



(22) Date de dépôt/Filing Date: 2000/01/18

(41) Mise à la disp. pub./Open to Public Insp.: 2001/07/18

(51) Cl.Int.⁷/Int.Cl.⁷ G01R 31/308

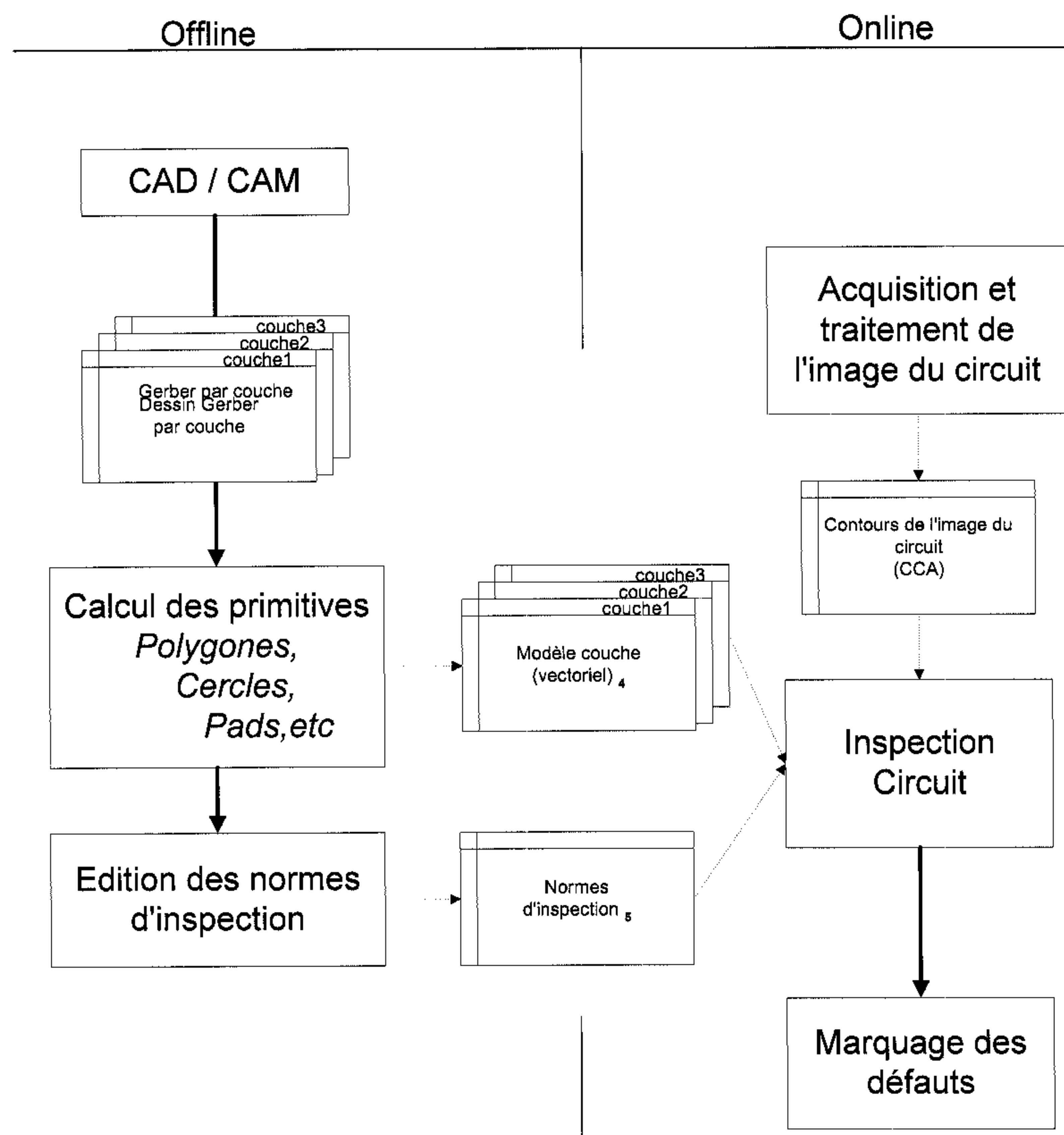
(71) Demandeur/Applicant:
9071 9410 QUEBEC INC., CA

(72) Inventeurs/Inventors:
COULOMBE, ALAIN, CA;
CANTIN, MICHEL, CA;
BÉRARD, LOUIS, CA

(74) Agent: GOUDREAU GAGE DUBUC

(54) Titre : SYSTEME D'INSPECTION OPTIQUE

(54) Title: OPTICAL INSPECTION SYSTEM



Définition du problème

Circuitpro est un système de vision qui permet l'inspection automatisée et en temps réel de plusieurs type de circuits électroniques. Les types de circuits ciblés sont les circuits hybrides, les circuits imprimés, les circuits laminés et les circuits sur « lead frame ». Ce nombre peut augmenter avec l'évolution technologique mais de façon générale chaque type comporte des éléments tels que conducteur (ou piste), trous, pads, diélectrique, couche de résistances, etc. De plus les circuits peuvent être fabriqués à partir d'une superposition de plusieurs couches comme par exemple la couche de conducteur, la couche de trou et la couche de glaze.

Normalement chacun de ces éléments est composé d'un seul matériel qui produit une teinte relativement uniforme. Les variations de teinte apparaissent alors aux contours des éléments là où il y a une transition entre 2 matériaux. De plus sur le circuit chaque élément a une forme et une position prévisible à l'intérieur d'une marge d'erreur étroite. Il est donc possible de prédire sur l'image des régions de changement de teinte correspondant aux contours des éléments. On peut aussi supposer qu'à l'intérieur d'une région d'un élément l'uniformité de teinte sera brisée uniquement en la présence d'un défaut.

Les défauts ciblés par Circuitpro **FIG 1** sont visibles et concernent principalement la largeur des traces, un désalignement exagéré entre les couches d'un circuit, une zone de recouvrement trop petite entre les éléments de différentes couches, un espacement trop petite entre deux éléments, la brisure d'un élément, un pont entre 2 conducteurs, une encoche ou une bavure sur un conducteur, un contaminant, etc. Tous ces défauts peuvent être inspectés en faisant une analyse des contours de l'image.

Il est fréquent que les produits actuels aient une dimension d'un ordre de grandeur 1000 ou 2000 fois supérieure à la dimension des défauts les plus petits. Par conséquent le système Circuitpro inspectera à une résolution considérable. Puisque le système doit s'intégrer à la chaîne de production, il doit effectuer un haut taux de pièces à l'heure. Le système devra traiter une grande quantité de données en un temps relativement cours. Il est donc nécessaire d'extraire sur l'image une information pertinente et compacte. De plus la méthode d'analyse doit être rapide.

Définitions

Mot	Définition
Piste	Conducteur sur un circuit
Pads	Coussinet sur le circuit où se dépose un tampon de soudure.
Inter piste	Région du circuit ne comprenant aucun élément. Elle est généralement constitué de céramique où de polymère. Cette région se trouve normalement entre les pistes du circuits mais peut aussi se trouver entre d'autre éléments tel entre une résistance et une piste.
Circuit laminé	
Lead frame	
8-connecté	2 pixels sont 8 connectés si les 2 pixels peuvent se trouver dans une même fenêtre de 3X3 pixels.
Détection sous-pixel	La détection de position par interpolation entre les pixels
Dessin CAO	Dessin du circuit fait par un système de conception assistée par ordinateur
Fichier Gerber	Format de fichier établit dans l'entreprise manufacturière pour contenir le dessin CAO
Modèle vectoriel	Représentation du dessin CAO dans un format constitué uniquement de polygones
Modèle multicouche	Modèle vectoriel de plusieurs couches alignées et superposées
CCA	Carte des Contours Actuelles : représentation de toutes les contours de la pièce actuelle. Les positions des contours sont calculés à une résolution supérieur à la résolution de l'image.
CCA _{image}	Représentation du CCA sur une image numérique. La résolution est équivalente à l'image initiale et est inférieure au CCA
CCC	Carte des Contours Caractéristiques : représentation de toutes les contours du modèle modèle multicouche.
CCC _{image}	Représentation du CCC sur une image numérique. La résolution est équivalente à l'image initiale.
CCE	Carte des contours excédentaires : représentation de tous les contours du CCA qui n'ont pas de correspondant sur le CCC.
CCM	Carte des contours manquants : représentation de toutes les contours du CCC qui n'ont pas de correspondant sur le CCA.

Sommaire

Circuitpro inspecte les circuits multicouches et vérifie que chaque élément répond aux règles de fabrication.

En premier lieu il s'agit de rechercher sur l'image une information pertinente et compacte sur laquelle basée l'inspection. Circuitpro identifie sur l'image des zones étroites où le signal de luminance varie de façon subite. Ces zones appelées arêtes et sont des transitions entre les différents matériaux. Ils correspondent donc au contours des éléments et sont à des endroits prévisibles. Si des arêtes surgissent là où elles ne doivent pas, il s'agit alors d'une anomalie de l'élément ou de la présence d'un corps étranger. En effet tous les défauts mentionnés plus haut produisent une arête qui dévie ou qui se détache des contours habituels. Si un contour se trouve à l'endroit prévu à plus ou moins une marge permise, alors toutes les normes de fabrication sont supposées être satisfaites. Dans le cas contraire par contre, le contour fautif n'implique pas nécessairement un défaut, il faut pour cela vérifier qu'il y a violation d'une des normes de fabrication. Les seuils de tolérance vis à vis les irrégularités du circuit dépendent beaucoup du contexte environnant ce qui nécessite un 2^e niveau d'analyse.

En considérant l'observation ci haut, la tâche d'inspection se résume d'abord à comparer les positions des contours par rapport à leurs positions prévues. Par exemple un contour devient suspect s'il diffère de sa position prévue sur le modèle Gerber du circuit **FIG 2**. Pour servir de référence le dessin Gerber est convertie en un modèle vectoriel où chaque élément est convertit en un polygone **FIG 3**. Même les éléments contenant des arcs de cercles **2** sont correctement représentés si les polygones à l'endroit de ces contours contiennent une série de vertex suffisamment rapprochés **3**. Dans la **FIG 4** le dessin Gerber **4** est utilisé pour construire le modèle de référence décrivant l'emplacement des contours. Le dessin Gerber est converti en format vectoriel où chaque élément est représenté par un polygone **5**. Le polygone en plus de décrire la position des contours s'avère un format efficace pour les opérations d'analyse subséquentes.

D'autre part, l'image du circuit en cours d'inspection est capturée par une caméra matricielle et est traitée pour extraire les contours du circuit **9**. Le modèle de référence et l'image sont ensuite alignés et comparés.

L'alignement prend en considération les effets de translation, de rotation, de changement d'échelle et de perspective qui existe sur l'image par rapport au dessin Gerber **4**. Dans le cas de circuits multicouches l'alignement se fait séparément sur chaque couche. La raison de cette procédure est que durant la fabrication chaque couche est appliquée à un moment différent et par une machine différente et a donc un alignement particulier sur le circuit. Il est alors préférable pour le système d'inspection de disposer d'un modèle vectoriel par couche **7**. L'ensemble de ces modèles est transmis au système d'inspection **11** qui reçoit aussi en même temps l'image des contours **10**. Le système d'inspection peut alors faire l'alignement de chaque couche, les superposer et ainsi obtenir le modèle pour l'image des contours. Après comparaison, les contours qui sont anormalement positionnés, excédentaires ou manquants s'avèrent être nécessairement des anomalies sur le circuit en cours d'inspection. Une deuxième analyse fait référence aux règles de fabrication **8** et détermine si une ou plusieurs anomalies sont considérées comme un défaut. Pour chaque défaut détecté un signal est envoyé à un système de marquage **12** pour que celui ci indique l'emplacement du défaut sur la pièce.

La phase d'inspection **FIG 5** reçoit simultanément un modèle vectoriel pour chaque couche **13** et les contours de l'image du circuit qui est appelé la Carte des Contours Actuelles CCA **15**. Des régions, préalablement identifiées sur l'image, servent à faire un alignement indépendant pour chaque couche **11**. Une fois alignée chaque couche est en accord avec le circuit concernant la translation, la rotation, la perspective et l'échelle. Les couches sont alors superposées **16** pour produire entre autre le modèle multicouche **17**.

Au niveau des éléments la superposition se fait par des fonctions d'intersection, d'union et de soustraction sur les polygones. Ces fonctions autorisent aussi durant la superposition, une identification de toutes les régions de recouvrement **21**. Les dimensions de ces régions vérifient si les différences d'alignement entre les couches n'excèdent pas les limites permises. Les mêmes fonctions autorisent aussi durant la superposition, de faire une identification de toutes les régions d'espacement étroites **24**. Celles ci peuvent contenir entre autres les régions en violation de l'espacement minimum causées par une différence d'alignement trop grande entre les couches. De plus les régions d'espacement étroites contiennent aussi les régions qui ne peuvent pas être inspectées de la façon conventionnelle. Parce qu'elles sont étroites, les défauts qui peuvent exister sont du même ordre de

grandeur que les erreurs d'alignement permis entre le modèle et l'image. La méthode conventionnelle ne peut donc pas fonctionner et il est nécessaire d'utiliser des méthodes d'inspection plus précises à l'intérieur de ces régions. En général les régions étroites occupent une superficie très faible sur l'ensemble du circuit et l'analyse particulière de ces régions n'enfreint pas le rendement du système.

Le modèle multicouche est un ensemble de polygones décrivant l'ensemble des éléments visibles après la superposition des couches. Les polygones décrivent des segments qui devraient correspondre aux contours de l'image. La procédure d'extraction des segments **18** restructure les polygones pour que les segments puissent être accessibles rapidement. Le résultat est la Carte des Contours Caractéristiques (CCC) **19**. Le CCC est donc la référence qui permet de valider chaque contour sur le CCA **15**. Le CCC et le CCA sont envoyés au module de détection des anomalies **20** pour faire la validation du CCA.

Un contour sur le CCA qui n'a pas de correspondant sur le CCC est considéré comme un contour excédentaire et est enregistré sur la Carte des Contours Excédentaires CCE **22**. Dans une autre perspective, dès qu'un tronçon de contour du CCA diffère trop du contour correspondant sur le CCC il est aussi considéré comme un contour excédentaire et est enregistré sur le CCE. Un contour sur le CCC qui n'a pas de correspondant sur le CCA est considéré comme un contour manquant et est enregistré sur la Carte des Contours Manquants CCM **23**. De même dès qu'un tronçon de contour du CCC diffère trop du contour correspondant sur le CCA il est aussi considéré comme un contour manquant et est enregistré sur le CCM. Par exemple une encoche **FIG 6** produit à la fois un contour excédentaire **29** et un contour manquant **28**.

Le CCE, le CCM et le modèle multicouche sont envoyés au module d'inspection des défauts **25**. Les normes de fabrication varient en fonction de la nature des régions d'un circuit. Une norme concerne généralement un seuil sur le pourcentage minimum de la largeur réelle d'une région par rapport à sa largeur nominale. Elles sont accessibles par le module d'inspection des défauts sous la forme d'une liste de normes **26**. Le modèle multicouche permet de savoir l'emplacement de chaque contour du CCE et du CCM sur le circuit et par conséquent de référer à la norme appropriée.

Les régions de recouvrements et les régions d'espacement étroites sont également inspectées par le module d'inspection des défauts. Dans leurs cas il y a 2 types de vérifications. Premièrement, le module vérifie les formes vectorielles de ces régions. Sachant que celles ci résultent de la superposition des couches, le module valide les différences d'alignement entre les couches. Une deuxième vérification est effectuée sur l'image au cas où la comparaison entre le CCC et le CCA auraient pu laisser passer des défauts dans ces régions cruciales.

Tous les défauts sont alors retournés au système de marquage **12** (**FIG 4**).

Description

Étapes 1 : Détection des arêtes

Le module de traitement d'images **FIG 7** effectue la détection des contours. Il dispose d'une image de 256 niveaux de gris **30**. La première phase consiste à effectuer une normalisation de la luminance. D'abord la luminosité moyenne est calculée dans la région du circuit préalablement établie comme étant la plus sombre ainsi que dans la région préalablement établie comme étant la plus claire **31**. Ces 2 valeurs moyennes sont respectivement identifiées comme étant LUM_MIN et LUM_MAX. La correction effectuée **32** consiste à redistribuer l'intensité lumineuse pour que la plage dynamique entre LUM_MIN et LUM_MAX couvre les 256 niveaux de gris. Pour chacun des pixels de l'image, la luminance est corrigée de la façon suivante.

$$\text{lum} = 256 \times (\text{lum} - \text{LUM_MIN}) / (\text{LUM_MAX} - \text{LUM_MIN})$$

Après la correction de luminosité, l'image est filtrée **33** pour réduire le bruit causé par la numérisation de l'image. Le filtre Gaussien utilisé est représenté sur une fenêtre de 3X3 de la façon suivante.

$$\begin{array}{ccc} 1 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 2 \end{array}$$

1 2 1

Par la suite, le gradient numérique est calculé **34** avec la méthode de Prewitt sur un voisinage de 3X3. Uniquement l'intensité du gradient est préservée dans une image de traitement. Les pixels de l'image sont comparés à un seuil pour identifier les pixels dans des zones de changement rapides de luminances **35**. Ces zones sont des traces de plusieurs pixels qui normalement chevauchent les contours des éléments. Les traces sont amincies par une technique de squelettisation **36** pour être une première estimation des contours des éléments **38**. Chaque contour est une chaîne de pixels qui sont connectées entre eux. C'est à dire que chaque pixel d'une même chaîne ont au moins un voisin dans un voisinage de 3 X 3 (8-connecté). La chaîne par contre à été amincie au maximum de sorte qu'elle forme une trace dont la largeur n'excède pas 1 pixel. À ce point ci les contours sont alors contenus dans une image d'une dimension identique à l'image initiale mais de format binaire **30**. L'image des contours est d'abord le point de départ de la procédure qui relocalise chaque point de contour au niveau du sous pixel **37**. Par la suite l'image des contours est, tout de même, préservée pour les analyses subséquentes. Elle est identifiée comme étant le CCA_{image} .

La procédure de relocalisation des contours **FIG 8** utilise l'image des contours **41** où en premier lieu elle fait une extraction des contours **40** dans des listes de points. Sur l'image chaque contour est une chaîne de pixels qui est identifiée et sauvegardée dans une liste de points **43**. L'ensemble des listes de points forme le CCA.

Pour extraire un contour **FIG 9**, la procédure suit les pixels qui sont connectés entre eux dans le sens anti horaire **47**. Au passage de chaque pixel, la procédure rapporte les coordonnées du pixel dans un même vecteur **48**. Lorsque la procédure termine d'extraire un contour, le vecteur contient la liste des points du contour.

Chaque contour est alors analysé point par point **FIG 8**. Pour chaque point, il s'agit de faire une estimation de la direction perpendiculaire au contour en ce point **42**. La direction perpendiculaire est un vecteur directionnel (n_x , n_y) sur le plan x,y. La procédure retourne alors sur l'image initiale en niveaux de gris **44** et calcule la dérivé deuxième sur plusieurs points selon la direction (n_x , n_y) sur une trajectoire partant 2 pixels avant le contour et se terminant 2 pixels après l'intersection du contour **45**. Elle dispose alors d'un vecteur de 5 ou 6 mesures estimant l'évolution de la dérivé seconde dans la direction (n_x , n_y). Le passage par zéro de la dérivé seconde correspond au point d'inflexion du profil de luminance au passage d'une transition entre 2 matériaux **FIG 10**. Puisque les contours actuels sont une estimation de la position de la transition entre 2 matériaux, la procédure suppose que les mesures effectuées de la deuxième dérivé chevauche le point d'inflexion du profil de luminance qui caractérise la position du contour entre 2 matériaux. Elle estime donc, au niveau du sous pixel, la position du passage par zéro sur les mesures de la deuxième dérivé **46**. La position calculée remet à jour la position initiale du point dans la CCA **41**.

Étapes 2 : Détection des anomalies

La deuxième étape identifie la présence ou non d'anomalie.

Méthode de calcul du CCC

La procédure fait d'abord l'alignement de chacune des couches. Pour chaque couche, elle connaît a priori les régions propices pour l'alignement. Elles sont normalement dans les extrémités de l'image et ne sont pas recouvertes par d'autres couches **FIG 11**. Les segments horizontaux et verticaux de ces régions retiennent l'attention. L'intersection des segments horizontaux et verticaux produit des points qui peuvent être mis en correspondance entre le modèle et l'image des contours **FIG 12**. Une fois la liste de points de correspondance établit, la procédure calcule la transformation qui permet au modèle de la couche de s'aligner avec l'image des contours. L'équation de transformation qui relie les coordonnées du système de la couche avec les coordonnées du système de l'image des contours est comme suit :

$$u = \frac{a_u \times x + b_u \times y + c_u}{dd \times x + ee \times y + 1}$$

$$v = \frac{a_v \times x + b_v \times y + c_v}{dd \times x + ee \times y + 1}$$

Où (u, v) sont les coordonnées dans le système de l'image des contours et (x, y) sont les coordonnées dans le système du modèle. L'équation de transformation compense à la fois les effets de rotation, de translation, d'échelle et de perspective entre l'image et le modèle. L'équation de transformation est calculée pour chacune des couches séparément.

Une fois l'alignement effectué pour chaque couche, il s'agit de faire la superposition des couches. Dans le modèle chaque couche est constituée d'une série de polygones. La superposition de 2 couches consiste alors à faire la superposition de chaque polygone de la première couche avec l'ensemble des polygones de l'autre couche. Si une troisième couche est superposée, il s'agit alors de superposer les polygones de la couche 3 avec les polygones résultant de la superposition de la couche 2 sur la couche 1.

Si la couche 1 contient le polygone 1, que la couche 2 contient le polygone 2 et que la couche 3 contient le polygone 3 (**FIG 13**) 49, la superposition consiste à superposer le polygone 3 sur le résultat de la superposition du polygone 2 sur le polygone 1. Pour la superposition de 2 sur 1 nous avons :

$$Pv1 = P1 - P2$$

$$Pv2 = P2$$

Après superposition de 2 sur 1, le polygone 2 reste intact, alors que le polygone 1 doit soustraire de sa forme la forme du polygone 2 qui le chevauche. La superposition 50 de 3 sur le résultat de 2 et 1 donne :

$$Pv1 = P1 - P2 - P3$$

$$Pv2 = P2 - P3$$

$$Pv3 = P3$$

Dans certains cas, la soustraction de 2 polygones produit plusieurs polygones disjoints. $Pv1$ et $Pv2$ doivent plutôt être interprétés comme des listes de polygones. Tel que vue plus tard $P1$, $P2$ et $P3$ sont aussi des listes de polygones lorsque les couches 1, 2 et 3 contiennent plusieurs polygones.

L'opération de superposition permet aussi de faire un suivi des régions de recouvrements 51. Un polygone représentant une région de recouvrement doit aussi être remis à jour après la superposition d'une nouvelle couche.

La région d'intersection entre le polygone 1 et 2 est :

$$O21 = (P1 \wedge P2)$$

Après la superposition de la couche 3 le polygone devient :

$$O21 = (P1 \wedge P2) - P3$$

Comme l'intersection de 2 polygones ainsi que la différence de 2 polygones peuvent produire plusieurs polygones, $O21$ doit être interprété comme une liste de polygones. La liste peut contenir 0 polygone si aucun polygone ne se chevauche entre la couche 1 et la couche 2.

De plus, l'opération de superposition permet aussi de faire un suivi des régions étroites. À la **FIG 14** la région $T31$ doit être identifiée 52. La région implique le polygone $P3$ et le polygone $Pv1$ qui est le résultat de la superposition du polygone $P2$ sur le polygone $P1$. La procédure dilate les polygones $Pv1$ et $P3$ 53 puis fait l'intersection des 2 polygones résultant 54 pour obtenir le polygone $D31$. La région $D31$ contient forcément la région $O31$ décrite plus haut. La procédure dilate la région $O31$ pour produire $D(O31)$ 55. Ensuite elle soustrait $D(O31)$ de $D31$ pour obtenir $T31$. L'opération est décrite par l'opération suivante :

$$T31 = (D(P3) \wedge D(Pv1)) - D(O31)$$

Ici encore $T31$ peut être interprété comme une liste de polygones pour 2 raisons. Premièrement l'intersection de 2 polygones peut produire une liste de polygones. Deuxièmement $D(O31)$ peut aussi être interprété comme une liste de polygones.

Puisque tous les résultats ci haut peuvent tous être interprété comme une liste de polygones il préférable de généraliser les opérations de superposition pour des listes de polygones.

La superposition des couches produit 3 résultats :

1. le modèle superposé ou multicouche qui est en fait la liste des polygones visibles Pv_k ,
2. la liste des polygones des régions de recouvrement O_k ,
3. la liste des polygones des régions d'espacement étroites T_k .

La procédure est itérative c'est à dire que chaque nouvelle couche est superposée avec Pv_k , O_k , T_k obtenues à partir de la superposition des couches précédentes. L'indice k indique combien de couches ont été superposées. Ainsi à la superposition d'une nouvelle liste de polygone P_{k+1} appartenant à la couche $k+1$, nous avons la remise à jour suivante :

$$Pv_{k+1} = (Pv_k - P_{k+1}) \cup P_{k+1},$$

$$O_{k+1} = (O_k - P_{k+1}) \cup (P_{k+1} \cap Pv_k)$$

$$T_{k+1} = (T_k - P_{k+1}) \cup ((D(P_{k+1}) \cap D(Pv_k)) - D(P_{k+1} \cap Pv_k))$$

Les opérations supportées sur les listes de polygone sont l'union, l'intersection, la différence et la dilatation. L'union consiste à regrouper dans une même liste, 2 listes de polygones. L'intersection de deux listes fait tour à tour l'intersection de chaque polygone de la liste 1 avec tous les polygones de la liste 2. De même la différence de 2 listes de polygones fait tour à tour la différence de chaque polygone de la liste 1 avec tous les polygones de la liste 2. **FIG 15** est un diagramme illustrant le mécanisme de superposition d'une nouvelle couche de polygones.

La liste des polygones visibles Pv_k décrit la totalité des contours qui devraient apparaître sur l'image. Chaque polygone est une série de vertex et chaque paire de vertex consécutif décrit un segment qui devrait produire un contour sur le CCA.

Par contre la liste Pv_k n'est pas dans un format approprié pour faire rapidement une comparaison avec le CCA. Chaque point du CCA doit être en correspondance avec au moins 1 segment d'un polygone de Pv_k . La liste Pv_k est transformée pour permettre cette correspondance rapidement. La transformation du format produit le CCC qui est en fait une liste similaire à Pv_k mais où chaque vertex des polygones est remplacé par le segment qu'il forme avec le vertex suivant. Les segments du CCC sont donc divisés en polygones tel que présenté sur la liste Pv_k mais où chaque polygone contient la description des segments qui le constitue plutôt que la description des vertex.

Chaque segment à son tour comprend l'équation d'une droite, les points de terminaison et un seuil de distance qui détermine l'éloignement maximum permis à ce segment.

Chaque polygone contient une description du rectangle englobant. Le rectangle est dilaté d'une valeur d'assurance pour garantir que chaque point du CCA qui est à l'extérieur du rectangle englobant ne peut pas correspondre à aucun des segments du polygone.

Détection des contours excédentaires.

La détection des contours excédentaires se fait au travers d'une procédure qui en premier lieu tente de faire correspondre chaque point du CCA avec au moins 1 segment du CCC. Le critère de correspondance est la distance du point au segment. Si la distance est inférieure au seuil spécifié, le point est considéré comme faisant partie du segment. Les points qui ne sont pas suffisamment rapproché d'aucun segment du CCC sont considérés comme des points excédentaires et sont enregistrés dans le CCE. Le CCE a le même format que le CCA, c'est à dire qu'il est une liste de contours où chaque contour est une liste de points.

La procédure débute sur le premier point du premier contour du CCA. Le CCC est parcourue jusqu'à ce que soit détecté un polygone dont le rectangle externe englobe ce point. Le polygone est parcourue jusqu'à détection d'un segment au quel peut correspondre ce point. Si aucun segment du polygone ne correspond, la procédure recherche un autre polygone dont le rectangle externe englobe le point. Dès qu'un segment est détecté, la procédure passe au point suivant mais conserve le même segment. En général puisque les points sont consécutifs, le même segment s'appliquera. Autrement la procédure passe au segment suivant dans le polygone.

Étant donné que la procédure circule dans le sens anti horaire autant sur le contour que sur le polygone il est très probable que le segment suivant dans le polygone s'avère être le prochain segment valide.

Dès qu'un point ne trouve aucun segment qui lui est proche, il est enregistré dans le CCE. Si le point fait partie d'une chaîne de points consécutifs qui n'ont trouvé aucun segment, le point est enregistré comme faisant partie d'un même contour que cette chaîne dans le CCE. Autrement le point débute un nouveau contour dans le CCE.

Quand la procédure termine, le CCE contient une liste de contours contenant chacun un ou plusieurs points. Si le CCE ne contient aucun contour il faut conclure qu'il n'y a aucun contour excédentaire.

Détection des contours manquants.

La détection des contours excédentaires implique aussi la détection des contours qui diverge trop de la position des contours sur la CCC. Pour les circuits de haute densité, la zone de déviation permise d'un contour est très étroite.

Mais puisque le CCC est un format vectoriel son niveau de résolution n'est pas limité par la résolution de l'image. De même la CCA a un niveau de résolution 7 ou 8 fois supérieure à la résolution de l'image puisque la CCA est construite après la détection des contours au sous pixel. Ainsi la résolution élevée du CCC et du CCA permet de faire une détection des contours divergeants même quand la zone de déviation maximale permise est très étroite.

La détection des contours manquants, par contre, n'est pas aussi contraignante en terme de précision.

Effectivement l'objectif est de savoir uniquement si un contour est absent. Les contours qui sont présents mais dont leurs positions divergent trop de leurs positions sur le modèle ne sont d'aucun intérêt ici puisqu'ils seront détectés sur la CCE.

La détection des contours manquants peut donc se faire à la résolution de l'image et par conséquent peut se faire en faisant une comparaison d'image.

Les contours de la CCC sont tracés sur une image binaire à la même résolution que l'image des contours pour produire la CCC_{image} . Par la suite elle est comparé au CCA_{image} FIG 16.

L'opération de comparaison du CCC_{image} et du CCA_{image} correspond à la formule suivante :

$$CCM = (Dilate(CCA_{image}) \otimes CCC_{image}) \cap CCC_{image}$$

Où CCA_{image} est l'image des contours et CCC_{image} est l'image des contours de la CCC.

Étapes 3 : Inspection des anomalies.

La dernière phase s'applique sur un nombre très réduit de régions sur l'image soit celles indiquées sur le CCE et le CCM. Cette phase utilise alors des méthodes d'analyse plus exhaustives qui ne sont pas limitées par la quantité de calcul. Une anomalie peut engendrer plusieurs contours du CCE mais chaque contour du CCE correspond à une seule anomalie. Pour simplifier la procédure d'analyse, il est préférable de considérer chaque contour du CCE comme une anomalie indépendante et de les analyser de façon séparée. Cette stratégie n'affectera pas la validité de l'inspection car toutes règles d'inspection s'avéreront vérifiées.

La procédure d'inspection identifie d'abord, grâce au modèle multicouche, la région qui se trouve affligée de l'anomalie. Il s'agira d'un élément du circuit tel un conducteur ou d'un espacement entre 2 éléments. La taille maximale permise d'une anomalie varie en fonction de la largeur de la région. Plus une anomalie se trouve dans une région étroite plus la dimension maximale permise sera réduite. La taille d'une anomalie importe dans le sens qu'elle réduit la largeur d'une région. En fait la procédure d'inspection mesure deux choses. La largeur résiduelle ou effective de la région affligée d'une anomalie et la largeur nominale de cette même région sur le modèle multicouche. Si le rapport entre les deux mesures est inférieur à un seuil alors l'anomalie implique un défaut.

Le ratio critique entre une largeur effective et la largeur nominale du modèle est défini par le manufacturier du circuit. Il est spécifié à l'intérieur des normes d'inspection et peut varier en fonction de la nature de la région affligée de l'anomalie. Une anomalie dans la région d'un trou peut référer à un ratio critique différent que pour une anomalie sur un conducteur. Pour cela le modèle multicouche contient la nature de l'élément que décrit chaque polygone. Il est ainsi possible de retrouver la norme appropriée pour chaque anomalie inspectée. En générale par contre un ratio limite de 50% s'applique presque de façon universelle.

La mesure de la largeur effective d'un élément où de l'espacement effectif entre 2 éléments peut paraître simple lorsque les figures géométriques impliquées sont des rectangles mais elle s'avère plus compliqué sur des polygones en générale.

Lorsqu'une encoche est produite sur un élément de forme rectangulaire, la mesure de la largeur effective s'avère simple **FIG 17**. Il s'agit de détecter l'endroit où l'encoche est la plus profonde et de détecter la distance de ce point jusqu'au côté opposé du rectangle **56**. Par contre cette mesure implique un grand nombre de suppositions qui ne sont pas nécessairement valides sur un polygone général. Ces suppositions sont :

1. l'encoche chevauche un seul segment du polygone,
2. un seul segment est opposé au segment du polygone qui contient l'encoche,
3. la direction où se mesure la largeur se trouve perpendiculaire au côté qui contient l'encoche.

De toutes évidences ces suppositions ne sont pas valides sur le polygone de **FIG 18** et implique que la procédure pour mesurer la largeur doit être plus générale.

Identification de la région affligée de l'anomalie

Chaque contour sur le CCE implique la présence d'une anomalie. Précédemment, il a été établi que chaque contour du CCE correspond à une chaîne de points consécutifs. Si le contour chevauchait un contour du CCC le contour serait brisé en 2. Par conséquent si n'importe quel point d'un contour du CCE se trouve sur un polygone du modèle multicouche alors tous le contour se trouve sur ce polygone. Si un seul point du contour CCE se trouve à résider sur aucun des polygones du modèle multicouche alors tout le contour ne réside sur aucun des polygones du modèle multicouche et l'anomalie sur trouve à résider sur un espacement entre 2 ou plusieurs polygones.

Un contour du CCE se trouve donc sur un seul élément ou sur aucun élément.

La procédure fonctionne comme suit :

1. *Elle prend le premier point du contour et identifie le polygone du modèle multicouche à l'intérieur duquel ce trouve ce point.*
2. *Si le point se trouve effectivement à l'intérieur d'un polygone alors l'élément affligé de l'anomalie est connue et l'analyse subséquente vérifie la règle de largeur minimum. De plus si le point appartient à un contour ouvert, l'anomalie est considérée comme une encoche dans l'élément. Autrement si le point appartient à un contour fermé l'anomalie est considérée comme un trou ou comme un corps étranger à l'intérieur de l'élément.*
3. *Si le point se trouve sur aucun polygone alors la région affligée de l'anomalie est une région d'espacement et l'analyse subséquente vérifie la règle d'espacement minimum. De plus si le point appartient à un contour ouvert, l'anomalie est considérée comme une bavure sur un élément voisin. Autrement si le point appartient à un contour fermé, l'anomalie est considérée comme un corps étranger dans la région d'espacement.*

Mesure de largeur effective d'un élément en considérant une encoche.

Si une anomalie réside sur un polygone du modèle multicouche et que le contour de la CCE est ouvert alors l'anomalie est considéré comme une encoche **FIG 18** et la procédure suivante vérifie si l'anomalie ne crée pas une violation de largeur minimum.

1. *La tangente est calculée à chaque point du contour 57.*
2. *Le contour se propage comme une onde sur l'eau. La direction de propagation en chaque point correspond à la perpendiculaire à la tangente. Le sens de la propagation se fait dans le sens du gradient maximum de la variation de luminance sur l'image en niveau de gris.*
3. *La propagation est itérative, chaque boucle correspond à un pas d'une distance de $\frac{1}{2}$ pixel. À chaque pas, chaque point du contour est placé sur le CCA_{image} sur le pixel qui lui est le plus rapproché.*
4. *Si un des points du contour en propagation chevauche où est voisin d'un pixel du CCA_{image} (voisin ici signifie 8-connecté), alors la procédure considère que le contour en propagation vient de faire contact avec un des contours opposés de l'élément.*
5. *Après détection d'un premier point de contact la propagation continue pour 8 autres itérations.*
6. *À chaque itération les points de contact détectés entre le contour en propagation et les contours du CCA_{image} sont enregistrés.*
7. *À la fin de la procédure itérative tous les points de contacts sont recalculés en sous pixel sur l'image en niveau de gris avec la même procédure que celle mentionnée plus haut.*
8. *Par la suite chacun des points de contact est projeté perpendiculairement sur la ligne de propagation qui la frappée.*
9. *La distance de chacun des points de contact sur leur ligne de propagation par rapport au point de départ est mesuré.*
10. *La distance minimale dans l'ensemble des distances correspond à la largeur effective de l'élément.*

La mesure de largeur obtenue est identifiée comme étant

Largeur_{Effective}

Mesure de largeur effective d'un élément en considérant un trou ou un contaminant.

Contrairement à une encoche, un trou ou un contaminant se caractérisent par un contour fermé FIG 19. La procédure suivante calcule la largeur effective en présence d'un trou ou d'un contaminant.

1. *La tangente est calculée à chaque point du contour 58.*
2. *Le contour se propage comme une onde sur l'eau. La direction de propagation en chaque point correspond à la perpendiculaire à la tangente. Le sens de la propagation se fait vers l'extérieur du contour fermé.*
3. *La propagation est itérative, chaque boucle correspond à un pas d'une distance de $\frac{1}{2}$ pixel. À chaque pas, chaque point du contour est placé sur le CCA_{image} sur le pixel qui lui est le plus rapproché.*
4. *Si un des points du contour en propagation chevauche où est voisin d'un pixel du CCA (voisin ici signifie 8-connecté), alors la procédure considère que le contour en propagation vient de faire contact avec un des contours de l'élément. À ce moment la direction de propagation du point qui a fait contact est identifié. Toutes les directions qui diffèrent de plus de 90° degrés ou de moins de -90° sont marquées comme ayant une direction opposée qui a fait contact 59.*
5. *Si un des points du contour en propagation fait contact et que la direction correspondante est marquée comme ayant une direction opposée qui a fait contact alors la procédure continue pour 8 autres itérations.*
6. *À chaque itération les points de contact détectés entre le contour en propagation et les contours du CCA sont enregistrés.*
7. *À la fin de la procédure itérative tous les points de contacts sont recalculés en sous pixel sur l'image en niveau de gris avec la même procédure que celle mentionnée plus haut.*

8. *Par la suite chacun des points de contact est projeté perpendiculairement sur la ligne de propagation qui la frappée.*
9. *La distance de chacun des points de contact sur leur ligne de propagation par rapport au point de départ est mesuré.*
10. *Pour chaque point de contact la distance calculée est additionnée à la distance minimale de tous les points de contact qui lui sont opposés. Cette distance cumulative est une mesure de largeur effective pour une paire de point de contact.*
11. *Le minimum de toutes les distances cumulatives est la mesure de largeur effective.*

À nouveau la mesure de largeur obtenue est identifiée comme étant :

*Larg eur*_{Effective}

Mesure de la largeur d'un élément sur le modèle multicouche

Par la suite la largeur effective de l'élément est comparée avec la largeur de cet élément sur le dessin CAO.

Comparativement au calcul sur un rectangle le calcul de la largeur sur un polygone général est plus complexe. En fait, la largeur ainsi que la direction selon laquelle elle se calcule, varient en fonction de l'endroit où on se situe dans le polygone. Une procédure valable pour calculer le polygone indépendamment de sa forme est de faire une érosion du polygone jusqu'à ce que les segments du polygone s'entrecroisent et forment une région de chevauchement **FIG 23**. Pour mesurer la largeur du polygone à un endroit particulier, il s'agit d'éroder le polygone jusqu'à ce que le point se trouve à l'intérieur d'une région de chevauchement. Pour mesurer la largeur d'un élément à l'endroit de l'anomalie, il s'agit de mesurer la largeur à chaque point du contour du CCE et à prendre la largeur mesurer la plus petite.

Nécessairement le point où la largeur est la plus petite se trouve nécessairement à être le premier point à être dans une région de chevauchement. La procédure consiste donc à éroder successivement le polygone jusqu'à ce que un des points du contour du CCE se trouve dans une région de chevauchement.

Le calcul de la largeur à chaque point du contour du CCE se fait par la procédure suivante:

1. *L'érosion du polygone **FIG 22** se fait par une procédure itérative où à chaque boucle les segments se dirigent vers l'intérieur du polygone d'un pas de déplacement équivalent au niveau de précision que l'on désire obtenir dans la mesure. Au départ chaque point de contour a une mesure de largeur qui est à zéro.*
2. *À chaque itération, la procédure vérifie chaque point du contour à savoir si le point est dans le polygone, à l'extérieur ou dans une région de chevauchement.*
3. *Si un point de contour se trouve dans le polygone, la mesure de largeur est additionnée de 2 fois le pas d'érosion du polygone.*
4. *Si un point se trouve à l'extérieur du polygone, un des cotés du polygone est passé par dessus le point et la mesure de largeur est additionnée de 1 fois le pas d'érosion du polygone.*
5. *Dès qu'un point se trouve dans une région de chevauchement alors la procédure se termine et la mesure de largeur en ce point est la largeur du polygone.*

La mesure de largeur obtenue est identifiée comme étant

*Larg eur*_{CAO}

Vérification de la règle de la largeur minimum

Les règles d'inspection établissent le ratio entre la largeur du polygone et la largeur effective du polygone. Le ratio est identifié comme étant :

$$Ratio_{Largeur\ minimum}$$

Une encoche, un trou ou un contaminant produit un défaut si :

$$\frac{Largeur_{Effective}}{Largeur_{CAO}} \leq Ratio_{Largeur\ minimum}$$

Mesure de l'espacement effectif entre élément en considérant une bavure

Si un contour du CCE ne réside sur aucun des polygones du modèle multicouche et que le contour est ouvert alors l'anomalie est considérée comme une bavure **FIG 20** et la procédure suivante s'exécute pour vérifier si l'anomalie ne crée pas une violation de l'espacement minimum.

1. La tangente est calculée à chaque point du contour 60.
2. Le contour se propage comme une onde sur l'eau. La direction de propagation en chaque point correspond à la perpendiculaire à la tangente. Le sens de la propagation se fait dans le sens inverse du gradient maximum de la variation de luminance sur l'image en niveau de gris.
3. La propagation est itérative, chaque boucle correspond à un pas d'une distance de $\frac{1}{2}$ pixel. À chaque pas, chaque point du contour est placé sur le CCA_{image} sur le pixel qui lui est le plus rapproché.
4. Si un des points du contour en propagation chevauche ou est voisin d'un pixel du CCA_{image} (voisin ici signifie 8-connecté), alors la procédure considère que le contour en propagation vient de faire contact avec le contour d'un élément voisin.
5. Après détection d'un premier point de contact la propagation continue pour un minimum de 8 autres itérations.
6. À chaque itération les points de contact détectés entre le contour en propagation et les contours du CCA_{image} sont enregistrés.
7. À la fin de la procédure itérative tous les points de contacts sont recalculés en sous pixel sur l'image en niveau de gris avec la même procédure que celle mentionnée plus haut.
8. Par la suite chacun des points de contact est projeté perpendiculairement sur la ligne de propagation qui la frappée.
9. La distance de chacun des points de contact sur leur ligne de propagation par rapport au point de départ est mesuré.
10. La distance minimale dans l'ensemble des distances correspond à l'espacement effectif à l'endroit de l'anomalie.

La mesure de largeur obtenue est identifiée comme étant

Espacement_{Effectif}

Mesure de l'espacement effectif entre élément en considérant un contaminant

Contrairement à une bavure un contaminant se caractérisent par un contour fermé **FIG 21**. La procédure suivante calcule l'espacement effectif en présence d'un contaminant.

1. La tangente est calculée à chaque point du contour **61**.
2. Le contour se propage comme une onde sur l'eau. La direction de propagation en chaque point correspond à la perpendiculaire à la tangente. Le sens de la propagation se fait vers l'extérieur du contour fermé.
3. La propagation est itérative, chaque boucle correspond à un pas d'une distance de $\frac{1}{2}$ pixel. À chaque pas, chaque point du contour est placé sur le CCA_{image} sur le pixel qui lui est le plus rapproché.
4. Si un des points du contour en propagation chevauche où est voisin d'un pixel du CCA_{image} (voisin ici signifie 8-connecté), alors la procédure considère que le contour en propagation vient de faire contact avec le contour d'un élément voisin. À ce moment la direction de propagation du point qui a fait contact est identifié. Toutes les directions qui diffèrent de plus de 90° degrés ou de moins de -90° sont marquées comme ayant une direction opposée qui a fait contact **xx**.
5. Après détection d'un premier point de contact et que la direction correspondante est marquée comme ayant une direction opposée qui a fait contact alors la propagation continue pour un minimum de 8 autres itérations
6. À chaque itération les points de contact détectés entre le contour en propagation et les contours du CCA sont enregistrés.
7. À la fin de la procédure itérative tous les points de contacts sont recalculés en sous pixel sur l'image en niveau de gris.
8. Par la suite chacun des points de contact est projeté perpendiculairement sur la ligne de propagation qui la frappée.
9. La distance de chacun des points de contact sur leur ligne de propagation par rapport au point de départ est mesuré.
10. Pour chaque point de contact la distance calculée est additionnée à la distance minimale de tous les points de contact qui lui sont opposés. Cette distance cumulative est une mesure d'espacement effectif pour une paire de point de contact.
11. L'espacement minimal dans l'ensemble des espacements mesurés correspond à l'espacement effectif à cet endroit.

La mesure de largeur obtenue est identifiée comme étant

Espacement_{Effectif}

Mesure de l'espacement sur le modèle multicouche

La mesure d'espacement sur le dessin CAO dépend du point où l'on se trouve. Pour mesurer l'espacement à l'endroit de l'anomalie, il s'agit de calculer l'espacement à chaque point du contour de l'anomalie. L'espacement effectif est la mesure d'espacement minimum obtenue sur l'ensemble des mesures d'espacement.

La procédure suivante s'applique.

1. Des polygones sont choisis comme faisant partie du voisinage de l'anomalie et sont considérés comme candidat pour créer une violation de la règle d'espacement.
2. Les polygones sont dilatés de façon vectorielle **FIG 24**. La dilatation d'un polygone se fait par une procédure itérative où à chaque boucle les segments se dirigent vers l'extérieur du polygone d'un pas de déplacement équivalent au niveau de précision que l'on désire obtenir dans la mesure.
3. Pour chaque point du contour de l'anomalie, une mesure d'espacement est mise à zéro.
4. À chaque itération, la procédure détermine pour chaque point du contour si le point est recouvert par un polygone ou si le point est recouvert par 2 ou plusieurs polygones ou si le point est recouvert par aucun polygone.
5. Si un point de contour est recouvert par aucun polygone, la mesure d'espacement est additionnée de 2 fois le pas de dilatation du polygone.
6. Si un point est recouvert par un polygone, la mesure d'espacement est additionnée de 1 fois le pas de dilatation du polygone.
7. Si un point est recouvert par 2 ou plusieurs polygones **62** alors la procédure se termine et la mesure d'espacement de ce point est la mesure d'espacement à l'endroit de l'anomalie.

La mesure d'espacement obtenue est identifiée comme étant

$Espacement_{CAO}$

Vérification de la règle d'espacement minimum

Les règles d'inspection établissent le ratio entre l'espacement à l'endroit de l'anomalie et l'espacement effectif au même endroit en considérant l'anomalie. Le ratio est identifié comme étant :

$Ratio_{Espacement\ min\ inum}$

Une bavure produit un défaut si :

$$\frac{Espacement_{Effective}}{Espacement_{CAO}} \leq Ratio_{Espacement\ min\ inum}$$

Étapes 3b : Inspection des régions de recouvrement

Les régions de recouvrement sont inspectées pour 2 raisons. Premièrement leurs dimensions sur le modèle multicouche peuvent être trop petites indiquant ainsi une différence d'alignement trop grande entre les couches. Ces problèmes sont détectés en faisant référence à des règles sur les régions de recouvrement. Par exemple, les recouvrements entre matériaux de type conducteur et de type résistance doivent excéder une largeur minimale établit par le manufacturier. Si cette règle échoue alors le circuit s'avère défectueux pour des raisons d'alignement entre les couches. D'autre part si la règle de base est satisfaite sur la région de recouvrement du

- modèle, la région équivalente sur l'image elle peut être sujette à un autre type de problème que la vérification des anomalies peut ne pas détecter.

En effet la détection des anomalies tolère une certaine marge entre la position des contours de l'image et les contours du modèle vectoriel. Par contre la dimension minimale d'un défaut sur une région de recouvrement dépend de la dimension de la région de recouvrement. Si la marge de tolérance sur la position des contours est égale à 25% de la largeur d'une région de recouvrement sur le modèle et que la largeur minimale de cette région est 50% de sa largeur sur le modèle alors la détection des anomalies peut laisser passer un défaut. D'un côté de la région de recouvrement **FIG 25**, une anomalie peut causer une déviation du contour qui est à l'intérieur de la marge de tolérance mais qui correspond quand même à 25% de la largeur nominale de la région. Si une autre anomalie de même dimension se trouve à l'opposée de la région de recouvrement, celle ci se trouve aussi à être à l'intérieur de la marge de tolérance mais correspond quand même à 25% de la largeur nominale de la région. Aucune des 2 anomalies n'a été détectée puisqu'elles étaient toutes 2 à l'intérieure de la marge de tolérance, par contre l'effet des 2 anomalies combinées ensemble contribue à diminuer la largeur de la région de recouvrement à 50% de sa largeur nominale ce qui correspond à un défaut.

Dans l'exemple ci haut, si la largeur d'une région de recouvrement correspond à 4 fois ou moins la marge de tolérance alors la région peut contenir des défauts qui passeraient inaperçue en faisant uniquement une détection des anomalies. Dans ce cas la largeur effective de la région doit être mesurée et comparée à la largeur nominale de la région.

L'arbre décisionnel pour l'inspection des régions de recouvrement est illustré à la **FIG 26**. En premier lieu la largeur nominale de la région est mesurée si celle ci est inférieure au seuil spécifié par le manufacturier alors il y a une erreur d'alignement de couche. D'autre part, si la largeur est inférieure à 4 fois la marge de tolérance sur la position des contours alors la largeur de la région est mesurée sur l'image puisque celle ci est problématique. Autrement la région de recouvrement est considérée sans défaut. Si la largeur de la région sur l'image est mesurée et que cette valeur correspond à moins de 50% de la valeur sur le modèle alors la région de recouvrement est considérée comme défectueuse.

La mesure de la largeur de la région sur le modèle vectoriel se fait par une érosion du polygone de la région. Lorsque l'érosion crée un croisement des segments du polygone, la quantité d'érosion utilisée indique la largeur de la région de recouvrement. Pour accélérer la procédure les pas d'érosion effectués sont larges jusqu'à ce que un croisement soit détecté. Par la suite le pas est diminué de 2 pour faire une dilatation du polygone jusqu'à ce que le polygone soit de nouveau sans croisement. Le pas est à nouveau diminué de 2 et l'érosion est de nouveau entamé jusqu'à ce qu'il se produise à nouveau un croisement. La procédure se répète jusqu'à ce que le pas d'érosion soit égal ou inférieur au niveau de résolution recherché.

La mesure de la largeur de la région sur l'image est mesurée en faisant l'extraction du contour qui se trouve sur le CCA à l'endroit spécifié par le modèle de la même région. Les points du contour sont considérés comme des vertex d'un polygone et la même procédure d'érosion vectorielle est alors déclenchée.

Étapes 3c : Inspection des régions d'espacement étroites

Les régions étroites sont inspectées pour les mêmes raisons que les régions de recouvrement. Premièrement leurs dimensions sur le modèle multicouche peuvent être trop petites indiquant ainsi une différence d'alignement trop grande entre les couches. Ces problèmes sont détectés en faisant référence à des règles de base sur les régions de recouvrement. Par exemple, l'espacement entre matériaux peut être établie comme ne devant jamais être inférieure à un espacement minimal établi par le manufacturier. Si cette règle échoue alors le circuit s'avère défectueux pour des raisons d'alignement entre les couches. D'autre part si la règle de base est satisfaite sur la région d'espacement du modèle, la région équivalente sur l'image, elle peut être sujette à un autre type de problème que la vérification des anomalies ne pourra pas détecter.

- Pour les mêmes raisons que celles mentionnées par les régions de recouvrement, si la largeur d'une région d'espacement étroite correspond à 4 fois ou moins la marge de tolérance alors la région peut contenir des défauts qui passeraient inaperçue en faisant uniquement une détection des anomalies. Dans ce cas la largeur effective de la région doit être mesurée et comparée à la largeur nominale de la région.

L'arbre décisionnel pour l'inspection des régions d'espacement étroites est illustré à la **FIG 27**. Il faut noter que toutes les régions qui passent par la branche 3 de l'arbre décisionnel ne sont pas considérées au départ comme des régions d'espacement étroites. En d'autres mots les régions d'espacement étroites sont par définition inférieure à 4 fois la marge de tolérance sur la position des contours. En premier lieu donc la largeur nominale de la région est mesurée si celle ci est inférieure au seuil spécifié par le manufacturier alors il y a une erreur d'alignement de couche. Autrement la largeur de la région équivalente sur l'image est mesurée. Si la largeur de la région sur l'image a une valeur qui correspond à moins de 50% de la valeur sur le modèle alors la région d'espacement est considérée comme défectueuse.

La mesure de la largeur de la région sur le modèle vectoriel se fait par une érosion du polygone de la région avec la même procédure que celle mentionnée plus haut.

La mesure de la largeur de la région sur l'image nécessite de faire sur le CCA, l'extraction des contours qui bornent la région d'espacement. C'est contours ne correspondent pas au même élément et ne produise pas un contour fermé. Il s'agit en premier lieu de retracer sur le polygone de la région d'espacement étroite quels segments correspondent à des segments de polygones qui existe sur le modèle vectoriel multicouche. Les contours équivalents à ces segments sont alors retracés sur le CCA. Les contours sont alors rattachés entre eux pour formé un seul contour fermé qui devient en quelque sorte l'équivalent du contour image de la région d'espacement étroite. Les points du contour fermé constitue en fait les vertex d'un polygone. Par la suite la procédure d'érosion vectorielle s'applique pour calculer la largeur de ce contour.

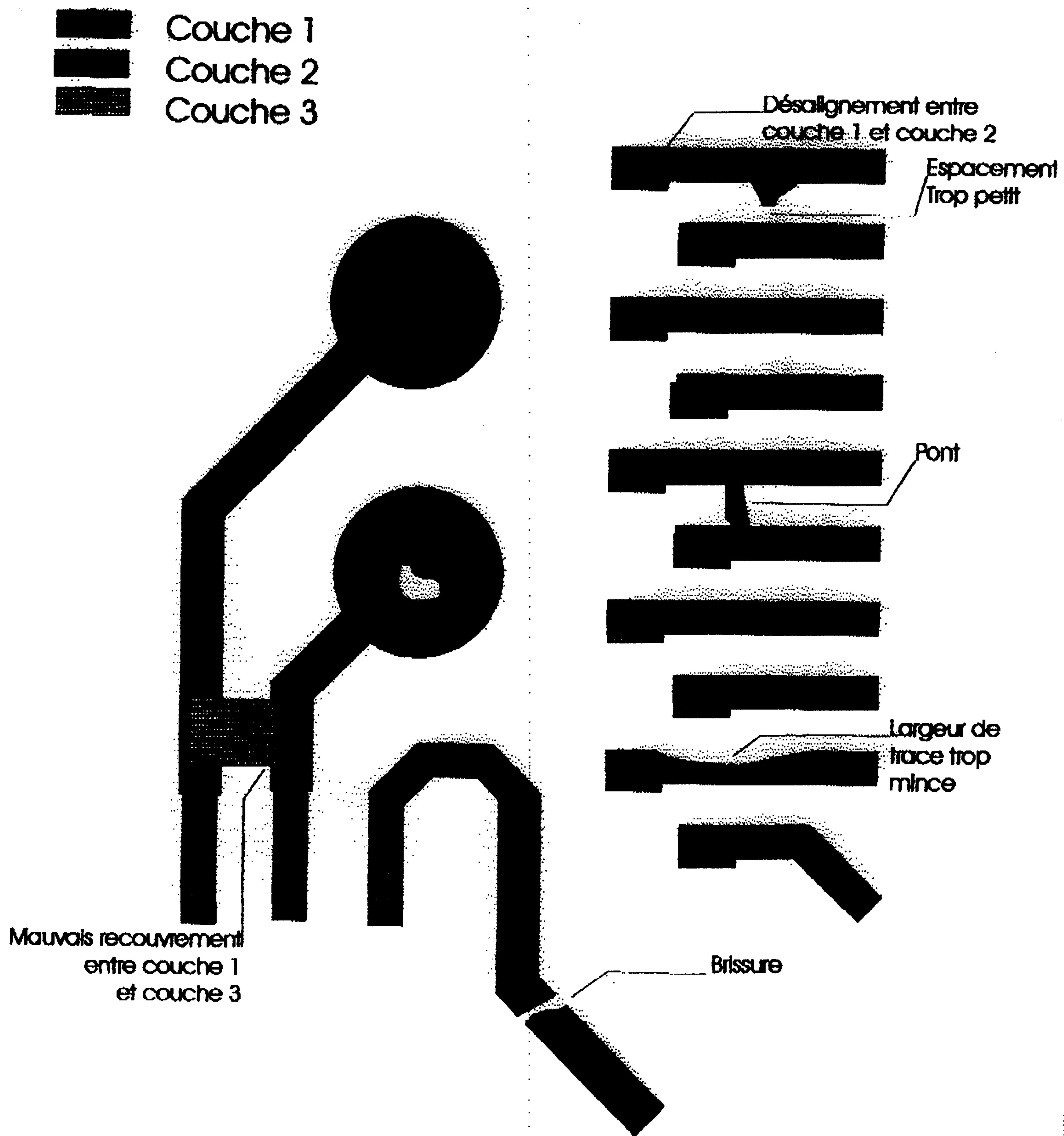


FIG 1 Dessin d'un circuit avec une série de défauts

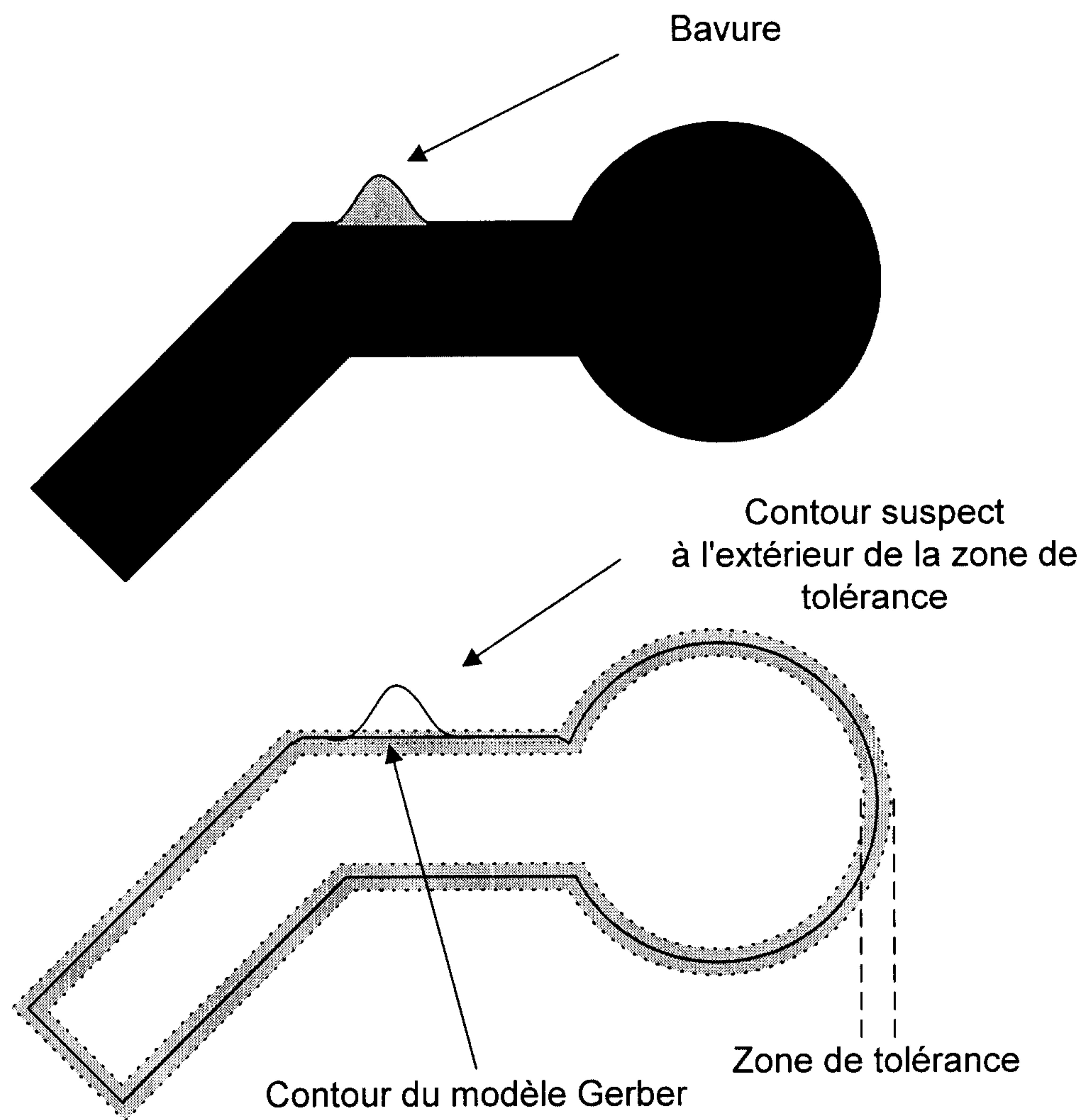


FIG 2 Déviation suspecte entre contour et dessin

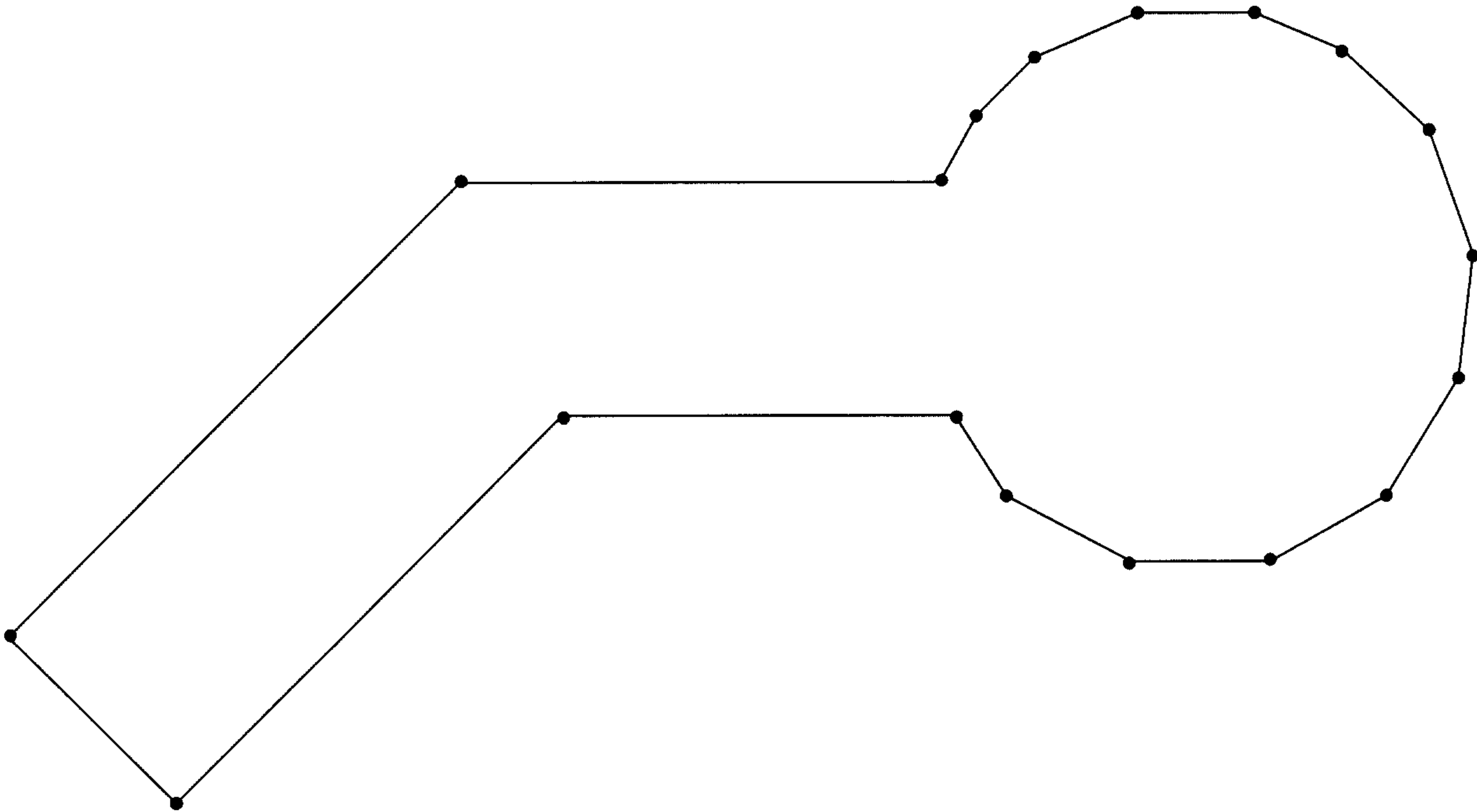
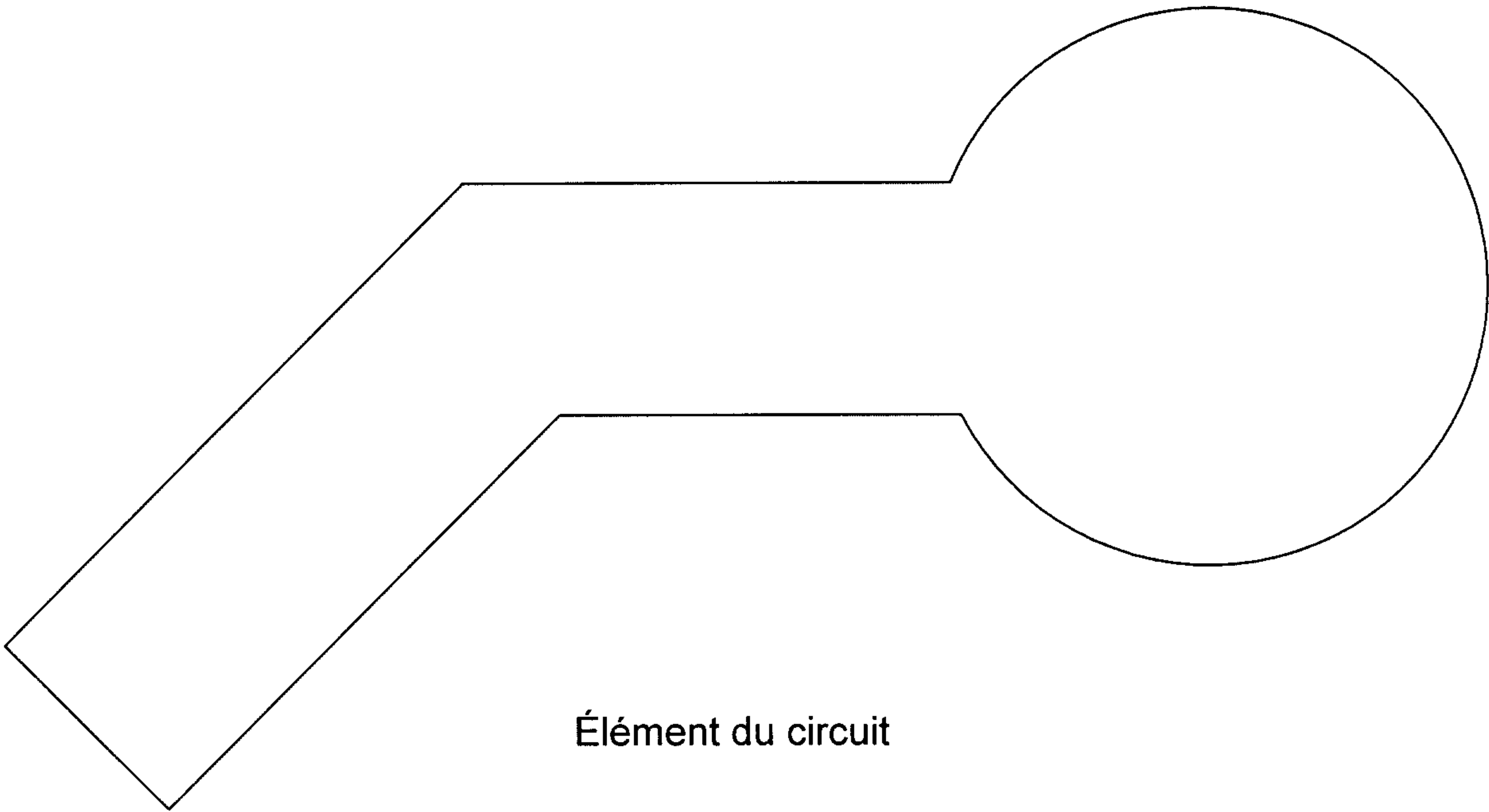


FIG 3 Représentation en polygone

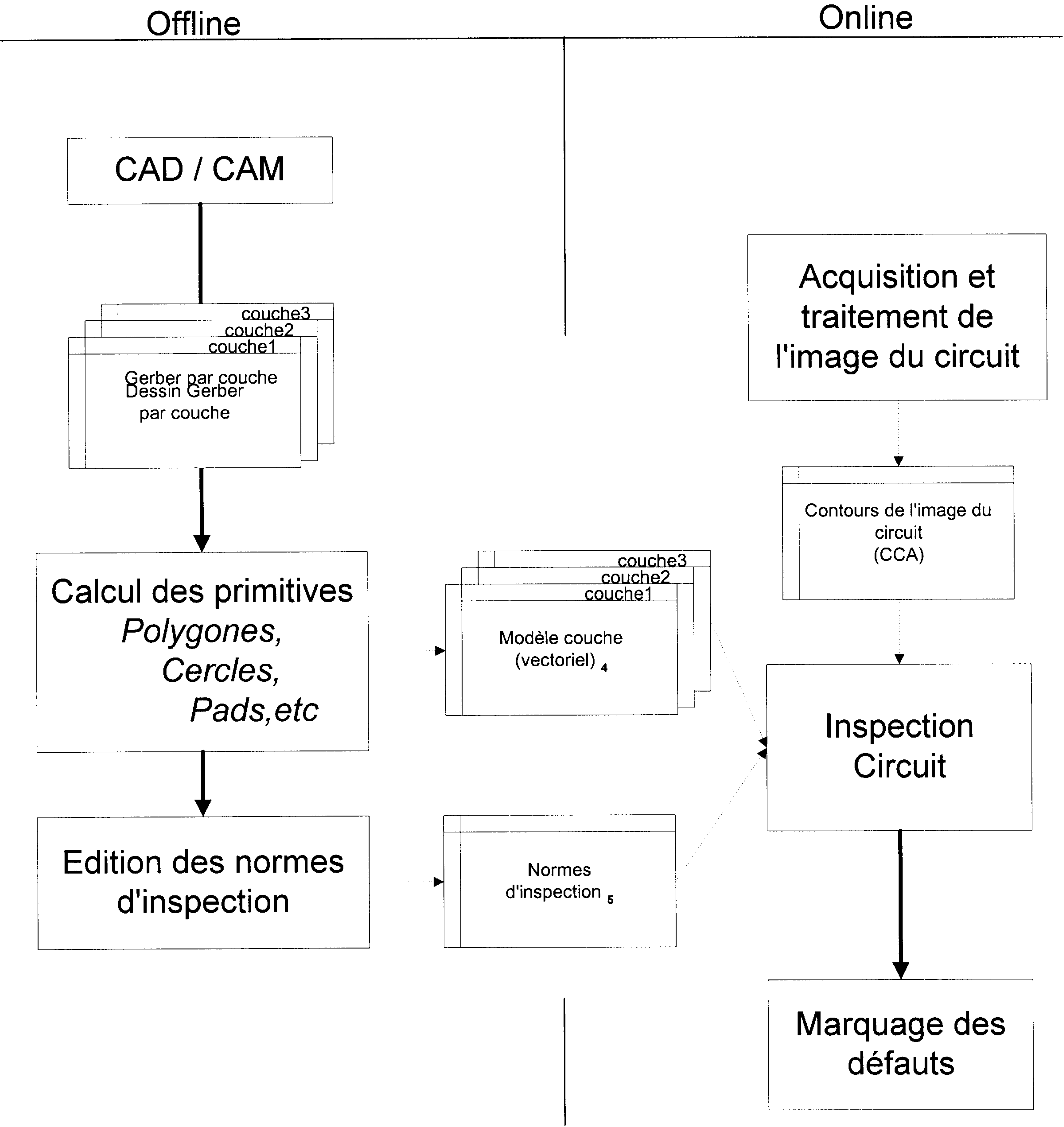


FIG 4 Diagramme du système Circuitpro

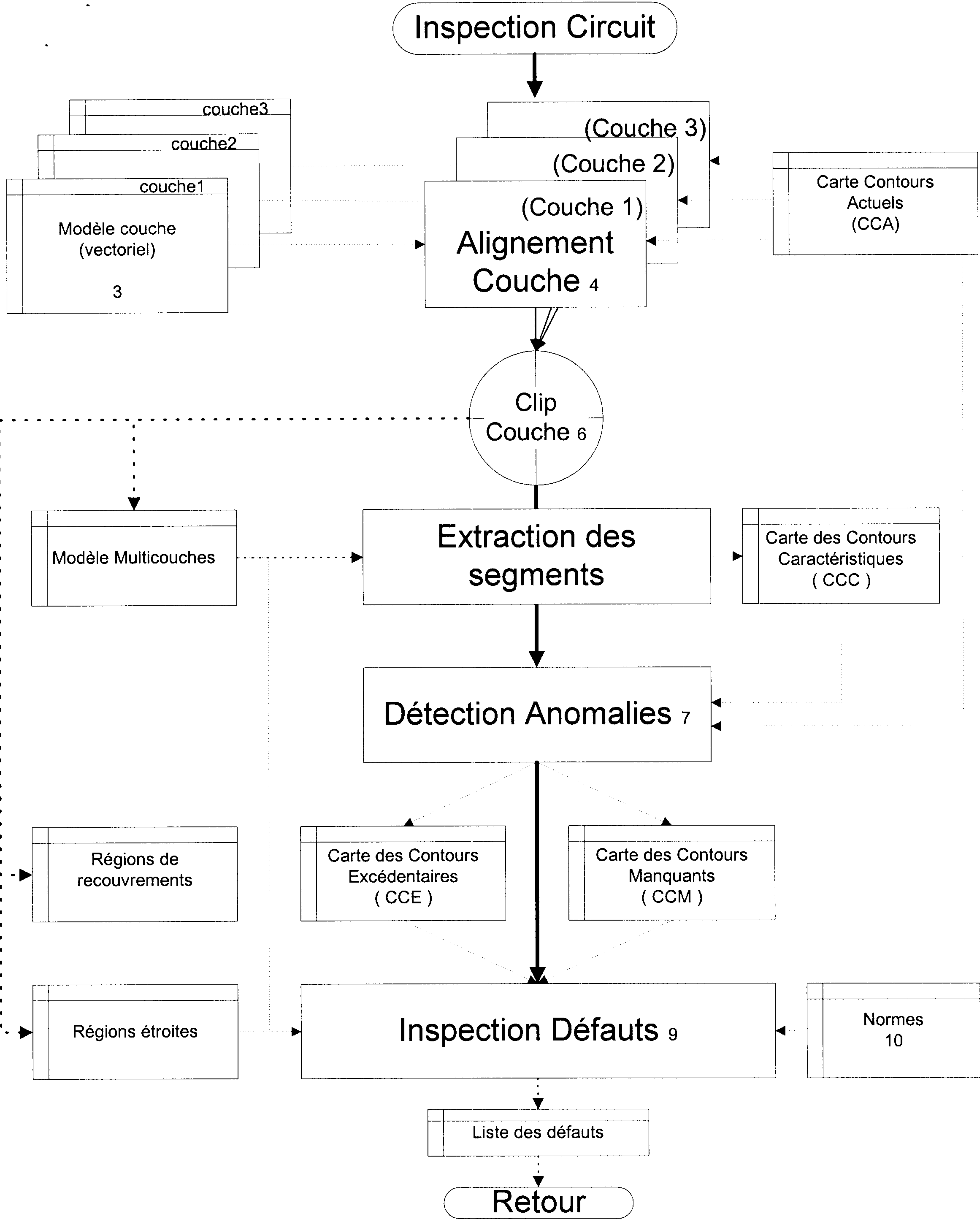


FIG 5 Diagramme de l'inspection

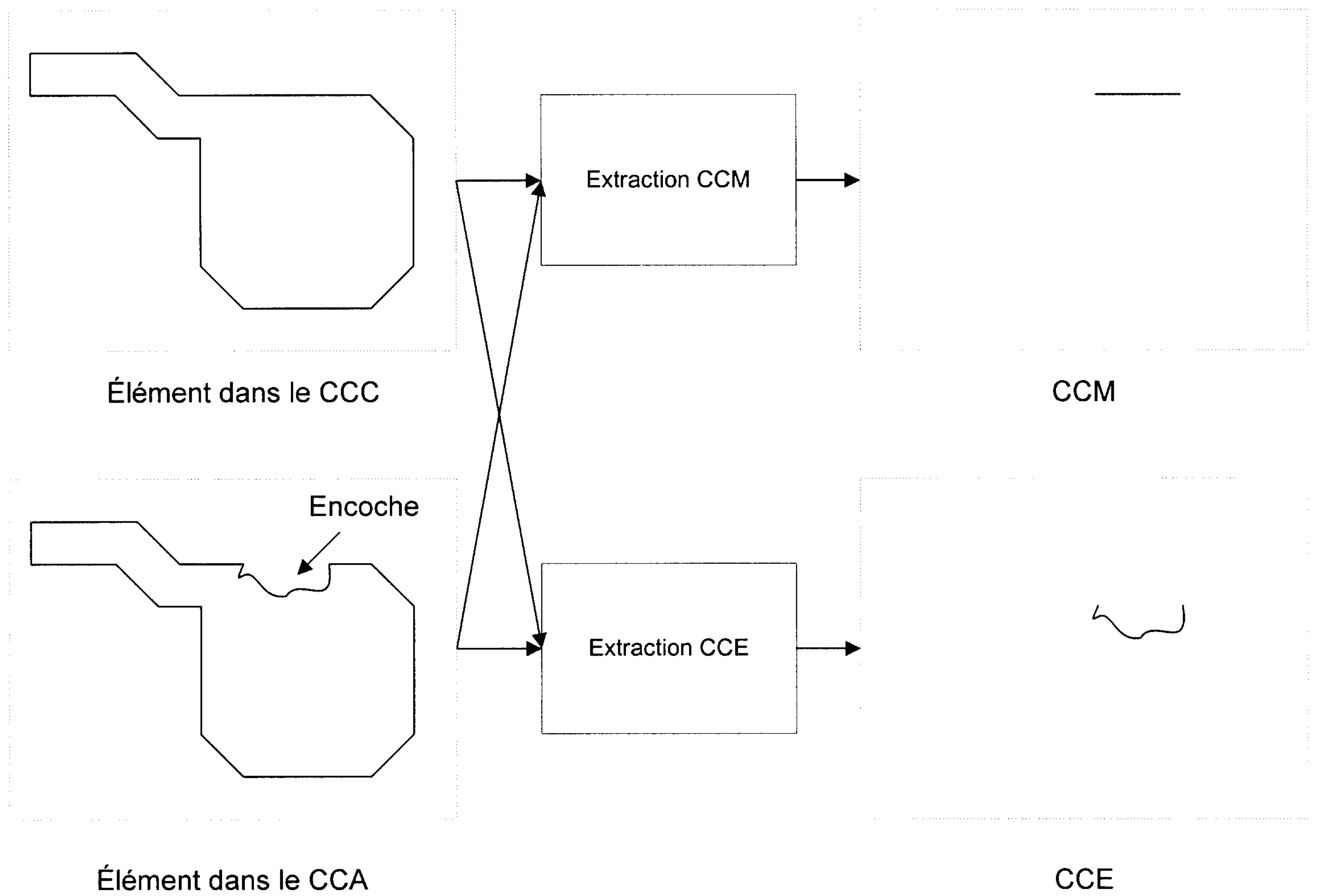


FIG 6 Effet d'une encoche sur le CCM et le CCE

Traitement image

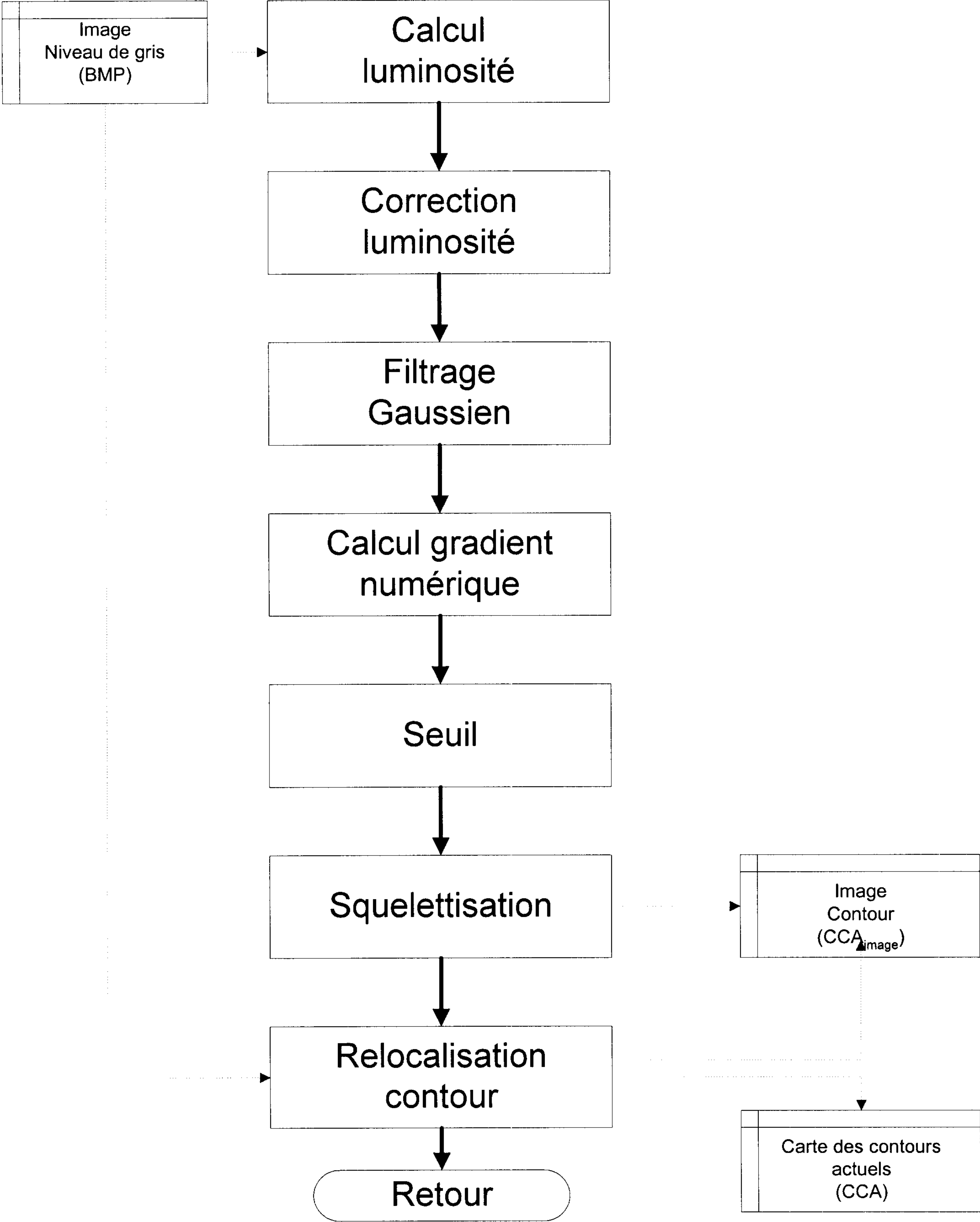


FIG 7 Traitement de l'image

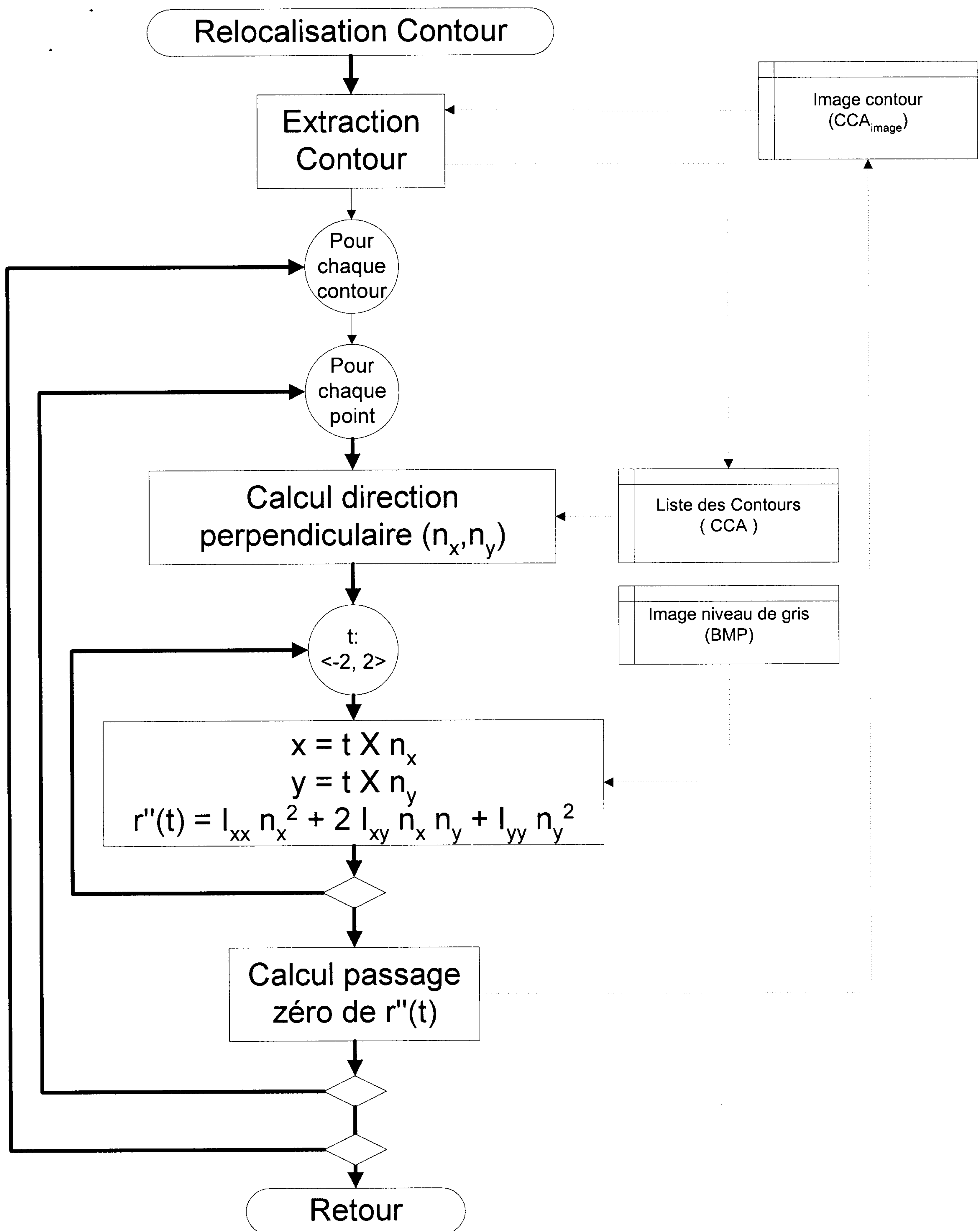
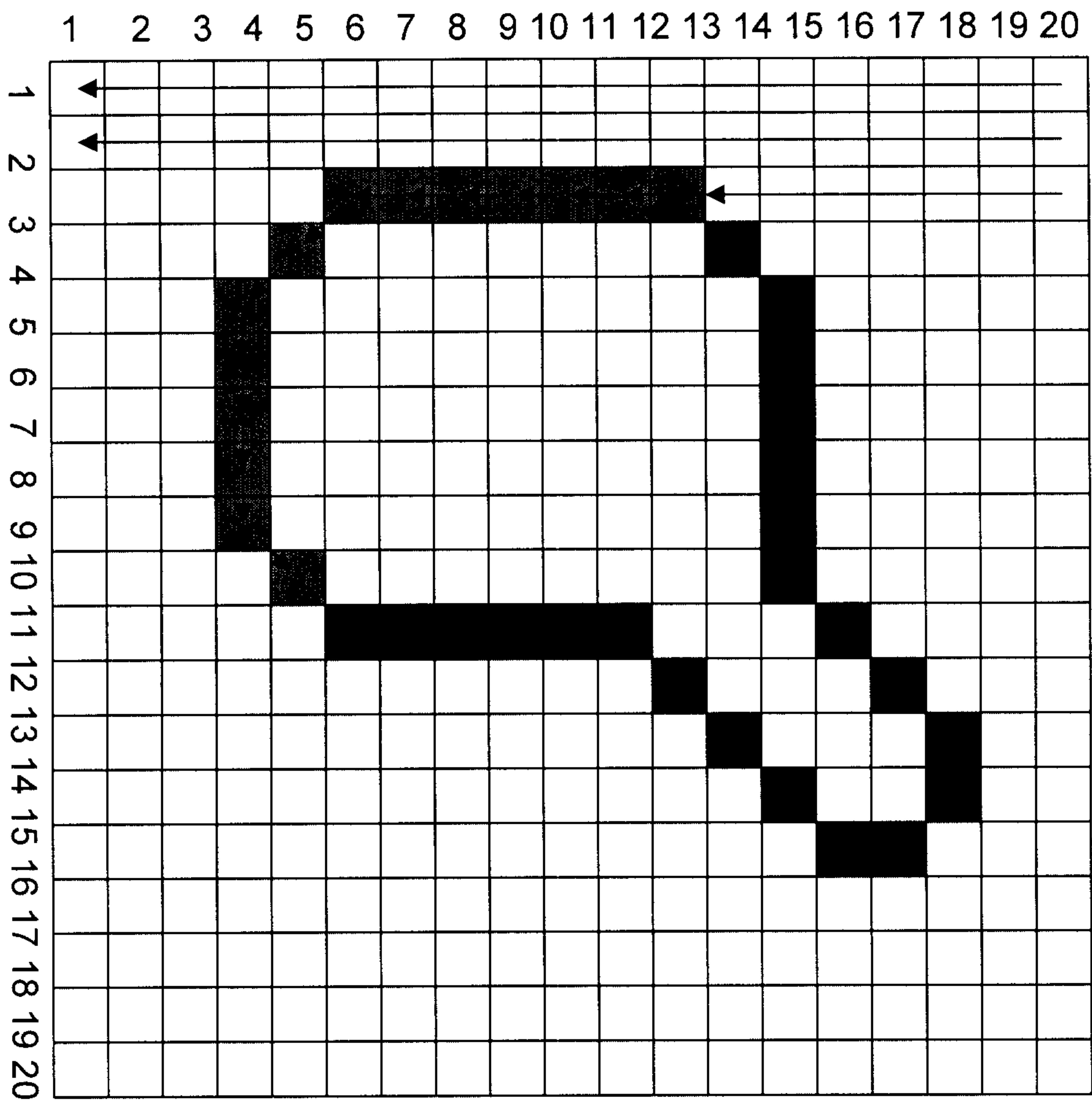


FIG 8 Détection des contours au sous pixel



Image

	X	Y
Point 1	12	3
Point 2	11	3
Point 3	10	3
Point 4	9	3
Point 5	8	3
Point 6	7	3
Point 7	6	3
Point 8	5	4
Point 9	4	5
Point 10	4	6
Point 11	4	7
Point 12	4	8
Point 13	4	9
Point 14	5	10
Point 15		

Liste des points de contour

FIG 9 Extraction des contours

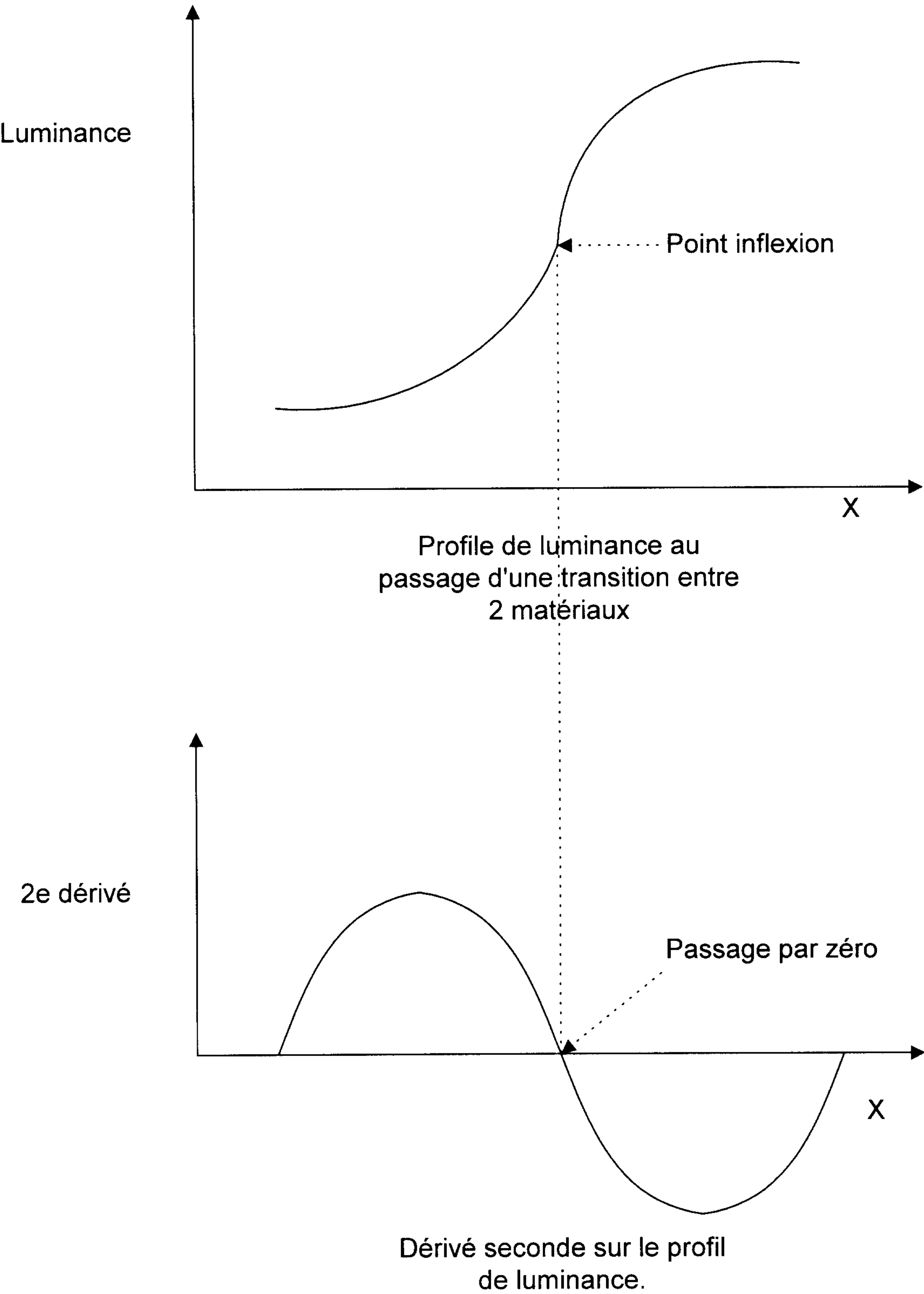


FIG 10 Passage par zéro de la 2e dérivé

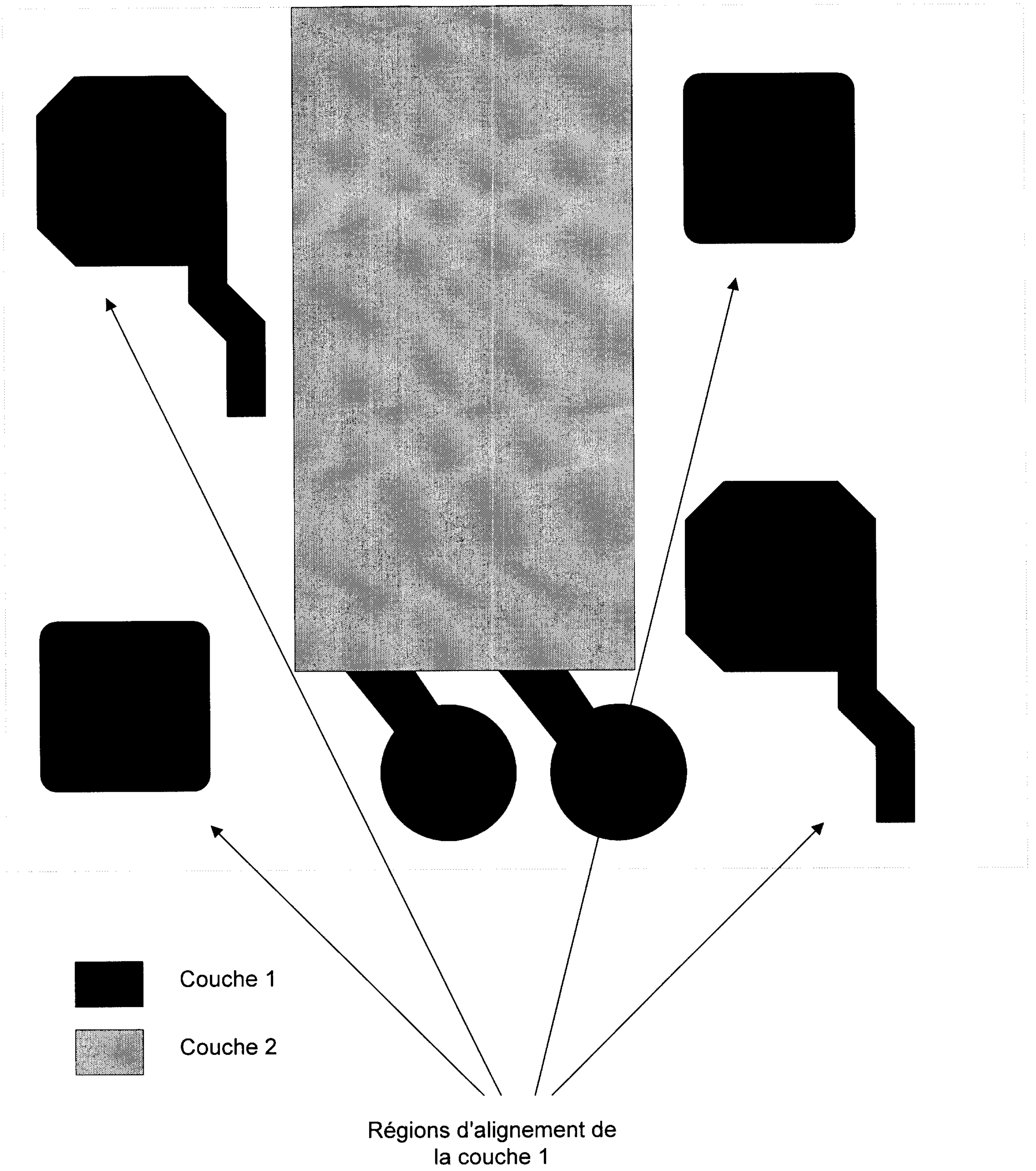
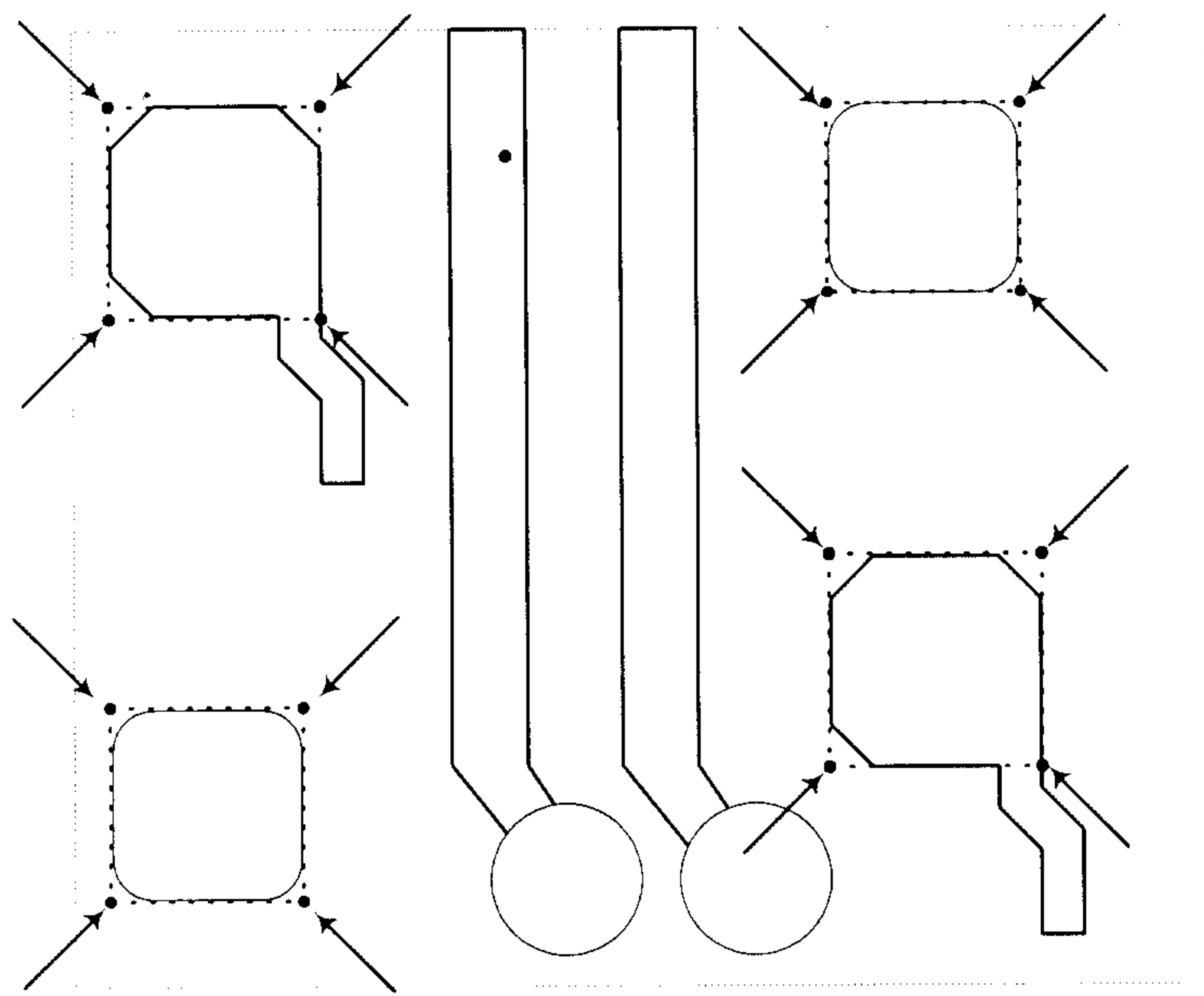


FIG 11 Régions d'alignements



Modèle de la couche 1

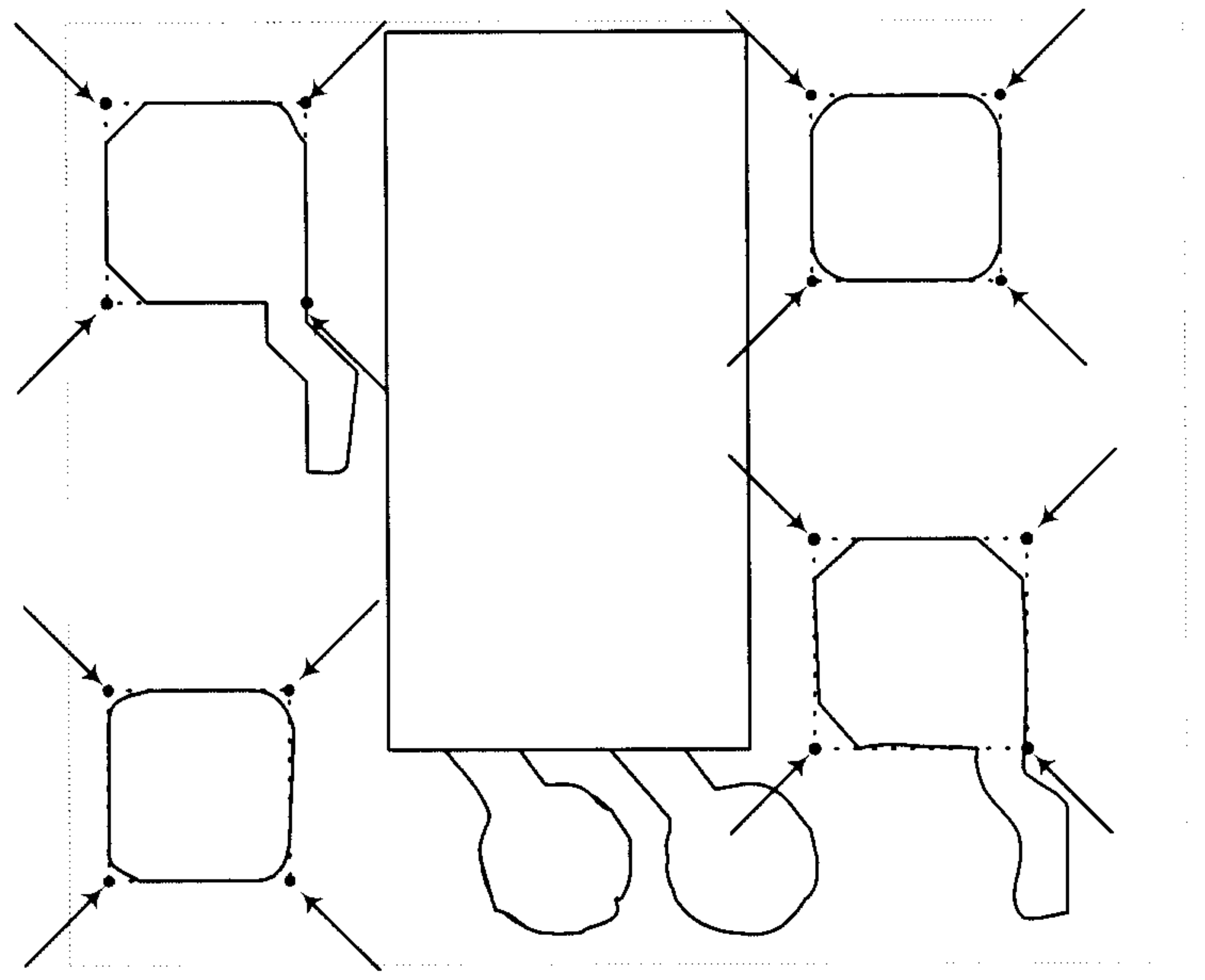


Image des contours

FIG 12 Points de correspondance

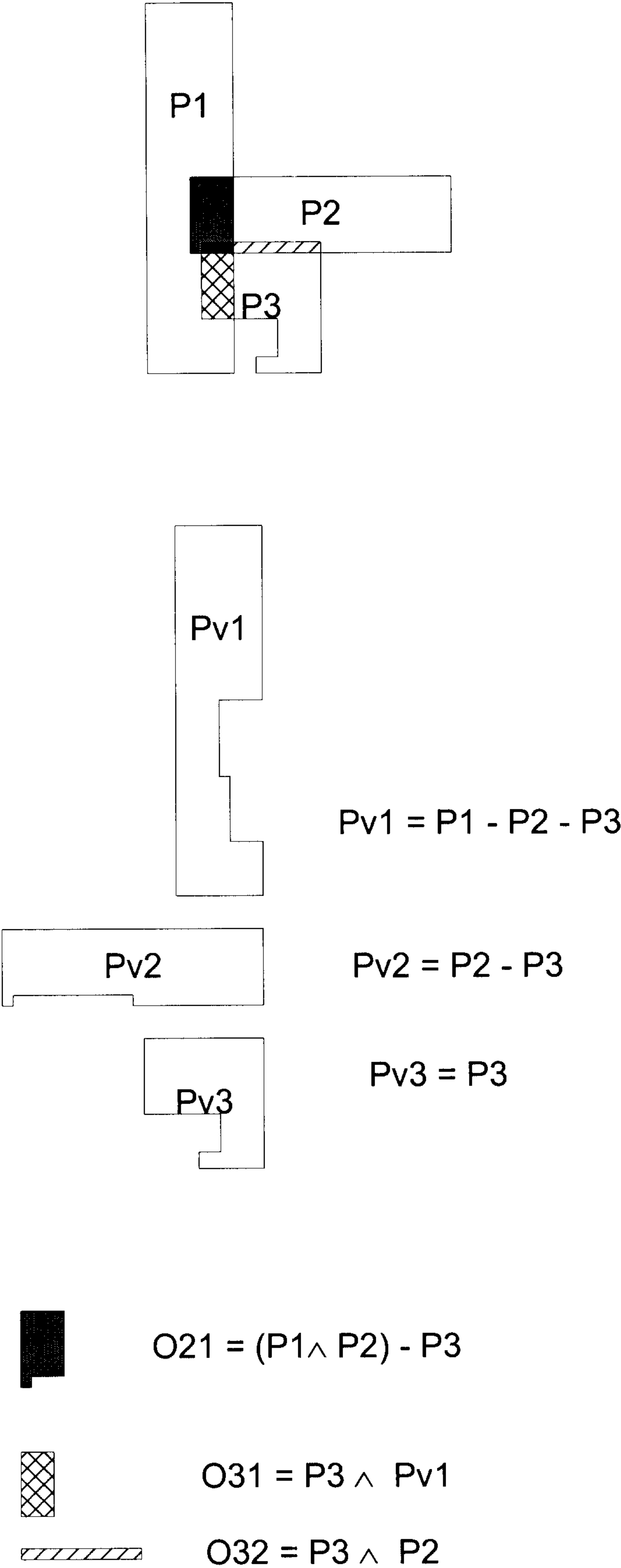


FIG 13 Superposition des polygones

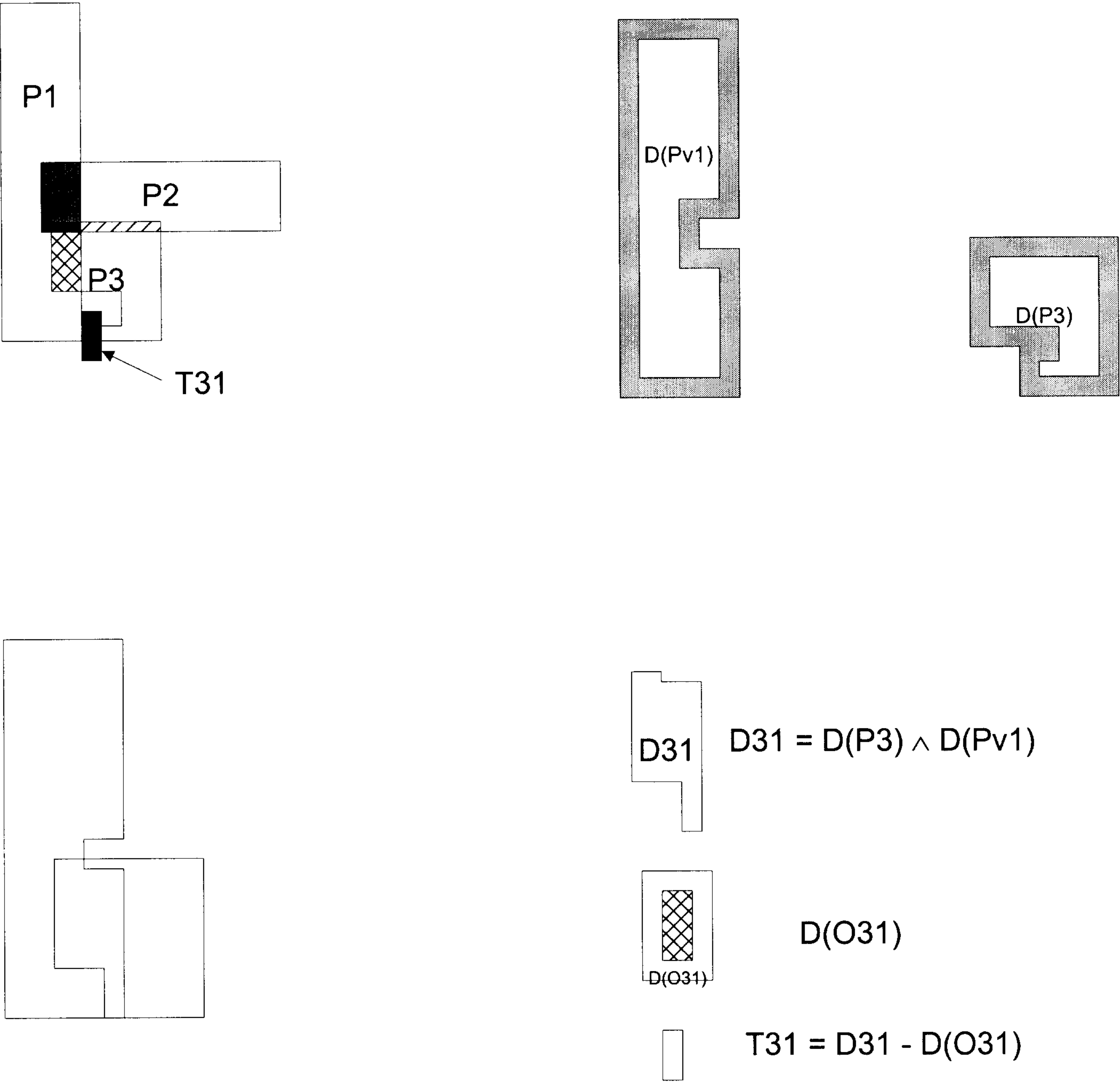


FIG 14 Régions d'espacement étroites

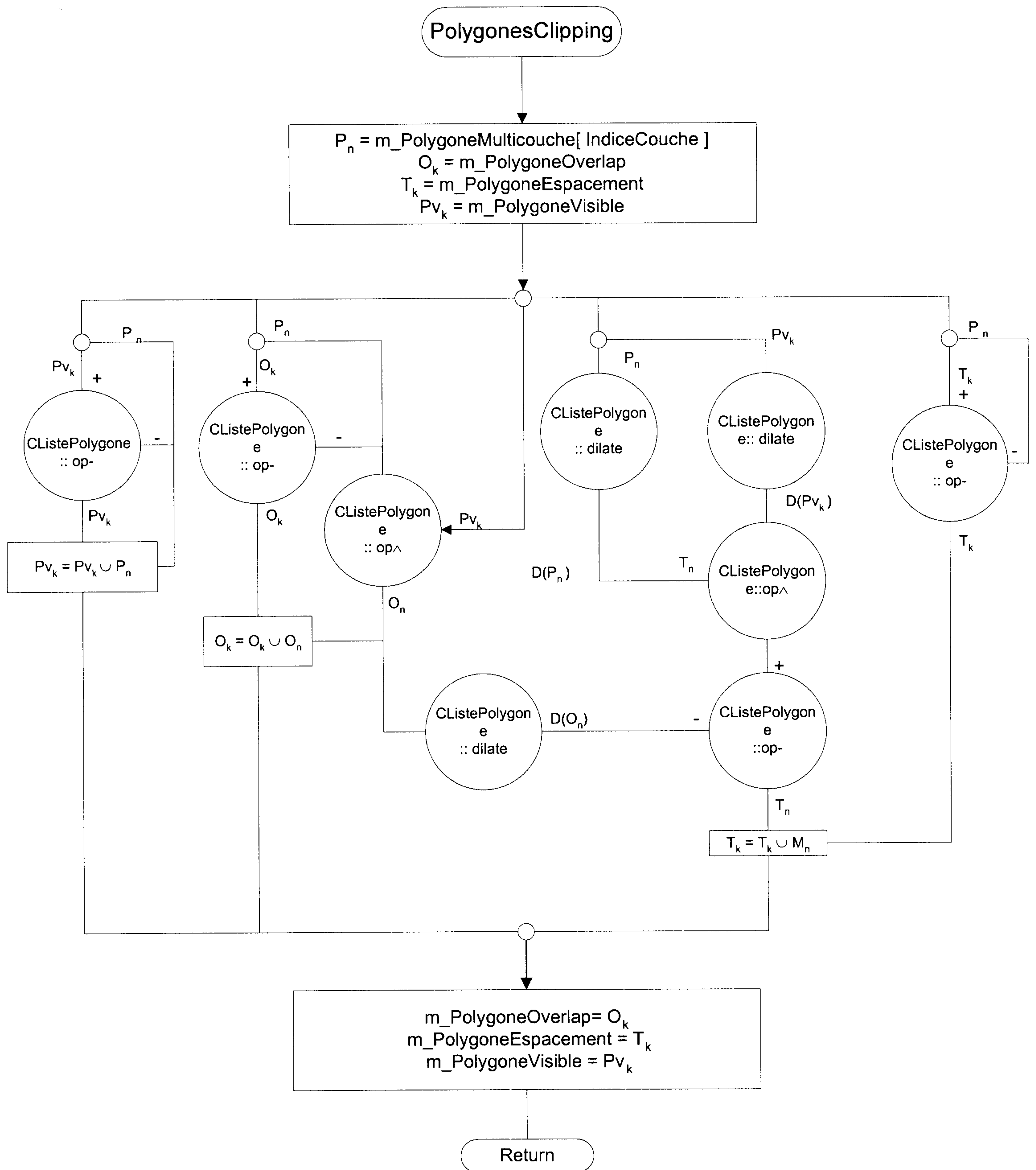


FIG 15 Procédure de superposition des couches

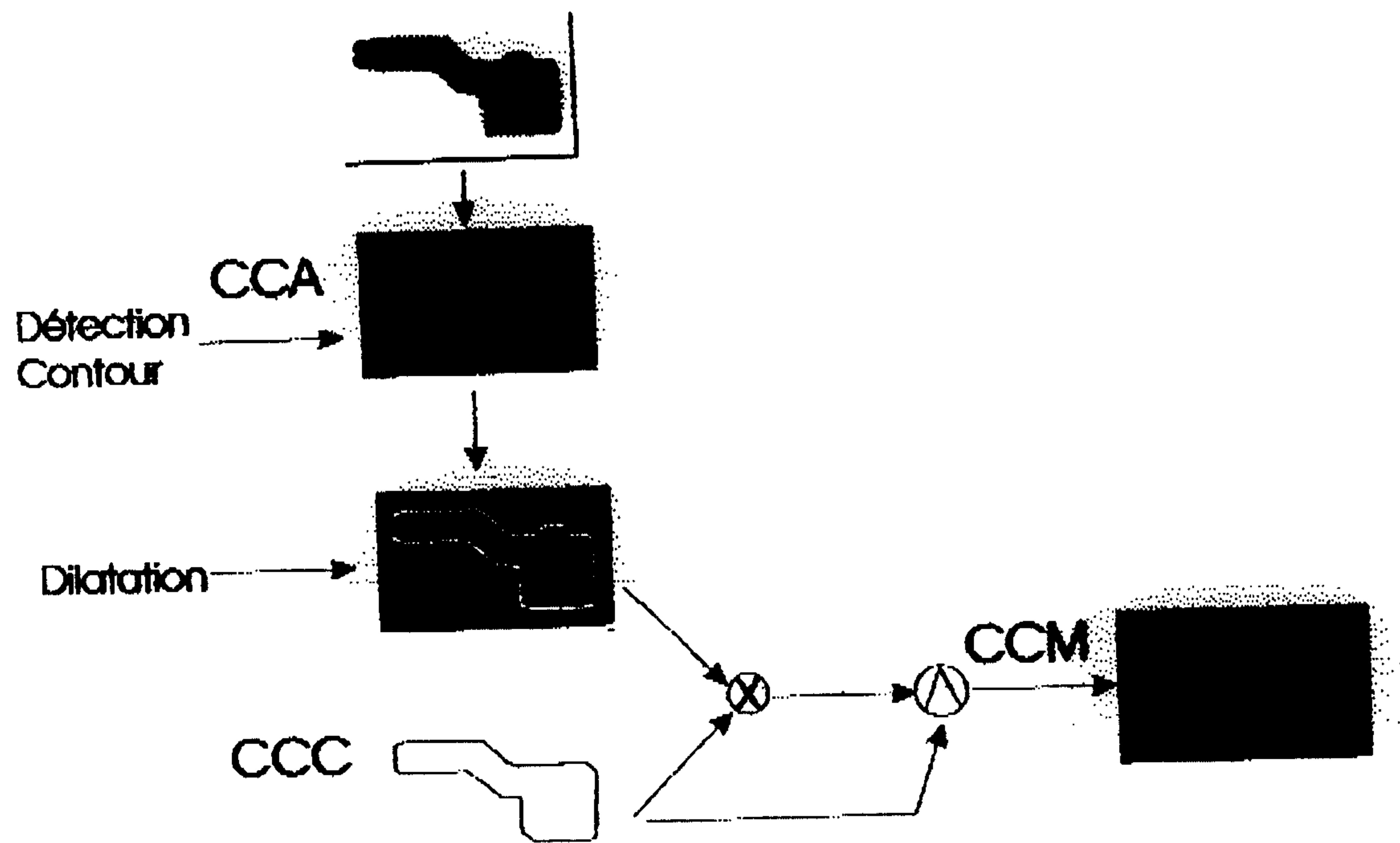


FIG 16 Détection des contours manquants

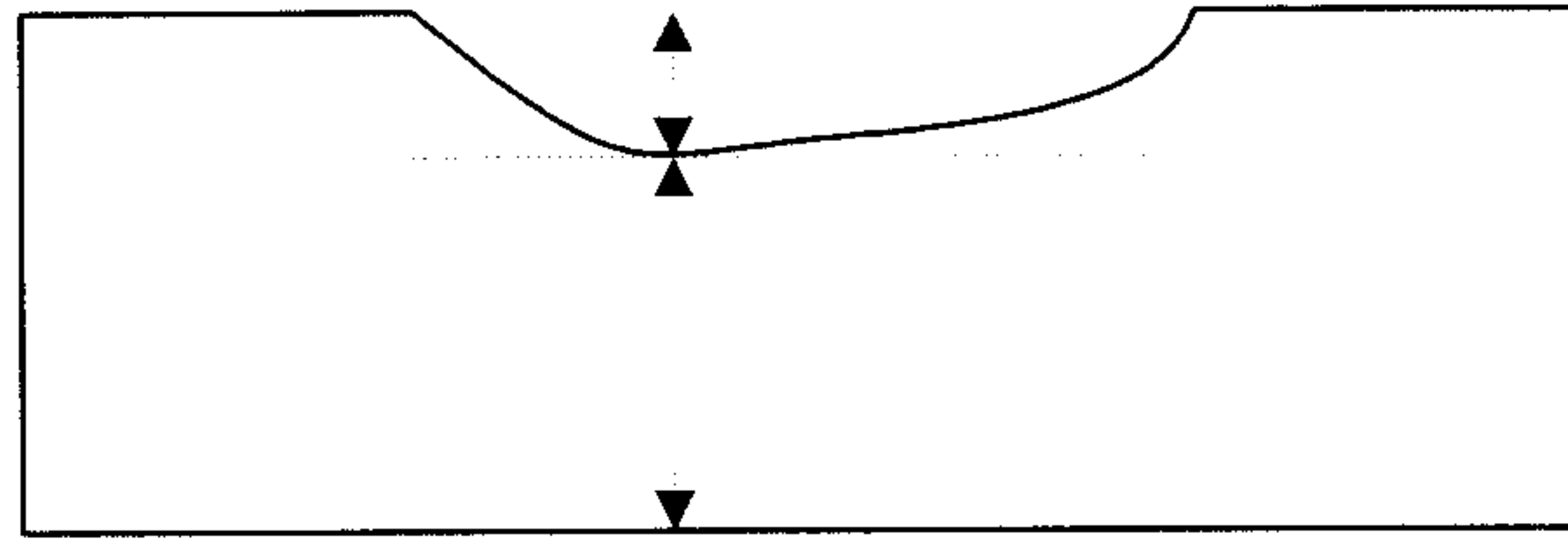


FIG 17 Mesure de la largeur effective sur rectangle

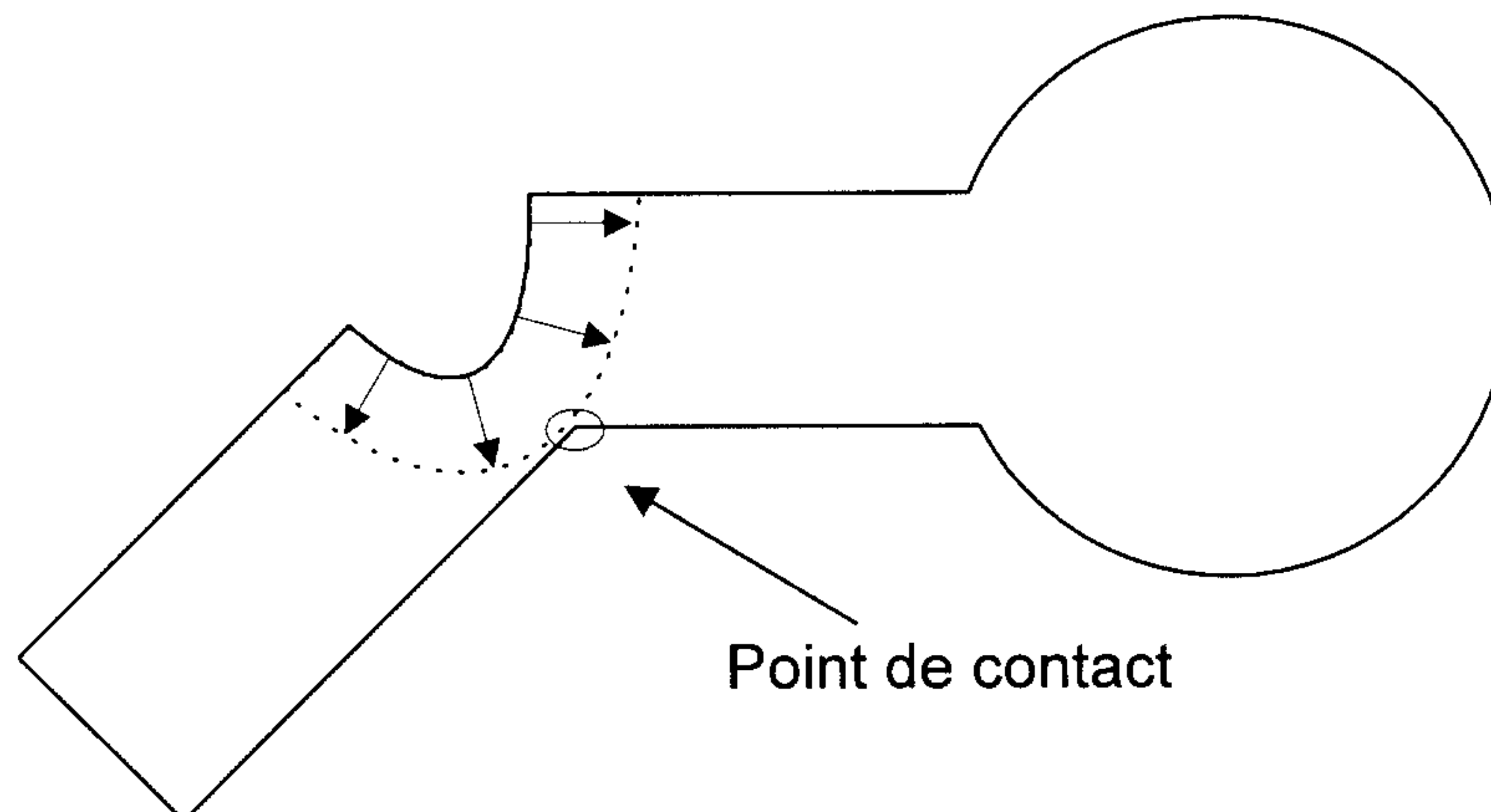


FIG 18 Mesure de la largeur effective sur un polygone qui contient une encoche

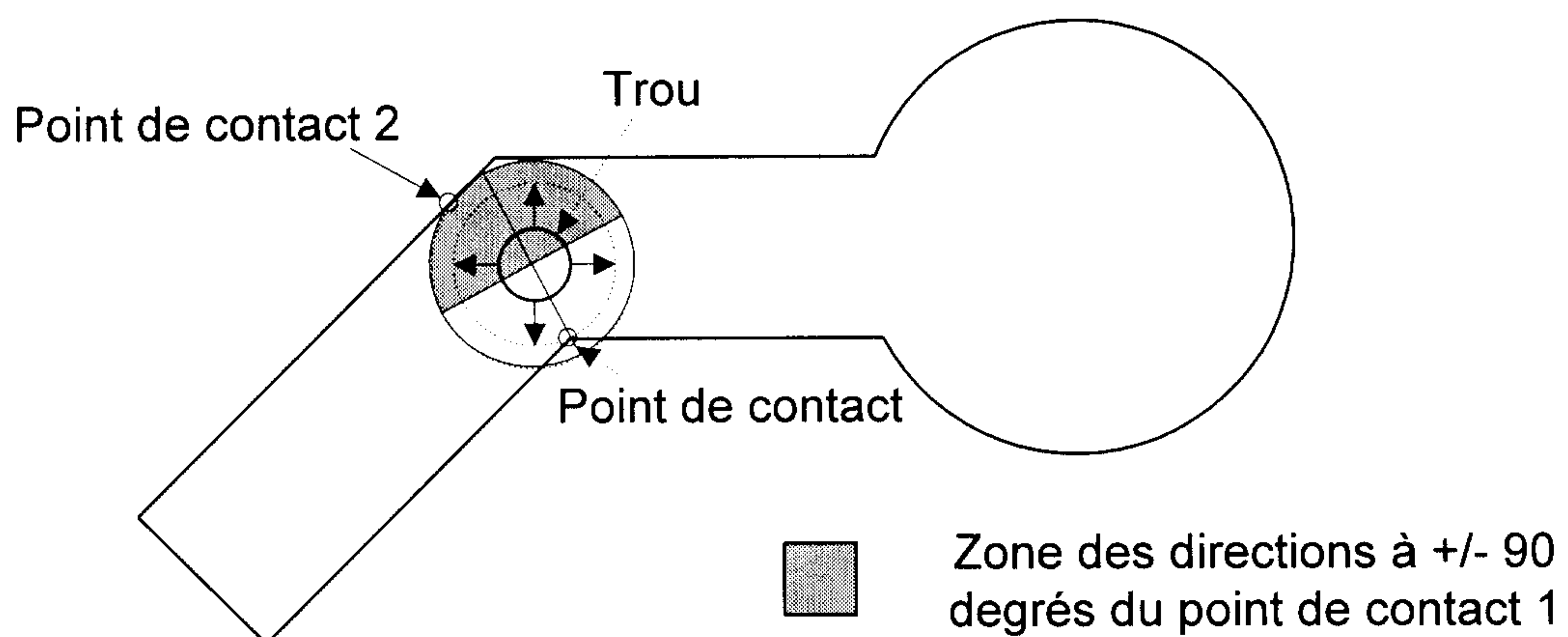


FIG 19 Calcule largeur effective avec trou sur élément

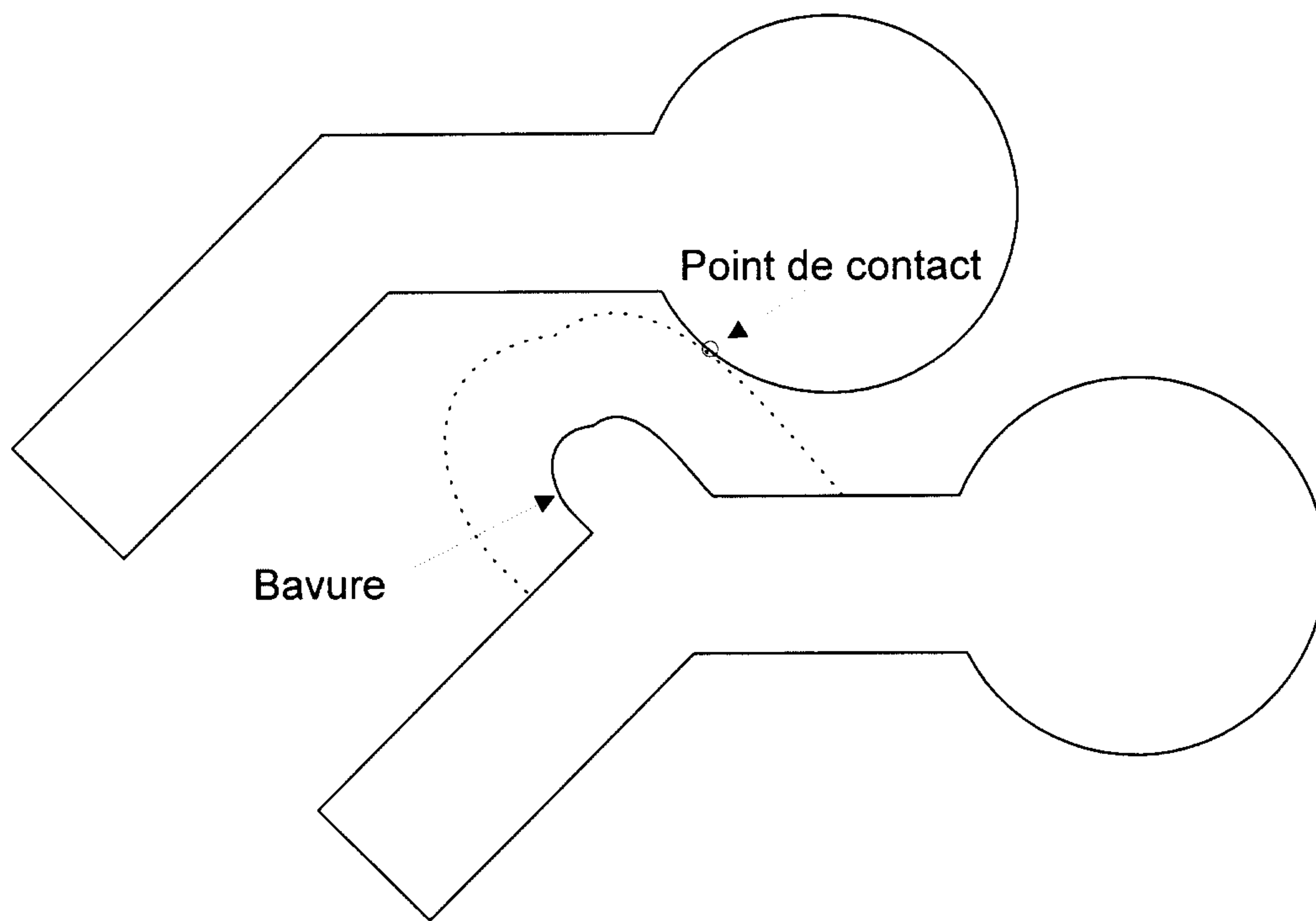


FIG 20 Calcule espacement effectif avec bavure

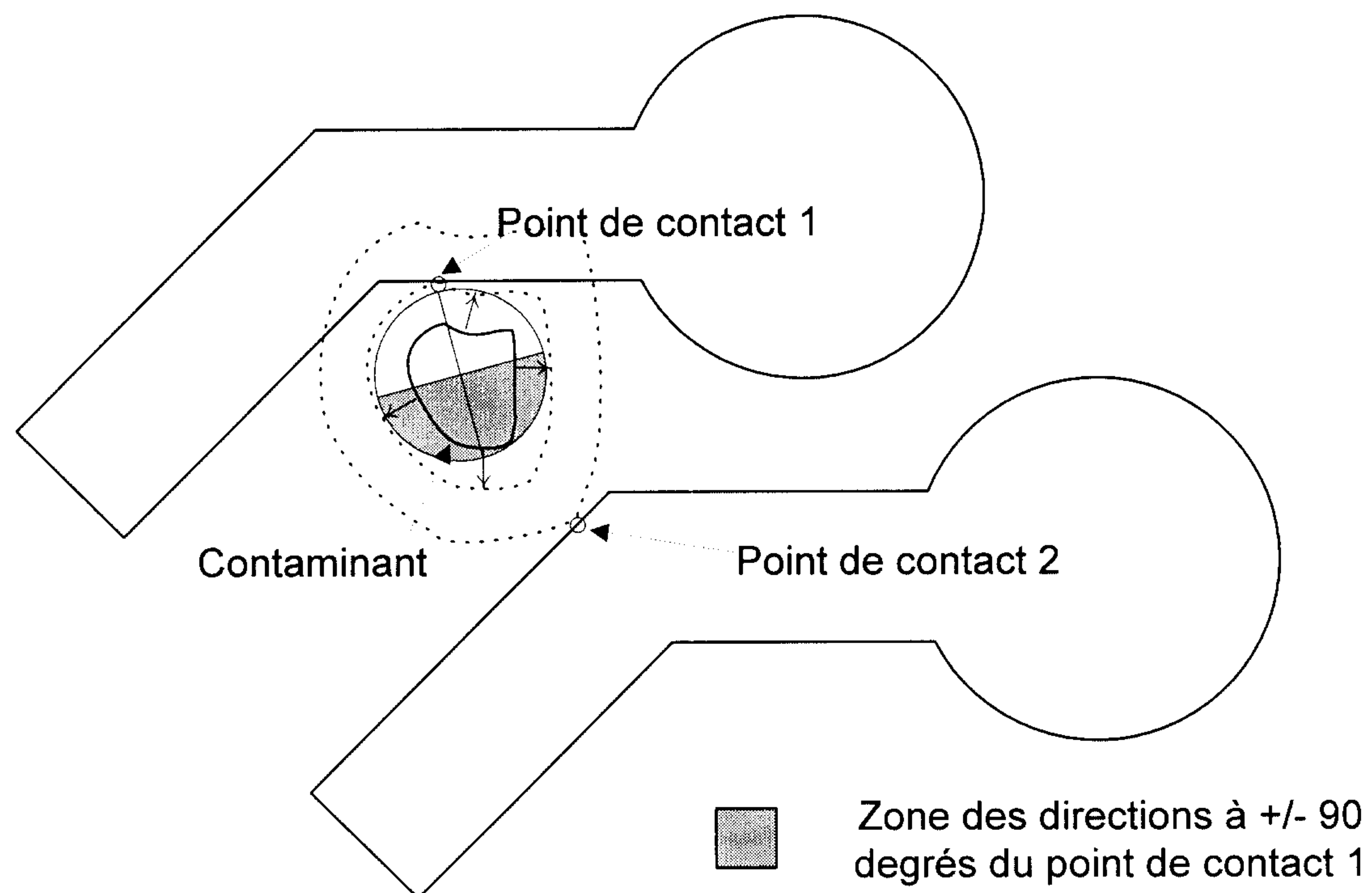


FIG 21 Calcule espacement effectif avec contaminant

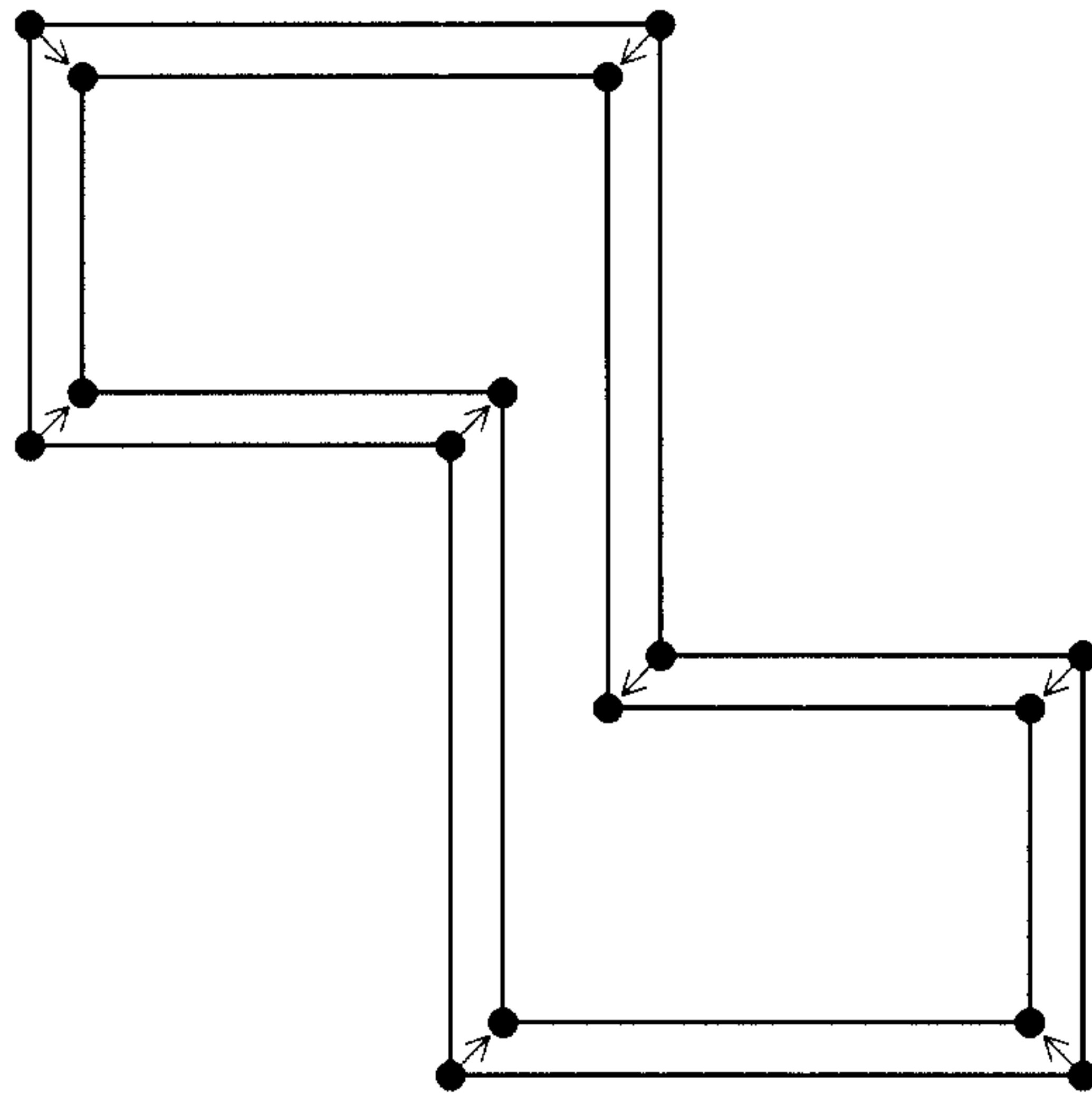


FIG 22 Érosion vectorielle

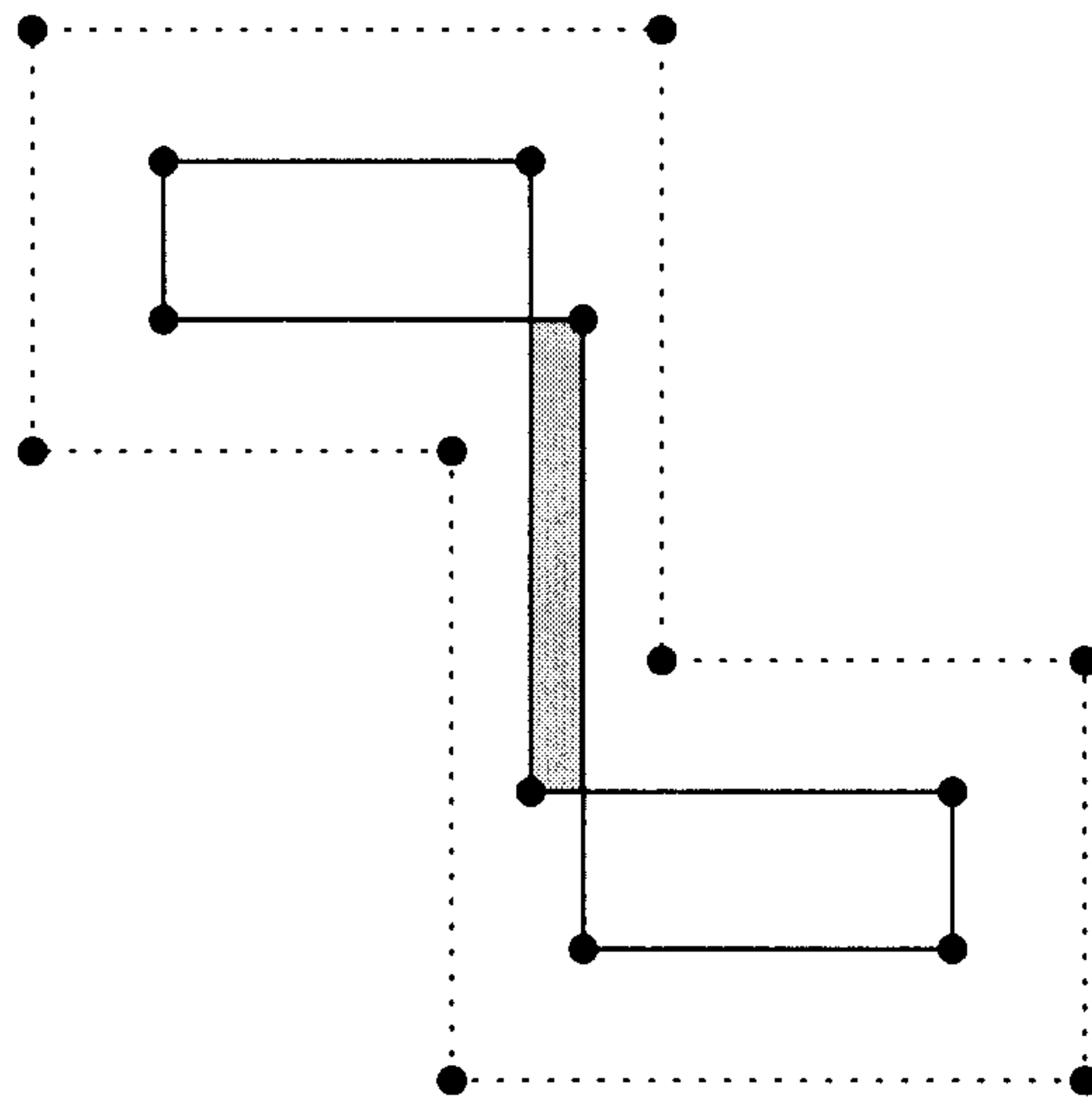


FIG 23 Polygone érodé avec entrecroisement

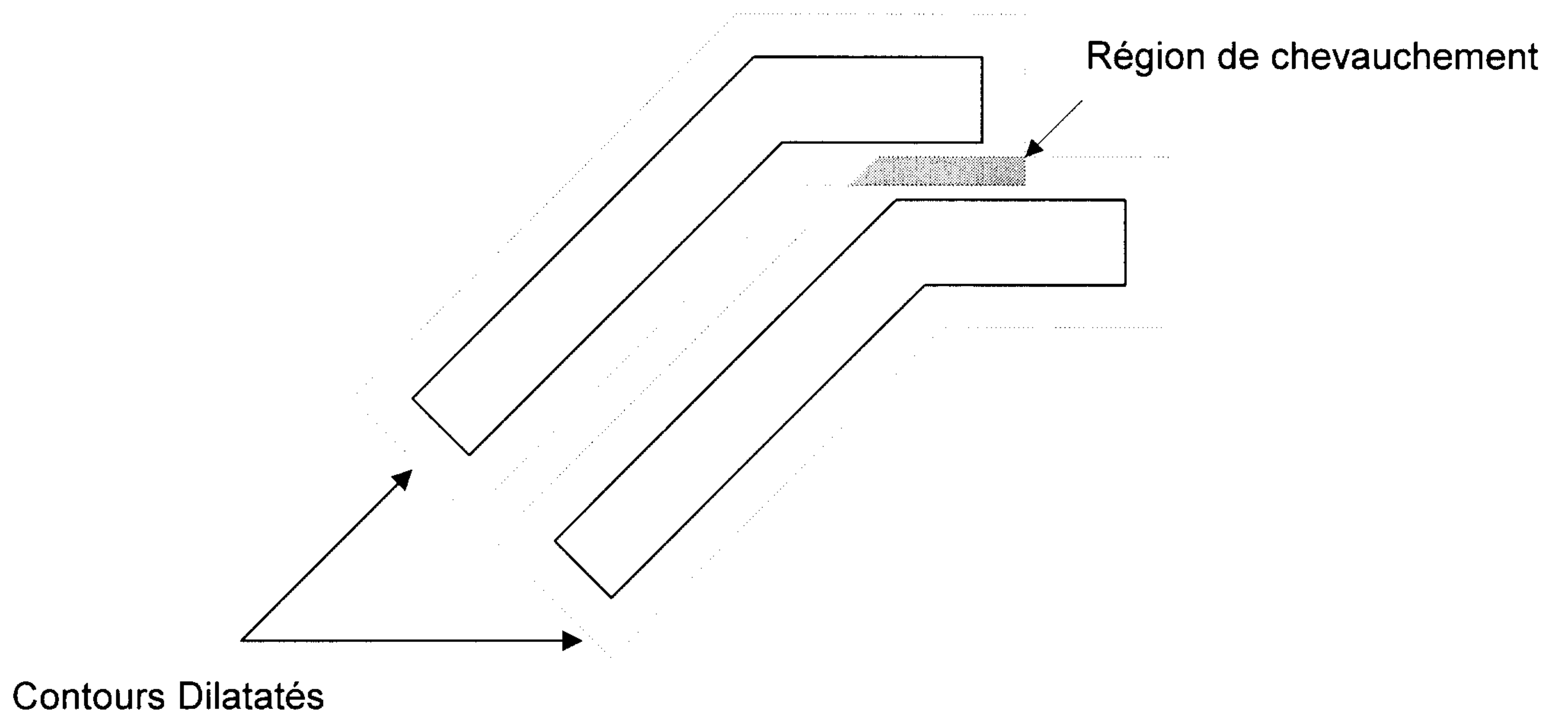


FIG 24 Polygone avec dilatation et chevauchement

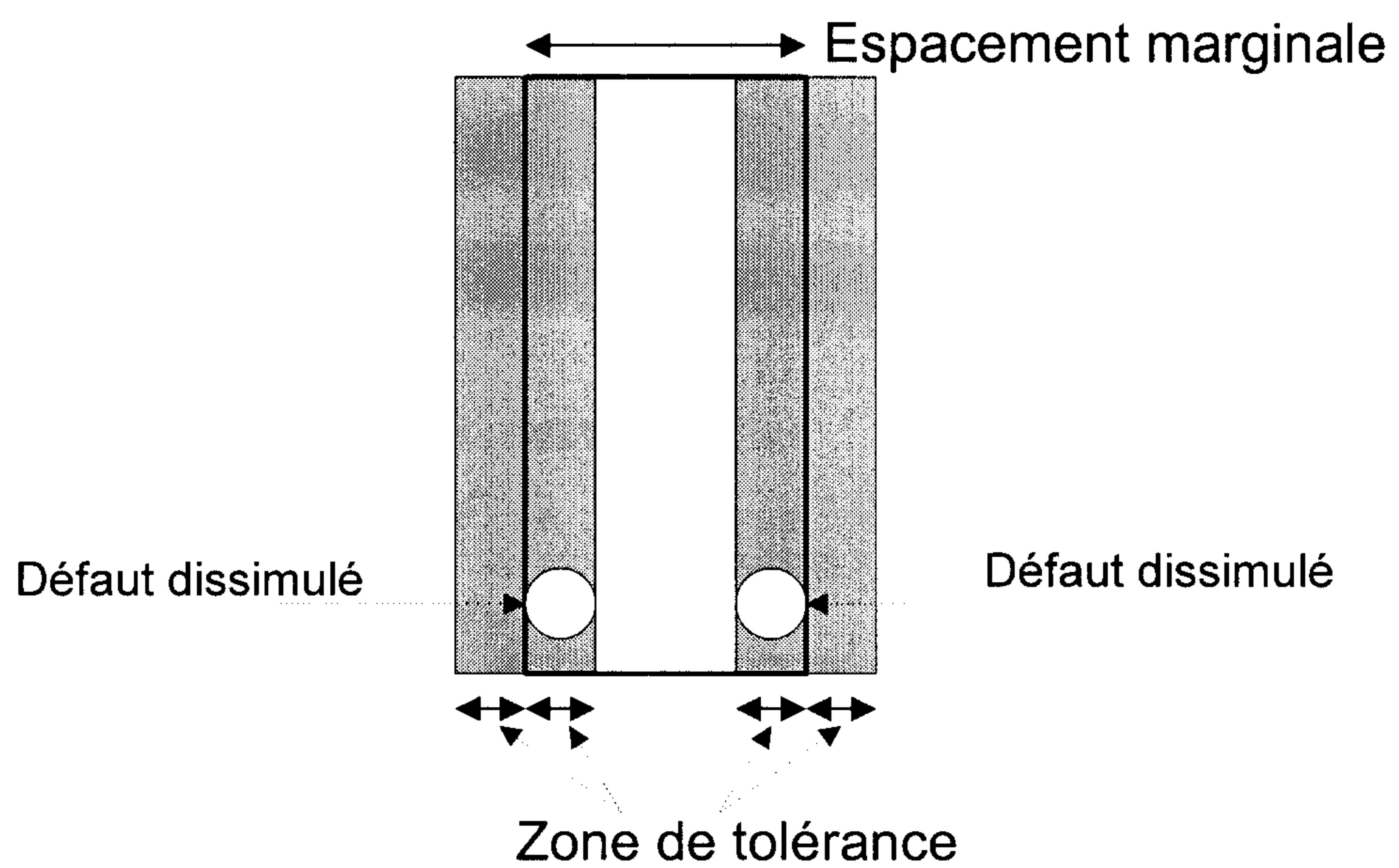


FIG 25 Région étroite

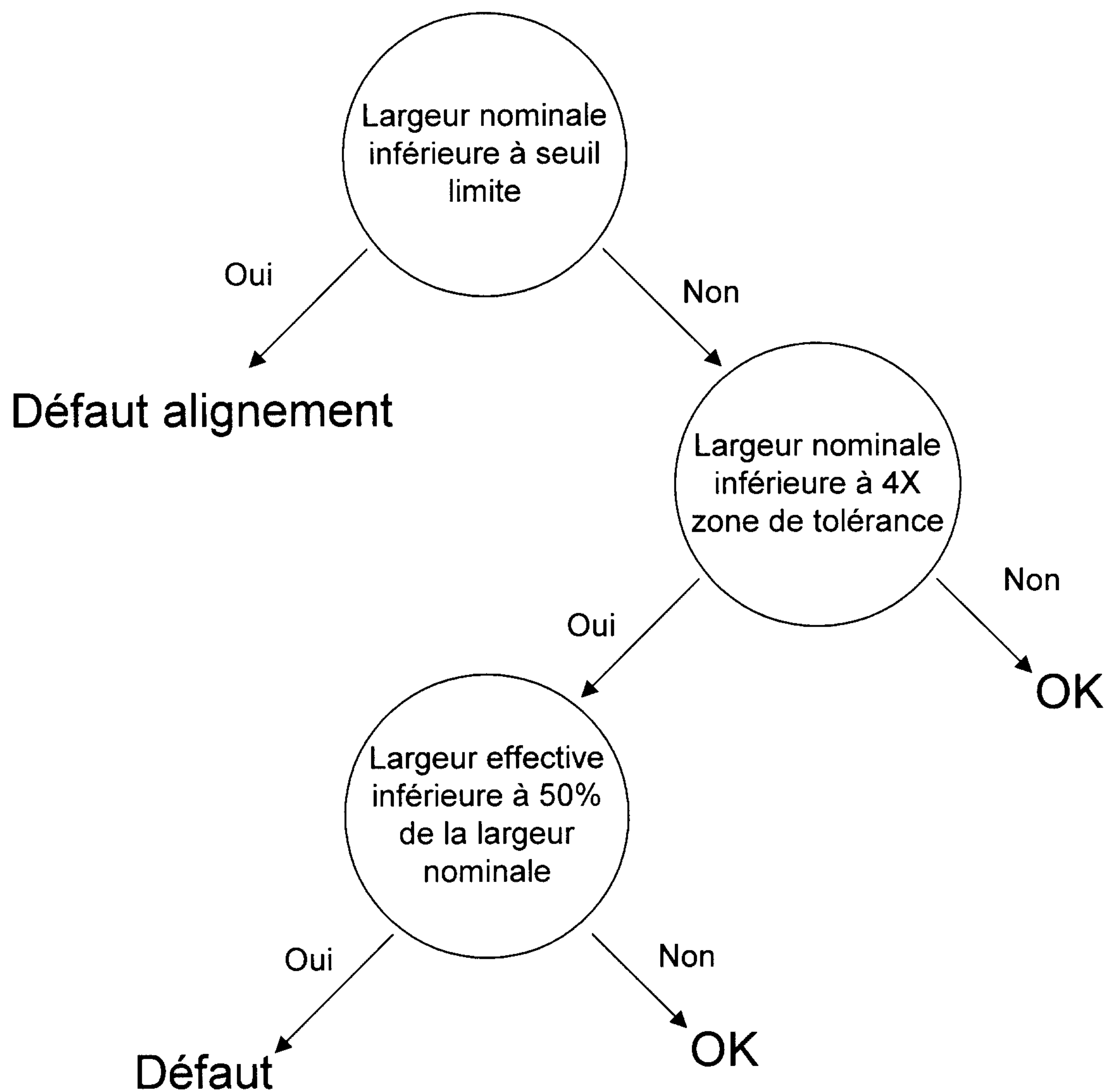


FIG 26 Arbre décisionnel pour région recouvrement

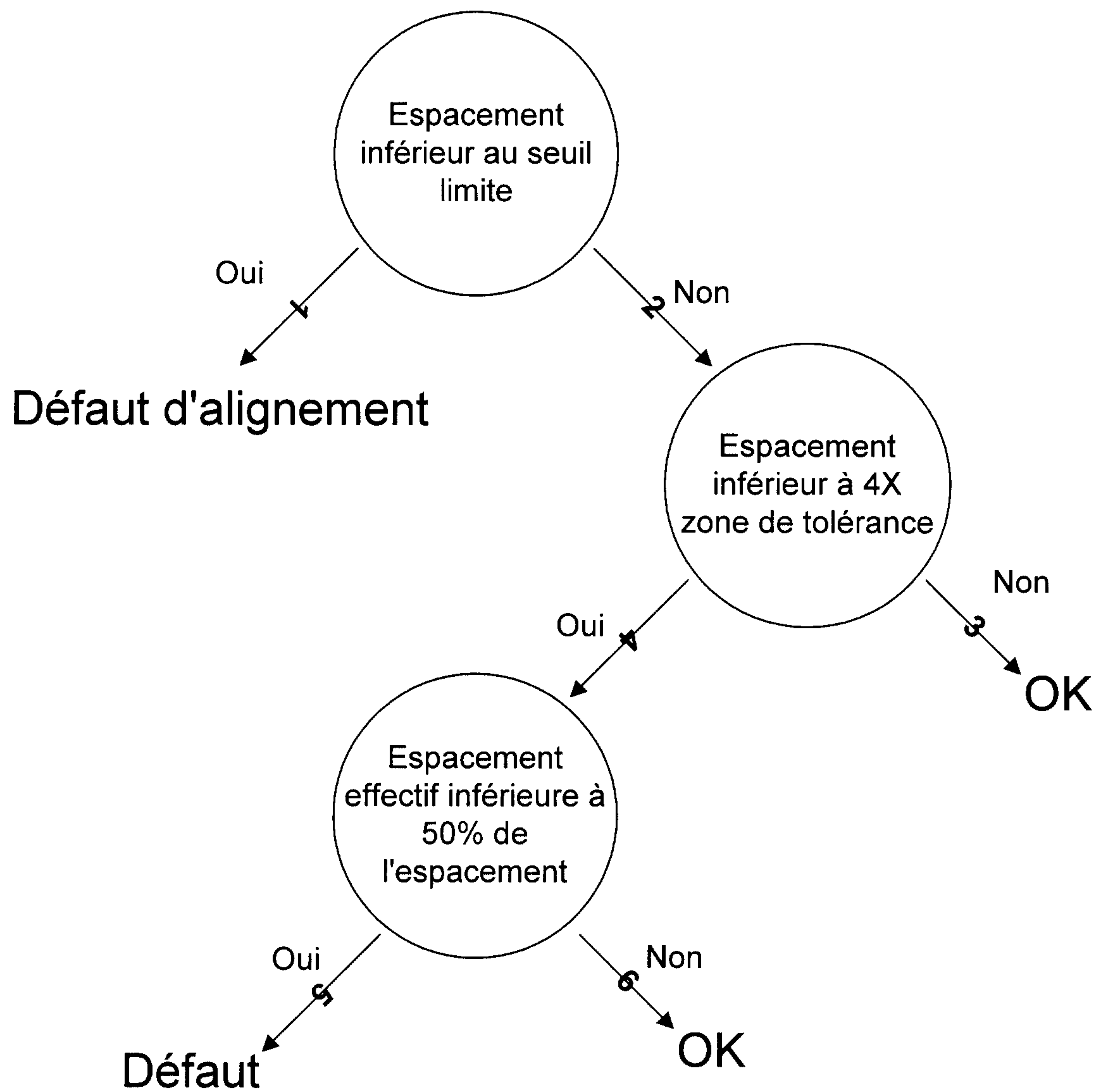


FIG 27 Arbre décisionnel pour les régions d'espacement étroites

LOCATION OF USE THE PROGRAMMABLE
TRANSPORTER PLATFORM - VERSION1 AND VERSION 2
/ Example plan view

- 1. - house main floor
/ part of it /
- 2. - garage
- 3. - driveway
- 4. - street
- 5. - power reel cord
- 6. - transporter
platform
- 7. - rail
- 8. - security stop
advice

