       PRA
       MFL     ZC
       SOR     ZC
       PXA     0,0
       SOR     ANGLE
       RAD     AX
       TSM     P
       TZE     P
       PRA
       MFL     AX
       SOR     D
       RAD     ZC
       SOR     D3-1
       SOR     D3-2
       RAD     YB
       SOR     D2-1
       SOR     D2-3
       RAD     BY
       SOR     E2
       RAD     CZ
       SOR     E3
       TSX     W,2
P      RAD     BY
       TSM     Q
```

```
        TZE     Q
        PRA
        MFL     BY
        SOR     D
        RAD     XA
        SOR     D3-1
        SOR     D3-2
        RAD     ZC
        SOR     D2-1
        SOR     D2-3
        RAD     CZ
        SOR     E2
        RAD     AX
        SOR     E3
        TSX     W,2
Q       RAD     CZ
        TSM     FIN-2
        TZE     FIN-2
        PRA
        MFL     CZ
        SOR     D
        RAD     YB
        SOR     03-1
        SOR     D3-2
        RAD     XA
        SOR     D2-1
        SOR     D2-3
        RAD     AX
        SOR     E2
        RAD     BY
        SOR     E3
        TSX     W,2
        RAD     ANGLE
        SST     F
FIN     EEX     **,2
R       EEX     **,1
        EDX     ANGLEP-2,4
        TRA     7,4
W       EMQ     E2
        MFL     E2
        SOR     D2-2
        SOR     D2-4
        EMQ     E3
        MFL     E3
        SOR     D3-3
        SOR     D3-4
        EEX     4,1
G       RAD     D
        AFL     D3,1
        SOR     (
        RAD     D
        AFL     D2,1
        PRA

        MFL     (
        SOR     (
        RAD     D3,1
        DFS     (
        MFL     D2,1
        ADD     F
        CHS
        AFL     H
        APPEL   ACOS
        SOR     A,1
        TIX     G,1,1
        RAD     E2
        TSP     *+11
        RAD     E3
        TSP     *+5
        RAD     A-2
        AFL     A-3
        AFL     A-4
        TRA     I
        RAD     A-2
        SFL     A-3
        SFL     A-4
        TRA     I
        RAD     E3
        TSP     *+5
        RST     A-2
        AFL     A-3
        SFL     A-4
        TRA     I
        RST     A-2
        SFL     A-3
        AFL     A-4
I       AFL     A-1
        AFL     ANGLE
        SOR     ANGLE
        TRA     1,2
(
D
F       OCT     001000000000
A       BTS     4
H       DEC     1.
AX
BY
CZ
XA
YB
ZC
ANGLE
D2      BTS     4
D3      BTS     4
E2
E3
        FIN
```

```
*       FAP
        COMPT 120
* FONCTION ANGLEC (D,Z,H,R)        AVEC  DISQUE
        ENTREE  ANGLEC
ANGLEC  RST* 3,4
        AVF* 2,4
        SOR D
        RAD* 1,4
        TZE *+2
        TSP G
        RAD B
        TSP K
        PXD
        TRA 5,4
K       SXD ANGLEC-2,4
        RAD* 4,4
        DFS B
        SRQ DA
        MFL DA
        AFL UN
        APPEL RAC
        SOR DA
        RST P1
        DFS DA
        PRA
        AFL PI
        TRA N
G       SXD  ANGLEC-2,4
        SOR D
        RAD* 3,4
        AVF* 2,4
        SOR A
        RAD* 4,4
        SOR R
        RAD D
        DFS R
        PRA
        AFL UN
        SOR     DR
        RAD     D
        DFS     A
        SRQ     DA
        MFL     DA
        AFL     UN
        TSX    $RAC,4
        PUN     *+2
        PZE     ANGLEC-2
        PRA
        MFL     DR
        SOR     DA
        RAD     UN
        DFS     DA
        PRA
        TSX    $ASIN,4
        PUN     *+2

        PZE     ANGLEC-2
        SOR     ANGLE
        RAD     B
        TZE     E
        RAD     D
        DFS     B
        SRQ     DA
        MFL     DA
        AFL     UN
        TSX    $RAC,4
        PUN     *+2
        PZE     ANGLEC-2
        PRA
        MFL     DR
        SOR     DA
        RAD     UN
        DFS     DA
        PRA
        TSX    $ASIN,4
        PUN     *+2
        PZE     ANGLEC-2
        EMQ     B
        DLG
        CHS
        AFL     ANGLE
F       ADD     =0001000000000
        EMQ B
        TQP M
N       EDX ANGLEC-2,4
        TRA 5,4
 E      RAD ANGLE
        ADD =0001000000000
        TRA N
M       SOR ANGLE
        MFL B
        SOR DA
        RAD R
        AFL D
        SOR DR
        PRA
        MFL D
        AFL DA
        SOR A
        EMQ DR
        MFL DR
        AFL DA
        APPEL RAC
        SOR DA
        RAD R
        DFS A
        MFL R
        DFS DA
```

```
        AFL UN
        APPEL RAC
        SOR A
        RST PI
        DFS A
        PRA
        AFL PI
        AFL ANGLE
        TRA N
PI      DEC 6.2831853
R
A       HTR
 B      HTR
 D      HTR
 DR     HTR
 DA     HTR
ANGLE   HTR
UN      DEC 1.
        FIN


*     FAP
*OMEGA      RECHERCHE DE L ANGLE SOLIDE MAXIMUM
        COMPT   600
        ENTREE  OMEGA
OMEGA   SXD     *-2,4
        RAD RJ
        TNZ A10
        RAD     CI
        EMQ     BI
        TQI     A17
        EMQ     AI
        TQI     A17
        TRA     A18
A17     RAD     BI
        EMQ     AI
        TQI     A14-1
A15     EMQ     CI
        SRQ     BI
        SOR     CI
        EMQ     CK
        RAD     BK
        SOR     CK
        SRQ     BK
        EMQ     YB
        RAD     ZB
        SOR     YB
        SRQ     ZB
        TRA     A18
A10     RAD     CI
        TNZ     A18
        RAD     BI
        TNZ     A15
        RAD     AI
        TZE     SVERS
        EMQ     CI
A14     RAD     AI
        SOR     CI
        SRQ     AI
        RAD     AK
        EMQ     CK
        SOR     CK
        SRQ     AK
        RAD     XB
        EMQ     ZB
        SOR     ZB
        SRQ     XB
A18     RAD RL
        TZE A20
        RAD ZB
        SFL CI
        SOR ZC
        RAD     CK
        TNZ     A24
        RAD     BK
        TNZ     *+5
        RAD AK
        TZE     VERSS
        RAD BK
        TZE A25
        SOR AK
        EMQ     YB
        RAD XB
        SOR YB
        SRQ     XB
        RAD     AI
        EMQ     BI
        SOR     BI
        SRQ     AI
A25     RAD RJ
        TZE     A229
A228    RAD     ZC              C VERS C PERP.
        TSP     *+2
        RME     ZC
        RAD     XB
        SFL     RJ
        SOR     XC
        CAM     AK
        TRA     AD
        TRA     *+3
        TSP     *+2
        RME     XC
        RAD     ZC
        TNZ     *+3
        RAD     YB
        TRA     AC
        PRA
        MFL     ZC
        SOR     ZD
        RAD     YB
        TNZ     *+3
        RAD     ZC
        TRA     AC
        PRA
        MFL     YB
        AFL     ZD
        APPEL   RAC
AC      SFL     RL
        SOR     D
        APPEL   ANGLEC,D,XC,AK,RL
        TRA     A132
AD      RAD     YB
        SFL     RJ
        TZE     *+7
        TSP     *+3
        RME     YC
        TRA     *+5
        SOR     YC
        PRA

        MFL     YC
        SOR     YC
        RME     AS
        RAD     ZB
        AFL     CI
        SOR     ZD
AE      RAD     YC
        TNZ     *+3
        RAD     ZC
        TRA     AF
        EMQ     ZC
        MFL     ZC
        AFL     YC
        APPEL   RAC
AF      SFL     RL
        SOR     D
        APPEL   ANGLFC,D,XC,AK,RL
        CAM     AS
        SOR     AS
        TRA     *+1
        RAD     ZC
        AFL     =10.
        SOR     ZC
        CAM     ZD
        TRA     A132+1
        TRA     AE
        TRA     AE
PI      DEC     -6.2831853
A229    RAD XB                  P VERS C PERP
        SFL AI
        TSP *+2
        PXA 0,0
        SOR XC
        RAD YB
        SFL BI
        TSP     *+5
        RAD ZC
        TSP     A
        PAX     ,0
        TRA A
        SOR YC
        PRA
        MFL YC
        SOR     YB
        EMQ ZC
        TQP *+3
        RAD YC
        TRA A
        MFL ZC
        AFL     YB
        APPEL   RAC
        SFL RL
        TSP *+2
```

```
        PXA 0,0
        SOR D
        APPEL   ANGLEC,D,XC,AK,RL
        SOR     AS
        RAD     AK
        CAM     RL
        TRA     A132+1
        TRA     A132+1
        SGM
        AFL     AI
        AFL     XB
        SOR     XD
        TSM     A132+1
        TZE     A132+1
        RAD     D
        TZE     A132+1
        RAD     AK
        CAM     XC
        SOR     XC
        TRA     *+1
AA      APPEL   ANGLEC,D,XD,AK,RL
        CAM     AS
        SOR     AS
        TRA     *+1
        RAD     XD
        SFL     =10.
        SOR     XD
        CAM     XC
        TRA     AA
        TRA     A132+1
        TRA     A132+1
A24     RAD RJ
        TZE A60
A259    RAD     YB              C VERS C //
        TNZ     *+3
        RAD     XB
        TRA     B
        PRA
        MFL     YB
        SOR     YC
        RAD     XB
        TNZ     *+3
        RAD     YB
        TRA     B
        PRA
        MFL     XB
        AFL     YC
        APPEL   RAC
B       SFL RJ
        SFL RL
        SOR D
        RAD ZC
        TSP     A64

        RME     ZC
A64     APPEL   ANGLEC,D,ZC,CK,RL
        SOR     AS
        RAD     ZC
        CAM     CK
        TRA     A65
        TRA     *+1
A66     RAD     CK
        CAM     RL
        TRA     A132+1
        TRA     A132+1
        RAD     CI
        AFL     ZB
        SOR     ZB
        CAM     CK
        TRA     *+3
        TRA     A132+1
        TRA     A132+1
        RAD     D
        TSM     A132+1
        TZE     A132+1
        RAD     ZC
        CAM     CK
        TRA     *+3
        TRA     *+2
        RAD     CK
        SOR     ZD
A67     APPEL   ANGLEC,D,ZB,CK,RL
        CAM     AS
        SOR     AS
        TRA     *+1
        RAD     ZB
        SFL     =10.
        SOR     ZB
        EMQ     ZD
        TQI     A67
        TRA     A132+1
A65     RAD     RJ
        ADD     =000100000000
        AFL     D
        SOR     XD
        RAD     D
        SOR     DD
A68     RAD     DD
        AFL     =5.
        SOR     DD
        CAM     XD
        TRA     A66
        TRA     *+1
        APPEL   ANGLEC,DD,ZC,CK,RL
        CAM     AS
        SOR     AS
        TRA     A68

        TRA     A68
A60     RAD     XB              P VERS C//
        SFL     AI
        TSP     *+6
        RAD     YB
        SFL     BI
        TSP     325A
        PXA     0,0
        TRA     325A
        SOR     XC
        PRA
        MFL     XC
        SOR     XD
        RAD     YB
        SFL     BI
        TSP     *+3
        RAD     XC
        TRA     325A
        SOR     YC
        PRA
        MFL     YC
        AFL     XD
        APPEL   RAC
325A    SFL     RL
        SOR     D
        RAD     ZC
        EMQ     CK
        TQI     A70
        TSP     *+2
        RME     ZC
        APPEL   ANGLEC,D,ZC,CK,RL
        TRA     A132
A70     RAD     XB
        AFL     AI
        SOR     XC
        PRA
        MFL     XC
        SOR     XC
        RAD     YB
        AFL     BI
        SOR     YB
        PRA
        MFL     YB
        AFL     XC
        APPEL   RAC
        SFL     RL
        SOR     DD
        RME     AS
327A    APPEL   ANGLEC,D,ZC,C
        CAM     AS
        SOR     AS
        TRA     *+1
        RAD     D

        AFL     =10.
        SOR     D
        CAM     DD
        TRA     A132+1
        TRA     327A
        TRA     327A
*       VERS P
A20     RAD CK
        EMQ     BK
        TQI     A79
        EMQ     AK
        TQI     A79
A280    RAD XB                  C ET. P VERS P //
        SFL AI
        SFL RJ
        TSP     *+2
        PXA     0,0
        SOR XB
        RAD YB
        SFL BI
        SFL RJ
        TSP     *+2
        PXA     0,0
        SOR YB
        RAD ZB
        SFL CI
        TSP     *+2
        PXA     0,0
        SOR D
        APPEL   ANGLEP,XB,YB,D,AK,BK,CK
        SOR     AS
        RAD     XB
        EMQ     AK
        TQI     *+5
        RAD     BK
        CAM     YB
        TRA     A132+1
        TRA     A132+1
        RAD     ZB
        AFL     CI
        SOR     DD
ABC     RAD     D
        AFL     =10.
        SOR     D
        EMQ     DD
        TQI     A132+1
        APPEL   ANGLEP,XB,YB,D,AK,BK,CK
        CAM     AS
        SOR     AS
        TRA     ABC
        TRA     ABC
A79     RAD ZB
        SFL CI
```

```
        TSP  *+2
        PXA      0,0
        SOR D
        RST      RJ
        TZE     A113
        AFL XB                  C VERS P PERP
        TSP      *+2
        PXA      0,0
        SOR XB
        RAD YB
        SFL RJ
        TSP      *+2
        PXA      0,0
        SOR YB
        APPEL    ANGLEP,XB,YB,D,AK,BK,CK
        TRA A132
A113    RAD      XB             P VERS P PERP
        SFL      AI
        TSP      *+2
        PXA      0,0
        SOR      XC
        RAD      YB
        SFL      BI
        TSP      *+2
        PXA      0,0
        SOR      YC
        APPEL    ANGLEP,XC,YC,D,AK,BK,CK
        SOR      AS
        RAD      D
        CAM      CK
        TRA      *+6
        TRA      *+1
        RAD      BK
        CAM      YC
        TRA      A132+1
        TRA      A132+1
        RAD      XB
        AFL      AI
        SOR      XB
AB      RAD      =10.
        AFL      XC
        SOR      XC
        CAM      XB
        TRA      A132+1
        TRA      *+1
        APPEL    ANGLEP,XC,YC,D,AK,BK,CK
        CAM      AS
        SOR      AS
        TRA      AB
        TRA      AB
ANGLES  RAD      RL
        DFS      D
        SRQ      D

        MFL      D
        SGM
        AFL      =1.
        APPEL    RAC
        SFL      =1.
        PRA
        MFL      PI
A132    SOR AS
        EDX      OMEGA-2,4
        TRA 1,4
VERSS   RAD      RJ
        TNZ      F
        RAD      XB             P VERS S
        SFL      AI
        TSP      *+2
        PAX      0,0
        TZE      *+4
        SOR      XB
        PRA
        MFL      XB
        SOR      XB
        RAD      YB
        SFL      BI
        TSP      *+2
        PXA      0,0
        TZE      *+4
        SOR      YB
        PRA
        MFL      YB
        AFL      XB-
        TNZ      *+5
        RAD      ZB
        SFL      CI
        SOR      D
        TRA      ANGLES
        SOR      YB
        RAD      ZB
        SFL      CI
        TSP      *+2
        PXA      0,0
        TZE      *+4
        SOR      ZB
        PRA
        MFL      ZB
        AFL      YB
        APPEL    RAC
        SOR      D
        TRA      ANGLES
F       RST      CI             C VFRS S
        AFL      ZB
        TSP      *+2
        PXA      0,0
        SOR      ZB
        RAD      XB
        TNZ      *+3
        RAD      YB
        TRA      HH
        PRA
        MFL      XB
        SOR      XC
        RAD      YB
        TNZ      *+3
        RAD      XB
        TRA      HH
        PRA
        MFL      YB
        AFL      XC
        APPEL    RAC
HH      SFL      RJ
        TSP      *+4
        RAD      ZB
        SOR      D
        TRA      ANGLES
        SOR      D
        RAD      ZB
        TZE      ANGLES
        PRA
        MFL      ZB
        SOR      ZB
        EMQ      D
        MFL      D
        AFL      ZB
        APPEL    RAC
        SOR      D
        TRA      ANGLES
SVERS   RAD      RL
        TNZ      G
        RAD      XB             S VERS P
        SFL      RJ
        TSM      *+2
        SOR      XB
        RAD      YB
        SFL      RJ
        TSM      *+2
        SOR      YB
        RAD      ZB
        SFL      RJ
        TSM      *+2
        SOR      ZB
        APPEL    ANGLEP,XB,YB,ZB,AK,BK,CK
        TRA      A132
G       RAD      CK
        TNZ      H
        RAD      BK
        TZE      I
        SOR      CK

        EMQ      YB
        RAD      ZB
        SOR      YB
        SRQ      ZB
        TRA      H
I       RAD      AK
        TZE      J
        SOR      CK
        RAD      ZB
        EMQ      XB
        SOR      XB
        SRQ      ZB
H       RAD      CK             S VERS C D AXE Z
        EMQ      ZB
        TQI      *+6
        PRA
        SFL      RJ
        TSP      *+2
        PXA      0,0
        SOR      ZB
        RAD      XB
        TNZ      *+3
        RAD      YB
        TRA      K
        PRA
        MFL      XB
        SOR      D
        RAD      YB
        TNZ      *+3
        RAD      XB
        TRA      K
        PRA
        MFL      YB
        AFL      D
        APPEL    RAC
K       SFL      RJ
        SFL      RL
        SOR      D
        APPEL    ANGLEC,D,ZB,CK,RL
        TRA      A132
J       EMQ      XB             S VERS S
        MFL      XB
        SOR      XB
        EMQ      YB
        MFL      YB
        SOR      YB
        EMQ      ZB
        MFL      ZB
        AFL      XB
        AFL      YB
        APPEL    RAC
        SFL      RJ
        SOR      D
```

```
        TRA     ANGLES
D
DD
ZC
XD
XC
YC
ZD
(((     COMMUN 3520
XB      COMMUN  1
YB      COMMUN  1
ZB      COMMUN  1
AI      COMMUN  1
BI      COMMUN  1
CI      COMMUN 1
RJ      COMMUN  1
AK      COMMUN  1
BK      COMMUN  1
CK      COMMUN  1
RL      COMMUN  1
AS      COMMUN  1
        FIN

      FONCTION OMBRE(N1,N2,N3)                                                  1
      DIMENSIONV(20),XP(500),YP(500),ZP(500),AP(500),BP(500),CP(500),
     1RP(500),X(3,3),A(3,3),R(3),MFOR(3,3),M(3,3),MOTC(3)
      COMMUNV,XP,YP,ZP,AP,BP,CP,RP
 1000 X(1,1)=XP(N1)                                                 DEFINIT.
      X(1,2)=YP(N1)
      X(1,3)=ZP(N1)
      A(1,1)=AP(N1)
      A(1,2)=BP(N1)
      A(1,3)=CP(N1)
      R(1)=RP(N1)
      X(2,1)=XP(N2)
      X(2,2)=YP(N2)
      X(2,3)=ZP(N2)
      A(2,1)=AP(N2)
      A(2,2)=BP(N2)
      A(2,3)=CP(N2)
      R(2)=RP(N2)
      X(3,1)=XP(N3)
      X(3,2)=YP(N3)
      X(3,3)=ZP(N3)
      A(3,1)=AP(N3)
      A(3,2)=BP(N3)
      A(3,3)=CP(N3)
      R(3)=RP(N3)
      OO=(MAX1F(ABSF(X(1,1)),ABSF(X(1,2)),ABSF(X(1,3)),ABSF(X(3,1)),
     1ABSF(X(3,2)),ABSF(X(3,3)))+MAX1F(A(1,1),A(1,2),A(1,3),A(2,1),
     2A(2,2),A(2,3),A(3,1),A(3,2),A(3,3)))/10.**6
      OO2=OO*OO*10.**6
      SI(R(2))1003,1003,1004
1003  KR=0
      ALLER A 1002
1004  KR=1
1002  FAIRE 1001 I=1,3                                                  F. FORME
      SI(R(I))1051,1051,1052
1051  FAIRE 1053 J=1,3
 1053 MFOR(I,J)=1
      ALLER A 1001
1052  SI(A(I,1)+A(I,2)+A(I,3))1055,1054,1055
 1054 FAIRE 1056 J=1,3
      MFOR(I,J)=0
 1056 A(I,J)=R(I)
      ALLER A 1001
 1055 SI(A(I,1))1057,1058,1057
 1057 MFOR(I,1)=1
      MFOR(I,2)=0
      MFOR(I,3)=1
      A(I,2)=R(I)
      A(I,3)=R(I)
      ALLER A 1001
 1058 SI(A(I,2))1059,1060,1059
 1059 MFOR(I,1)=1
      MFOR(I,2)=1
      MFOR(I,3)=0
      A(I,1)=R(I)
```

```
      A(I,3)=R(I)
      ALLER A 1001
 1060 MFOR(I,1)=0
      MFOR(I,2)=1
      MFOR(I,3)=1
      A(I,1)=R(I)
      A(I,2)=R(I)
 1001 CONTINUER
 1100 FAIRE 1101 J=1,3                                                  ELIM. ON
      SI(MAX1F(X(1,J)+A(1,J),X(3,J)+A(3,J))-X(2,J)+A(2,J)-00)900,900,1102
     12
 1102 SI(MIN1F(X(1,J)-A(1,J),X(3,J)-A(3,J))-X(2,J)-A(2,J)+00)1101,900,900
     10
 1101 CONTINUER
 1150 FAIRE 1154 J=1,3                                                  ELIM. OP
      UX1=X(1,J)-A(1,J)
      UX2=X(2,J)-A(2,J)
      UX3=X(3,J)-A(3,J)
      SI(ABSF(UX1-UX2)-00)1151,1152,1152
1151  SI(UX3-UX2+00)902,1160,1160
1152  SI(UX1-UX2)1153,1153,1160
1153  SI(UX3-UX2-00)902,902,1160
1160  VX1=X(1,J)+A(1,J)
      VX2=X(2,J)+A(2,J)
      VX3=X(3,J)+A(3,J)
      SI(ABSF(VX1-VX2)-00)1161,1162,1162
1161  SI(VX3-VX2-00)1154,1154,902
1162  SI(VX1-VX2)1154,1154,1163
1163  SI(VX3-VX2+00)1154,902,902
 1154 CONTINUER
 1170 X1=X(1,1)-X(2,1)                                                  CENTRES
      Y1=X(1,2)-X(2,2)                                                   ALIGNES
      Z1=X(1,3)-X(2,3)
      X3=X(3,1)-X(2,1)
      Y3=X(3,2)-X(2,2)
      Z3=X(3,3)-X(2,3)
      SI(ABSF(Y1*Z3-Y3*Z1)+ABSF(Z1*X3-X1*Z3)+ABSF(X1*Y3-Y1*X3)-002)1173,
     11173,1200
 1173 SI(R(2))1174,1174,1176
 1174 FAIRE 1175 J=1,3
      SI(A(2,J)-MAX1F(A(1,J),A(3,J)))1200,1175,1175
 1175 CONTINUER
      ALLER A 903
 1176 SI(MFOR(2,1)+MFOR(2,2)+MFOR(2,3))1171,1171,1184
 1171 MS=0
      FAIRE 1172 J=1,3
 1172 MS=MS+MFOR(1,J)+MFOR(3,J)
      SI(MS)1183,1183,1177
 1183 SI( R(2)-MAX1F(R(1),R(3)))1200,903,903
 1177 FAIRE 1178 J=1,3
      SI( 0.57735*R(2)-MAX1F(A(1,J),A(3,J)))1200,1178,1178
 1178 CONTINUER
      ALLER A 903


 1184 FAIRE1185 J=1,3
      SI(MFOR(1,J)+MFOR(3,J)-2*MFOR(2,J))1179,1185,1179
 1185 CONTINUER
      FAIRE 1186 J=1,3
      SI( A(2,J)-MAX1F(A(1,J),A(3,J)))1200,1186,1186
 1186 CONTINUER
      ALLER A 903
 1179 FAIRE 1187 J=1,3
      K=XMODF(J,3)+1
      L=XMODF(K,3)+1
      SI(MFOR(2,J))1180,1180,1187
 1187 CONTINUER
      ALLER A 1200
 1180 SI( 0.707107*R(2)-MAX1F(A(1,J),A(3,J)))1200,1181,1181
 1181 SI( 0.707107*R(2)-MAX1F(A(1,K),A(3,K)))1200,1182,1182
 1182 SI( A(2,L)-MAX1F(A(1,L),A(3,L)))1200,903,903
 1200 K=2                                                               INCLUS.
      JJ=1                                                               ECRAN
      SI(R(2))1201,1201,1204
 1201 FAIRE 1203 J=1,3
      I=1
      IMPOSER 1219 EN II
      ALLER A 1250
 1219 SI(LIK-1)1202,1202,1203
 1203 CONTINUER
      ALLER A 1300
 1202 I=3
      IMPOSER 1220 EN II
      ALLER A 1250
 1220 SI(LIK-11903,903,1300
 1204 SI(MFOR(2,1)+MFOR(2,2)+MFOR(2,3))1205,1205,1210
 1205 FAIRE 1208 J=1,3
      I=1
      IMPOSER 1221 EN II
      ALLER A 1250
 1221 SI(LIK-1)1206,1206,1208
 1206 I=3
      IMPOSER 1222 EN II
      ALLER A 1250
 1222 SI(LIK-1)1207,1207,1208
 1207 K=XMODF(J+1,3)+1
      SI((X(2,K)-X(1,K))*(X(2,K)-X(3,K)))903,900,900
 1208 CONTINUER
      FAIRE 1209 J=1,3
      A(2,J)=0.57735*R(2)
 1209 MFOR(2,J)=1
      R(2)=0.
      ALLER A 1100
 1210 FAIRE 1218 J=1,3
      I=1
      IMPOSER 1211 EN II
      ALLER A 1250
```

```
1226 SI(LIK-1)1216,1216,1218
1216 I=3
     IMPOSER 1227 EN II
     ALLER A 1250
1227 SI(LIK-1)1217,1217,1218
1217 K=XMODF(J+1,3)+1
     SI((X(2,K)-X(1,K))*(X(2,K)-X(3,K)))903,900,900
1223 ALLER A (1212,1214,1214,1213),LIK
1212 I=3
     IMPOSER 1224 EN II
     ALLER A 1250
1224 SI(LIK-1)903,903,1214
1213 I=3
     IMPOSER 1225 EN II
     ALLER A 1250
1225 SI(LIK-3)1214,1214,1218
1218 CONTINUER
     ALLER A 1300
1214 K=XMODF(J,3)+1
     A(2,J)=0.707107*R(2)
     A(2,K)=A(2,J)
     MFOR(2,J)=1
     R(2)=0.
     ALLER A 1100
1300 FAIRE 1323 J=1,3                                                  TAB. 9X9
     L=XMODF(J,3)+1
     NCAS=0
     SI(J-2)1301,1307,1313
1301 FAIRE 1306 I=1,3,2
     SI(ABSF(X(I,J)-X(2,J))-A(I,J)-A(2,J)+00)1303,1302,1302
1302 M(I,J)=0
     ALLER A 1306
1303 SI(ABSF(X(I,J)-X(2,J))+A(I,J)-A(2,J)-00)1304,1304,1305
1304 M(I,J)=1
     ALLER A 1306
1305 M(I,J)=2
1306 CONTINUER
1307 FAIRE 1312 I=1,3,2
     SI(ABSF(X(I,L)-X(2,L))-A(I,L)-A(2,L)+00)1309,1308,1308
1308 M(I,L)=0
     ALLER A 1312
1309 SI(ABSF(X(I,L)-X(2,L))+A(I,L)-A(2,L)-00)1310,1310,1311
1310 M(I,L)=1
     ALLER A 1312
1311 M(I,L)=2
1312 CONTINUER
1313 M1=M(1,J)+3*M(1,L)+1
     M3=M(3,J)+3*M(3,L)+1
     ALLER A (1314,1315,1316,1317,1318,1319,1320,1321,1323),M1
1314 ALLER A(1322,1328,1328,1327,1323,1323,1327,1323,1323),M3
1315 ALLER A(1328,1325,1328,1323,1325,1323,1323,1325,1323),M3
1316 ALLER A(1328,1328,1328,1323,1323,1323,1323,1323,1323),M3
1317 ALLER A(1327,1323,1323,1326,1323,1326,1327,1323,1323),M3
1318 ALLER A(1323,1325,1323,1323,1214,1326,1323,1325,1323),M3
1319 ALLER A(1323,1323,1323,1326,1326,1326,1323,1323,1323),M3
1320 ALLER A(1327,1323,1323,1327,1323,1323,1327,1323,1323),M3
1321 ALLER A(1323,1325,1323,1323,1325,1323,1323,1325,1323),M3
1322 NCAS=NCAS+1
     SI(NCAS-2)1323,1329,1329
1323 CONTINUER
     ALLER A 902
1325 J=L                                                               CAS 1
     ALLER A 1350
1326 J=XMODF(L,3)+1                                                     ...ET 2
1350 I=1
     K=3
     N=L
     JJ=0
     IMPOSER 1351 EN II
     ALLER A 1250
1351 SI(LIK-3)900,900,1352
1352 L=J
     IMPOSER 1353 EN II
     ALLER A 1600
1353 SI(LV)902,902,1354
1354 J=XMODF(N+1,3)+1
     SI(MFOR(2,J))1380,1380,903
1380 IMPOSER 1381 EN II
     ALLER A 3100
1381 SI(N-L)1383,1382,1383
1382 SI(LOTC)903,902,902
1383 SI(LOTC)902,902,903
1327 J1=XMODF(L,3)+1                                                   CAS 3
     J2=J
     ALLER A 1355
1328 J1=J                                                               ...ET 4
     J2=L
1355 J3=XMODF(J2,3)+1
     SI(MFOR(2,J3))1356,1356,1357
1356 J=J3
     ALLER A 1214
1357 L=J1
     IMPOSER 1358 EN II
     ALLER A 1600
1358 LW=LV
     SI(LW)1361,1361,1359
1359 IMPOSER 1360EN II
     ALLER A 3100
1360 LX=LOTC
1361 L=J2
     IMPOSER 1362 EN II
     ALLER A 1600
1362 SI(LV)902,902,1363
1363 SI(LW)902,902,1364
1364 SI(LX-1)1365,903,903
1365 IMPOSER 1366 EN II
```

```
      ALLER A 3100
 1366 SI(LOTC+1)903,903,902
 1329 MOTC(3)=0                                                    CAS 5
      MSOTS=0
      FAIRE 1372 L=1,3
      IMPOSER 1367 EN II
      ALLER A 1600
 1367 MSOTS=MSOTS+LV
      SI(MSOTS-2*L)1372,1368,1368
 1368 K=XMODF(L+1,3)+1
      SI(MOTC(K))1370,1370,1369
 1369 J=XMODF(L,3)+1
      SI(MFOR(2,J))1370,1370,903
 1370 IMPOSER 1371 EN II
      ALLER A 3100
 1371 MOTC(L)=LOTC
 1372 CONTINUER
 1373 SI(MSOTS-6)902,1374,1374
 1374 VOYANT0
      FAIRE 1376 L=1,3
      K=XMODF(L+1,3)+1
      SI((MOTC(K)-1)*(MOTC(L)+1))1376,1375,1376
 1375 J=XMODF(L,3)+1
      VOYANT1
      SI(MFOR(2,J))1376,1376,903
 1376 CONTINUER
      SI(VOYANT1)1214,902
 1250 L=XMODF(J,3)+1                                               INTER-
      SI(MFOR(I,J))1251,1251,1252                                   SECTION
 1251 XI=X(I,J)
      YI=X(I,L)
      XK=X(K,J)
      YK=X(K,L)
      RI=R(I)
      VOYANT 0
      SI(MFOR(K,J))1253,1253,1254
 1253 RK=R(K)
      ALLER A 2000
 1254 AK=A(K,J)
      BK=A(K,L)
      ALLER A 2100
 1252 XK=X(I,J)
      YK=X(I,L)
      XI=X(K,J)
      YI=X(K,L)
      AK=A(I,J)
      BK=A(I,L)
      VOYANT 1
      SI(MFOR(K,J))1255,1255,1256
 1255 RI=R(K)
      ALLER A 2100
 1256 AI=A(K,J)
      BI=A(K,L)

      ALLER A 2200
 1257 SI(VOYANT 1)1261,1262                                        INT. FIN
 1261 SI(LIK-2)1263,1264,1262
 1263 LIK=2
      ALLER A 1262
 1264 LIK=1
 1262 ALLER A II,(1219,1220,1221,1222,1211,1227,1224,1225,1351)
2000  SI((XI-XK)**2+(YI-YK)**2-(RI+RK)**2+002)2002,2001,2001       INT. CC
 2001 LIK=4
      ALLER A 1257
 2002 SI(JJ)2003,2009,2003
2003  SI((XI-XK)**2+(YI-YK)**2-(RI-RK)**2-002)2004,2004,2009
 2004 SI(RI-RK)2007,2007,2008
 2007 LIK=1
      ALLER A 1257
 2008 LIK=2
      ALLER A 1257
 2009 LIK=3
      ALLER A 1257
 2100 D=ABSF(XI-XK)                                                INT. CR
      E=ABSF(YI-YK)
      SI(D-AK-RI+00)2101,2001,2001
 2101 SI(E-BK-RI+00)2120,2001,2001
 2120 SI(JJ)2102,2121,2102
2102  SI(ABSF(D-AK)-00)2104,2115,2115
2115  SI(D-AK)2103,2103,2105
 2103 SI(MIN1F(AK,BK)-RI)2104,2106,2106
 2106 SI(D-AK+RI-00)2107,2107,2009
 2107 SI(E-BK+RI-00)2007,2007,2009
 2105 SI(E-BK-00)2104,2104,2108
 2108 SI((D-AK)**2+(E-BK)**2-RI**2+002)2104,2001,2001
 2104 SI((D+AK)**2+(E+BK)**2-RI**2-002)2008,2008,2009
 2121 SI(D-AK+00)2009,2122,2122
 2122 SI(E-BK+00)2009,2123,2123
 2123 SI((D-AK)**2+(E-BK)**2-RI**2+002)2009,2001,2001
 2200 D=ABSF(XI-XK)                                                INT. RR
      E=ABSF(YI-YK)
      SI(D-AI-AK+00)2201,2001,2001
 2201 SI(F-BI-BK+00)2216,2001,2001
 2216 SI(JJ)2009,2009,2202
 2202 SI(AI-AK)2203,2207,2210
 2203 SI(BI-BK)2204,2204,2009
 2204 SI(D-AK+AI-00)2205,2205,2009
 2205 SI(E-BK+BI-00)2007,2007,2009
 2207 SI(D)2009,2208,2009
 2208 SI(BI-BK)2205,2209,2212
 2209 SI(F)2009,2008,2009
 2210 SI(BI-BK)2009,2211,2211
 2211 SI(D-AI+AK-00)2212,2212,2009
 2212 SI(F-BI+BK-00)2008,2008,2009
 1600 LI=XMODF(L,3)+1                                              DEF. CA
      XE=X(2,L)
      YE=X(2,LI)
```

```
      AE=A(2,L)
      BE=A(2,LI)
      RE=R(2)
      SI(MFOR(2,L))1601,1601,1602
 1601 IMPOSER 3400 EN KK
      ALLER A 1603
 1602 IMPOSER 3500 EN KK
 1603 SI(MFOR(1,L))1604,1604,1605
 1604 I=1
      K=3
      SI(MFOR(3,L))3200,3200,3250
 1605 I=3
      K=1
      SI(MFOR(3,L))3250,3250,3300
3200  DD=RACF((X(K,L)-X(I,L))**2+(X(K,LI)-X(I,LI))**2)                  CA CC
      XX=(X(K,L)-X(I,L))/DD
      YY=(X(K,LI)-X(I,LI))/DD
      DR=R(I)-R(K)
      X1A=R(I)*DR/DD
      SI(DR)3202,3201,3202
3201  X1P=DD
      Y1A=R(I)
      Y1P=R(K)
      ALLER A 3203
3202  X1P=DD+R(K)*DR/DD
      DEL=RACF(1.-(DR/DD)**2)
      Y1A=R(I)*DEL
      Y1P=R(K)*DEL
3203  XA1=X(I,L)+X1A*XX-Y1A*YY
      XA2=XA1+2.*Y1A*YY
      XP1=X(I,L)+X1P*XX-Y1P*YY
      XP2=XP1+2.*Y1P*YY
      YA1=X(I,LI)+X1A*YY+Y1A*XX
      YA2=YA1-2.*Y1A*XX
      YP1=X(I,LI)+X1P*YY+Y1P*XX
      YP2=YP1-2.*Y1P*XX
      ALLER A KK,(3400,3500)
 3250 D=ABSF(X(I,L)-X(K,L))                                             CA CR
      E=ABSF(X(I,LI)-X(K,LI))
      SI(D+MIN1F(R(I),A(K,L))-MAX1F(R(I),A(K,L))-00)3252,3252,3251
 3251 YP1=X(K,LI)+A(K,LI)
      YP2=X(K,LI)-A(K,LI)
      SI(E+MIN1F(R(I),A(K,LI))-MAX1F(R(I),A(K,LI))-00)3254,3254,3253
 3253 SI((X(I,L)-X(K,L))*(X(I,LI)-X(K,LI)))3258,3257,3257
 3257 XP1=X(K,L)-A(K,L)
      XP2=X(K,L)+A(K,L)
      ALLER A 3263
 3258 XP1=X(K,L)+A(K,L)
      XP2=X(K,L)-A(K,L)
3263  PP=2.*RACF(A(K,L)**2+A(K,LI)**2)
      ALLER A 3270
 3254 SI((R(I)-A(K,LI))*(X(I,L)-X(K,L)))3261,3261,3262
 3261 XP1=X(K,L)+A(K,L)


      ALLER A 3264
 3262 XP1=X(K,L)-A(K,L)
 3264 XP2=XP1
      PP=2.*A(K,LI)
      ALLER A 3270
 3252 XP1=X(K,L)+A(K,L)
      XP2=X(K,L)-A(K,L)
      SI((R(I)-A(K,L))*(X(I,LI)-X(K,LI)))3266,3266,3267
 3266 YP1=X(K,LI)+A(K,LI)
      ALLER A 3268
 3267 YP1=X(K,LI)-A(K,LI)
 3268 YP2=YP1
      PP=2.*A(K,L)
3270  XX=(XP2-XP1)/PP
      YY=(YP2-YP1)/PP
      X0=(X(I,L)-XP1)*XX+(X(I,LI)-YP1)*YY
      Y0=-(X(I,L)-XP1)*YY+(X(I,LI)-YP1)*XX
      DEL=X0**2+Y0**2-R(I)**2
      X1=(X0*DEL-ABSF(Y0)*R(I)*RACF(DEL))/(X0**2+Y0**2)
      Y1=(DEL-X0*X1)/Y0
      X0=X0-PP
      DEL=X0**2+Y0**2-R(I)**2
      X2=(X0*DEL+ABSF(Y0)*R(I)*RACF(DEL))/(X0**2+Y0**2)
      Y2=(DEL-X0*X2)/Y0
      X2=X2+PP
      XA1=XP1+X1*XX-Y1*YY
      YA1=YP1+X1*YY+Y1*XX
      XA2=XP1+X2*XX-Y2*YY
      YA2=YP1+X2*YY+Y2*XX
      ALLER A KK,(3400,3500)
 3300 SI(ABSF(X(I,L)-X(K,L))+MIN1F(A(I,L),A(K,L))-MAX1F(A(I,L),A(K,L))  CA RP
     1-00)3302,3302,3301
 3301 YP1=X(K,LI)+A(K,LI)
      YA1=X(I,LI)+A(I,LI)
      YP2=X(K,LI)-A(K,LI)
      YA2=X(I,LI)-A(I,LI)
      SI(ABSF(X(I,LI)-X(K,LI))+MIN1F(A(I,LI),A(K,LI))-MAX1F(A(I,LI),A(K,
     1LI))+00)3304,3303,3303
 3303 SI((X(I,L)-X(K,L))*(X(I,LI)-X(K,LI)))3307,3308,3308
 3307 XP1=X(K,L)+A(K,L)
      XA1=X(I,L)+A(I,L)
      XP2=X(K,L)-A(K,L)
      XA2=X(I,L)-A(I,L)
      ALLER A KK,(3400,3500)
 3308 XP1=X(K,L)-A(K,L)
      XA1=X(I,L)-A(I,L)
      XP2=X(K,L)+A(K,L)
      XA2=X(I,L)+A(I,L)
      ALLER A KK,(3400,3500)
 3304 SI((A(I,LI)-A(K,LI))*(X(I,L)-X(K,L)))3311,3312,3312
 3311 XP1=X(K,L)+A(K,L)
      XA1=X(I,L)+A(I,L)
      ALLER A 3313
```

```
 3312 XP1=X(K,L)-A(K,L)
      XA1=X(I,L)-A(I,L)
 3313 XP2=XP1
      XA2=XA1
      ALLER A KK,(3400,3500)
 3302 XP1=X(K,L)+A(K,L)
      XA1=X(I,L)+A(I,L)
      XP2=X(K,L)-A(K,L)
      XA2=X(I,L)-A(I,L)
      SI((A(I,L)-A(K,L))*(X(I,LI)-X(K,LI)))3316,3316,3315
 3315 YP1=X(K,LI)-A(K,LI)
      YA1=X(I,LI)-A(I,LI)
      ALLER A 3317
 3316 YP1=X(K,LI)+A(K,LI)
      YA1=X(I,LI)+A(I,LI)
 3317 YP2=YP1
      YA2=YA1
      ALLER A KK,(3400,3500)
 3400 SI((XP1-XE)**2+(YP1-YE)**2-(RE*RE)-002)3405,3405,3402          TEST OTS
 3402 SI((XA1-XE)**2+(YA1-YE)**2-(RE*RE)-002)3405,3405,3403          OTS CERC
3403  SI(ABSF(XA1-XP1)-00)3404,3408,3408
 3404 SI(ABSF(XA1-XE)-RE-00)3406,3406,3401
 3406 SI(MAX1F(YA1,YP1)-YE)3401,3407,3407
 3407 SI(MIN1F(YA1,YP1)-YE)3405,3405,3401
 3408 OH=(XA1-XE)*(YA1-YP1)-(XA1-XP1)*(YA1-YE)
      UN=(XA1-XP1)**2+(YA1-YP1)**2
      SI(OH*OH/UN-RE**2-002)3409,3409,3401
 3409 SI(MAX1F(XA1,XP1)-(XE+(YA1-YP1)*OH/UN))3401,3410,3410
 3410 SI(MIN1F(XA1,XP1)-(XE+(YA1-YP1)*OH/UN))3405,3405,3401
 3401 MW1=-1
      ALLER A 3420
 3405 MW1=1
 3420 SI((XP2-XE)**2+(YP2-YE)**2-(RE*RE)-002)3548,3548,3422
 3422 SI((XA2-XE)**2+(YA2-YE)**2-(RE*RE)-002)3548,3548,3423
3423  SI(ABSF(XA2-XP2)-00)3424,3428,3428
 3424 SI(ABSF(XA2-XE)-RE-00)3426,3426,3549
 3426 SI(MAX1F(YA2,YP2)-YE)3549,3427,3427
 3427 SI(MIN1F(YA2,YP2)-YE)3548,3548,3549
 3428 OH=(XA2-XE)*(YA2-YP2)-(XA2-XP2)*(YA2-YE)
      UN=(XA2-XP2)**2+(YA2-YP2)**2
      SI(OH*OH/UN-RE**2-002)3429,3429,3549
 3429 SI(MAX1F(XA2,XP2)-(XE+(YA2-YP2)*OH/UN))3549,3430,3430
 3430 SI(MIN1F(XA2,XP2)-(XE+(YA2-YP2)*OH/UN))3548,3548,3549
 3500 SI(ABSF(XE-XP1)-AE-00)3501,3501,3502                           OTS RECT
 3501 SI(ABSF(YE-YP1)-BE-00)3518,3518,3502
 3502 SI(ABSF(XE-XA1)-AE-00)3503,3503,3504
 3503 SI(ABSF(YE-YA1)-BE-00)3518,3518,3504
3504  SI(ABSF(XA1-XP1)-00)3505,3514,3514
 3505 SI(ABSF(XE-XP1)-AE-00)3506,3506,3519
 3506 SI(MAX1F(YA1,YP1)-YE+BE)3519,3519,3507
 3507 SI(MIN1F(YA1,YP1)-YE-BE)3518,3519,3519
3514  SI(ABSF(YA1-YP1)-00)3509,3508,3508
 3509 SI(ABSF(YE-YP1)-BE-00)3510,3510,3519


 3510 SI(MAX1F(XA1,XP1)-XE+AE)3519,3519,3511
 3511 SI(MIN1F(XA1,XP1)-XE-AE)3518,3519,3519
3508  SI((YA1-YP1)*(XA1-XP1))3512,3512,3513
 3512 XX=((XP1-XA1)*((BE*XE)-(AF*YE))+(XP1*YA1-XA1*YP1)*AE)/((XP1-XA1)*
     1BE-(YP1-YA1)*AE)
      ALLER A 3515
 3513 XX=((XP1-XA1)*((BE*XE)+(AF*YE))-(XP1*YA1-XA1*YP1)*AE)/((XP1-XA1)*
     1BE+(YP1-YA1)*AE)
 3515 SI(ABSF(XX-XE)-AE-00)3516,3516,3519
 3516 SI(XX-MAX1F(XA1,XP1))3517,3519,3519
 3517 SI(XX-MIN1F(XA1,XP1))3519,3519,3518
 3518 MW1=1
      ALLER A 3530
 3519 MW1=-1
 3530 SI(ABSF(XE-XP2)-AE-00)3531,3531,3532
 3531 SI(ABSF(YE-YP2)-BE-00)3548,3548,3532
 3532 SI(ABSF(XE-XA2)-AE-00)3533,3533,3534
 3533 SI(ABSF(YE-YA2)-BE-00)3548,3548,3534
3534  SI(ABSF(XA2-XP2)-00)3535,3544,3544
 3535 SI(ABSF(XE-XP2)-AE-00)3536,3536,3549
 3536 SI(MAX1F(YA2,YP2)-YE+BE)3549,3549,3537
 3537 SI(MIN1F(YA2,YP2)-YE-BE)3548,3549,3549
3544  SI(ABSF(YA2-YP2)-00)3539,3538,3538
 3539 SI(ABSF(YE-YP2)-BE-00)3540,3540,3549
 3540 SI(MAX1F(XA2,XP2)-XE+AE)3549,3549,3541
 3541 SI(MIN1F(XA2,XP2)-XE-AE)3548,3549,3549
3538  SI((XA2-XP2)*(YA2-YP2))3542,3542,3543
 3542 XX=((XP2-XA2)*((BE*XE)-(AF*YE))+(XP2*YA2-XA2*YP2)*AE)/((XP2-XA2)*
     1BE-(YP2-YA2)*AE)
      ALLER A 3545
 3543 XX=((XP2-XA2)*((BE*XE)+(AF*YE))-(XP2*YA2-XA2*YP2)*AE)/((XP2-XA2)*
     1BE+(YP2-YA2)*AE)
 3545 SI(ABSF(XX-XE)-AE-00)3546,3546,3549
 3546 SI(XX-MAX1F(XA2,XP2))3547,3549,3549
 3547 SI(XX-MIN1F(XA2,XP2))3549,3549,3548
 3548 MW2=1
      ALLER A 3600
 3549 MW2=-1
 3600 LV=MW1+MW2                                                     OTS FIN
      SI(LV)3612,3611,3603
 3611 SI(KR)3603,3603,900
 3612 SI(KR)3601,3601,900
 3601 SI(((XE-XP1)*(YA1-YP1)-(XA1-XP1)*(YE-YP1))*((XE-XP2)*(YA2-YP2)-(XA
     12-XP2)*(YE-YP2)))3602,3602,900
 3602 SI(((XE-XP1)*(YP2-YP1)-(XP2-XP1)*(YE-YP1))*((XE-XA1)*(YA2-YA1)-(XA2
     12-XA1)*(YE-YA1)))3610,900,900
 3610 LV=0
 3603 ALLER A II,(1353,1358,1362,1367)
 3100 SI(MFOR(2,L))3106,3106,3101                                    TEST OTC
 3101 P =XE*(YP1-YA1)-YE*(XP1-XA1)+XP1*YA1-XA1*YP1
      Q=AE*(YP1-YA1)
      T=BE*(XP1-XA1)
      SI(MAX1F(ABSF(P-Q),ABSF(P+Q))-ABSF(T)-002)3102,3102,3103
```

```
3103 SI(MAX1F(ABSF(P-T),ABSF(P+T))-ABSF(Q)-OO2)3107,3107,3106
3102 P =XE*(YP2-YA2)-YE*(XP2-XA2)+XP2*YA2-XA2*YP2
     Q=AE*(YP2-YA2)
     T=BE*(XP2-XA2)
     SI(MAX1F(ABSF(P-Q),ABSF(P+Q))-ABSF(T)-OO2)3104,3104,3106
3107 P =XE*(YP2-YA2)-YE*(XP2-XA2)+XP2*YA2-XA2*YP2
     Q=AE*(YP2-YA2)
     T=BE*(XP2-XA2)
     SI(MAX1F(ABSF(P-T),ABSF(P+T))-ABSF(Q)-OO2)3105,3105,3106
3105 LOTC=1
     ALLER A 3108
3104 LOTC=-1
     ALLER A 3108
3106 LOTC=0
3108 ALLER A II,(1381,1360,1366,1371)
 900 OMBRE=0.                                                    CONCL.
     ALLER A 999
 902 SI(KR)901,901,900
 901 OMBRE=-1.
     ALLER A 999
 903 OMBRE=1.
 999 RETOUR
     FIN
```

```
*     DONNEES
EXEMPLE
0.01 0 AVEC OMBRE
0 CONS 50 0.03
1 -100 0 0 0 0 400 16
2 0 0 0 0 0 600 10
0 SUITE
3 100 0 0 0 0 100 15
4 100 0 75 0  0 50 15
5 100 0 -125 0 0 100 -15 0.6
6 50 -100 0 100 16 200 0
70 50 -43 50 0 0 600 17
7 100 100 0 200 0 0 16
0 ECRAN
8 -50 -100 0 20 210 600 0
0 FIN
```

EXEMPLE

UNITE = 0.0100 METRE * ANGLE SOLIDE DE SORTIE = C. STERADIAN * AVEC OMBRE

		X	Y	Z	A	B	C	R	H/XT	E	F	K
H/X ET E CONSTANTS												
1	1	-100.00	C.	0.	C.	0.	400.0C	16.000	50.0	0.030	0.36561	0.6457
2	2	0.	C.	0.	C.	0.	600.0C	10.000	50.0	C.030	0.59711	0.4100
SUITE												
	3	100.00	C.	0.	C.	0.	1C0.0C	15.000	50.0	0.030	0.43579	0.5742
	4	100.00	C.	75.00	C.	0.	50.0C	15.000	50.0	C.030	0.52521	0.4832
3	5	100.00	C.	-125.0C	0.	0.	1C0.0C	-15.000	50.0	0.030	0.43579	0.6000
4	6	50.00	-10C.C0	0.	100.0C	16.C0	200.0C	0.	50.0	0.030	0.46353	0.5460
5	70	50.00	-43.00	50.00	C.	C.	600.0C	17.000	50.0	C.030	0.33662	0.6752
6	7	100.00	10C.00	0.	2C0.C0	0.	0.	16.000	50.0	0.030	0.37530	C.6358
ECRAN												
	8	-50.00	-10C.CC	0.	2C.CC	21C.C0	6C0.0C	0.				

FIN

ELEMENT 1 1.31847286 STERADIAN(S) KEFF.NU = 0.68141748 KEFF.SEMI-R.= 0.86840023

	1	2	3	4	5	6	70	7
ANG. SOL.	0.	0.67005336	C.26443321	0.25830990	C.26443321	C.	0.	0.38398629
AS*F,K1/2	0.82282948	0.03183859	0.	0.	C.00917025	C.	0.	0.01146783

OMBRE DE 8 8
SUR 6 70

O.PAR.DE 8 8 8 8 8
SUR 2 3 4 5 7

ELEMENT 2 2.54085237 STERADIAN(S) KEFF.NU = 0.44481645 KEFF.SEMI-R.= 0.76480568

	1	2	3	4	5	6	70	7
ANG. SOL.	0.46336871	0.	0.45753479	0.45643231	0.45753479	0.42017025	0.81605983	0.38371879
AS*F,K1/2	0.01348143	0.70502329	0.	0.	C.01586680	C.01549867	0.02186002	0.01145984

O.PAR.DE 8
SUR 1

SUITE
ELEMENT 3

O.PAR.DE 8
SUR 1
ELEMENT 4

OMBRE DE 3
SUR 5

O.PAR.DE 8
SUR 1

ELEMENT 5 5.45285118 STERADIAN(S) KEFF.NU = 0.72915177 KEFF.SEMI-R.= 0.97220237

	1	2	3	4	5	6	70	7
ANG. SOL.	0.23275882	0.95157427	0.89539826	0.	C.	C.88588548	2.78166586	0.60096675
AS*F,K1/2	0.00677197	0.04521547	0.	0.	C.80000000	C.03267734	C.07451326	0.01794800

OMBRE DE 3
SUR 4

O.PAR.DE 8
SUR 1

ELEMENT 6 7.22932935 STERADIAN(S) KEFF.NU = 0.71535041 KEFF.SEMI-R.= 1.01275940

	1	2	3	4	5	6	70	7
ANG. SOL.	0.	1.40439038	1.55939828	1.41065399	1.55939828	C.	3.72388101	0.54165974
AS*F,K1/2	0.	0.06673171	0.	0.	C.05407821	C.77299941	0.09975263	0.01617678

OMBRE DE 8
SUR 1

ELEMENT 70 4.42328453 STERADIAN(S) KEFF.NU = 0.81356442 KEFF.SEMI-R.= 1.00927415

	1	2	3	4	5	6	70	7
ANG. SOL.	0.	1.22435111	1.35184538	1.35184538	1.35184538	1.40887737	0.	0.43821070
AS*F,K1/2	0.	0.05817688	0.	0.	C.04688051	C.05196875	0.83758311	0.01308725

OMBRE DE 8
SUR 1

ELEMENT 7 1.37356168 STERADIAN(S) KEFF.NU = 0.66889978 KEFF.SEMI-R.= 0.86047953

	1	2	3	4	5	6	70	7
ANG. SOL.	0.11951911	0.33155835	0.49128550	0.41409129	0.49128550	C.16471630	0.26648241	0.
AS*F,K1/2	0.00347733	0.01575449	0.	0.	C.01703724	C.00607583	0.00713833	0.81790023

O.PAR.DE 8
SUR 1

EXEMPLE

KEFF DE L ENSEMBLE PLUS PETIT QUE 1.012759

TOTAL

	1	2	3	4	5	6	70	7
ANG. SCL.	1.31847286	2.54085237	0.	0.	5.45285118	7.22932935	4.42328453	1.37356168
KEFF MAX	0.86840023	0.76480568	0.	0.	0.97220237	1.01275940	1.00927415	0.86047953

EXEMPLE

KEFF. MAX. =

0.84283048	0.90123831	0.	0.	0.93352487	0.86486598	1.05126840	0.87959476

KEFF DE L ENSEMBLE PLUS PETIT QUE 1.051268

VALEUR PROPRE = 0.93521

1.01275940	0.97380114	0.95829394	0.95030146	0.94568487	0.94277753	0.94082358	0.93944702	0.93844476	0.93769845
0.93713421	0.93670318	0.93637161	0.93611526	0.93591639	0.93576174	0.93564124	0.93554724	0.93547382	0.93541643
0.93537154	0.93533643	0.93530892	0.93528739	0.93527052	0.93525730	0.93524692	0.93523880	0.93523245	0.93522745
0.93522353	0.93522045	0.93521804	0.93521614	0.93521467	0.93521349	0.93521258	0.93521187	0.93521129	0.93521085
0.93521051	0.93521024	0.93521001	0.93520984	0.93520971	0.93520961	0.93520953	0.93520947	0.93520942	0.93520937
0.93520933	0.93520932	0.93520930	0.93520928	0.93520927	0.93520926	0.93520924	0.93520924	0.93520924	0.93520924
0.93520924	0.93520923	0.93520923	0.93520923	0.93520923	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520923	0.93520921
0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923
0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921
0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921

PLACE DE L ELEMENT CENTRAL

4	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

VECTEUR PROPRE (REPARTITION DES NEUTRONS)

0.14619236	0.22169711	0.83575764	0.94412271	1.00000000	0.24805263

VALEUR PROPRE = 0.93521

0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923
0.93520921	0.93520923	0.93520923	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520923	0.93520921
0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921
0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923
0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921
0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921
0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923
0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921
0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921
0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923

PLACE DE L ELEMENT CENTRAL

5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

VECTEUR PROPRE (REPARTITION DES NEUTRONS)

0.14619236	0.22169711	0.83575763	0.94412270	1.00000000	0.24805263

VALEUR PROPRE = 0.93521

0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921
0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921
0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923
0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921
0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921
0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923
0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921
0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921
0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923
0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921	0.93520921	0.93520923	0.93520921

PLACE DE L ELEMENT CENTRAL

5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5

VECTEUR PROPRE (REPARTITION DES NEUTRONS)

0.14619236	0.22169711	0.83575764	0.94412270	1.00000000	0.24805263

FIN