

ETUDE DES CARACTERISTIQUES TECHNIQUES ET ECONOMIQUES  
DES FILIERES D'INTERCONNEXIONS  
DES COMPOSANTS ELECTRONIQUES  
DANS LES SYSTEMES

**DENSITE ET SURFACE**  
**D'INTERCONNEXION**  
**D'UN SYSTEME DE COMPOSANTS**  
**ASSEMBLES SUR UN SUPPORT.**



# SOMMAIRE

<b>I. INTRODUCTION.....</b>	<b>5</b>
<b>II. LONGUEUR MOYENNE D’INTERCONNEXION <math>L_{PP}</math> .....</b>	<b>6</b>
II.A. LOI DE RENT .....	6
II.A.1. <i>Enoncé.....</i>	6
II.A.2. <i>Généralisation de la loi de Rent ⑦.....</i>	6
II.B. 1 <sup>ÈRE</sup> ESTIMATION DE LA LONGUEUR MOYENNE D’INTERCONNEXION ① .....	8
II.B.1. <i>Cas unidimensionnel.....</i>	8
II.B.2. <i>Cas bidimensionnel.....</i>	9
II.B.3. <i>Cas particulier d’un réseau carré.....</i>	9
II.C. 2 <sup>NDE</sup> ESTIMATION .....	10
II.D. 3 <sup>ÈME</sup> ESTIMATION ④ .....	12
II.E. 4 <sup>ÈME</sup> ESTIMATION ③ ⑨.....	13
<b>III. DENSITE D’INTERCONNEXION .....</b>	<b>14</b>
III.A. LONGUEUR TOTALE D’INTERCONNEXION .....	14
III.B. DENSITÉ D’INTERCONNEXION.....	15
<b>IV. CALCUL DE LA SURFACE D’INTERCONNEXION POUR UN RESEAU IDEAL DE COMPOSANTS .....</b>	<b>16</b>
IV.A. INTRODUCTION .....	16
IV.B. DENSITÉ DU SUBSTRAT .....	16
IV.C. CONTRAINTES SUR LE PAS P.....	17
IV.D. DENSITÉ D’INTERCONNEXION NÉCESSAIRE À UN SEUL COMPOSANT D .....	18
IV.E. AJUSTAGE DES DENSITÉS D ET $D_{EFF}$ .....	18
IV.F. CONCLUSION.....	19
<b>V. CALCUL DE LA SURFACE D’INTERCONNEXION POUR UN ENSEMBLE QUELCONQUE DE COMPOSANTS.....</b>	<b>19</b>
V.A. PRÉSENTATION DU PROBLÈME .....	19
V.B. 1 <sup>ÈRE</sup> MÉTHODE .....	20
V.C. 2 <sup>NDE</sup> MÉTHODE.....	21
V.D. ESTIMATION DE LA SURFACE TOTALE D’INTERCONNEXION À PARTIR DES SURFACES PARTIELLES $A_k$ (MÉTHODE 1).....	22
V.E. CALCUL DE LA GRANDEUR $\Delta S_k$ .....	24
V.F. CAS PARTICULIER DU « DOUBLE FACES ».....	25
V.G. HÉTÉROGÉNÉITÉ DE LA DENSITÉ D’INTERCONNEXION EXPLOITÉE DANS LE SUPPORT.....	26
V.H. INTERCONNEXIONS DE LA MASSE ET DES TENSIONS DE PUISSANCE.....	27
<b>VI. CONCLUSION.....</b>	<b>28</b>
<b>VII. BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>29</b>

## ANNEXES

**ANNEXE A:** SUPPORT POSSEDANT UNE PREMIERE COUCHE, PARTIELLEMENT UTILISABLE (INTERCONNEXION D'UN COMPOSANT (PA OU SGA)).

**ANNEXE B:** LONGUEUR MOYENNE D'INTERCONNEXION D'UN RESEAU 3D DE COMPOSANTS.

**ANNEXE C:** BILAN SUR L'ESTIMATION DE LA SURFACE D'INTERCONNEXION D'UN SYSTEME.

### TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURE I-1: DESCRIPTION D'UN RÉSEAU [3x4] DE COMPOSANTS (N = 12).	5
FIGURE II-1: ESTIMATION DU NOMBRE DE « WIRES » TRAVERSANT LA LIMITE DU SYSTÈME S <sub>1</sub> .	6
FIGURE II-2: $L_{pp}=F(R,2^L)$ .	8
FIGURE II-3: $[L_{pp}]=F(R,N)$ .	10
FIGURE II-4: 2 <sup>NDE</sup> ESTIMATION: $[L_{pp}]=F(R)$ POUR $0 < R < 0.5$ .	11
FIGURE II-5: 2 <sup>NDE</sup> ESTIMATION: $[L_{pp}]=F(R,N)$ AVEC $0.5 < R < 1$ .	12
FIGURE II-6: $[L_{pp}]=k.(1+0.1.LN(N)).N^{(R-0.5)}$ .	13
FIGURE II-7: $[L_{pp}]=0.8(1+0.1LN(N))N^{(1/6)}$ .	13
FIGURE III-1: EXEMPLE D'ÉQUIPOTENTIELLE (N <sub>F</sub> = 3).	14
FIGURE III-2: RAPPORT $F(N_F) = N_F/(N_F+1)$ .	15
FIGURE IV-1: RÉSEAU IDÉAL DE 9 COMPOSANTS IDENTIQUES.	16
FIGURE IV-2: SCHÉMA SYNOPTIQUE DE L'ESTIMATION D'UNE SURFACE D'INTERCONNEXION A.	18
FIGURE V-1: EXEMPLE D'UN ASSEMBLAGE QUELCONQUE DE COMPOSANTS.	19
FIGURE V-2: SCHÉMA SYNOPTIQUE DE LA 1 <sup>ERE</sup> MÉTHODE.	20
FIGURE V-3: SCHÉMA SYNOPTIQUE DE LA 2 <sup>NDE</sup> MÉTHODE.	22
FIGURE V-4: SURFACE D'INTERCONNEXION D'UN COMPOSANT.	22
FIGURE V-5: EXEMPLE D'UNE INADAPTATION DU SUPPORT.	23
FIGURE V-6: INFLUENCE DE LA DISPOSITION DES IOS SUR LA SURFACE D'INTERCONNEXION.	24
FIGURE V-7: EXEMPLE DE DISTRIBUTION RÉELLE DE LA DENSITÉ D'INTERCONNEXION SUR UN SUPPORT.	26

## I. INTRODUCTION

Le système étudié (Cf. figure I.1) est un réseau (2D) de  $N$  composants, sur un support quelconque de surface totale  $S$ . Les composants sont supposés, dans un premier temps, identiques (même nombre d'entrées / sorties  $N_{IO}$ ) et espacés les uns des autres de façon régulière (pas  $X$  et  $Y$ ). Soit  $A_{comp}$ , la surface d'interconnexion attribuable à un composant quelconque du réseau:

$$N.A_{comp} = S$$

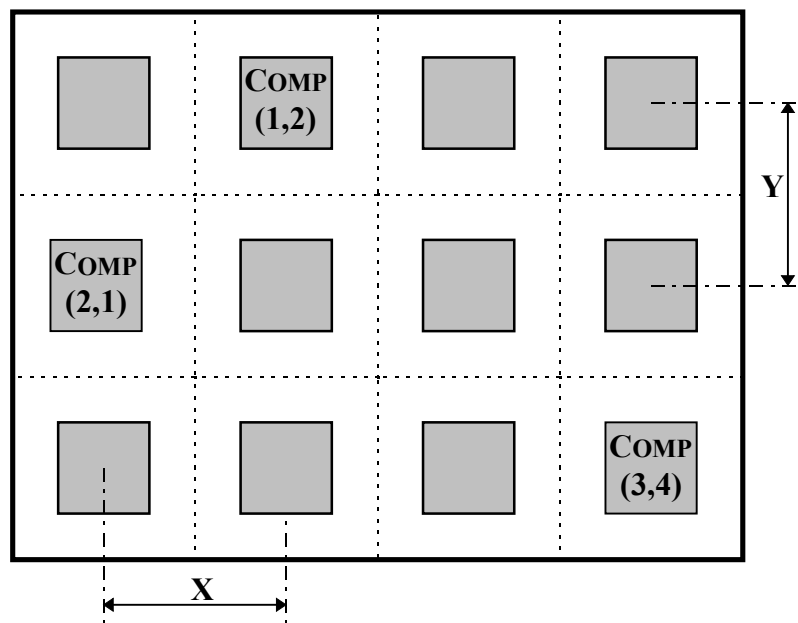


Figure I-1: Description d'un réseau [3x4] de composants ( $N = 12$ ).

Le nombre de composants sur une ligne est égal à  $2^L$ , tandis que sur une colonne,  $2^M$ .

Le but de cette étude est de déterminer la longueur d'interconnexion totale  $L_T$  afin de trouver la densité  $D$  et la surface d'interconnexion du système  $S$ . Par définition, ces deux grandeurs sont liées grâce à l'expression:

$$D = \frac{L_T}{S}$$

Le calcul de  $L_T$  nécessite la connaissance de la longueur moyenne d'interconnexion  $L_{pp}$  entre deux entrées / sorties. Différentes estimations, plus ou moins fiables, existent à ce jour.

Enfin, de façon plus générale, n'est il pas possible d'utiliser cette configuration particulière afin d'estimer la surface d'interconnexion d'un système quelconque.

## II. LONGUEUR MOYENNE D'INTERCONNEXION $L_{PP}$

### II.A. LOI DE RENT

#### II.A.1. ENONCE

Soit  $N_{\text{gates}}$  Le nombre de fonctions logiques élémentaires présentes dans une puce. La loi de Rent permet de donner une approximation du nombre d'entrées / sorties  $N_{IO}$  en fonction de  $N_{\text{gates}}$ :

$$N_{IO} = A \cdot N_{\text{gates}}^r$$

**A:** Nombre moyen de connexions sur une fonction logique élémentaire.

**r:** Coefficient de Rent (en général  $0 < r < 1$ ).

La loi de Rent peut s'étendre au niveau du package des composants. Si  $N_{IO}'$  est le nombre d'entrées / sorties du système précédent formé des  $N$  composants, alors il est possible d'écrire:

$$N_{IO}' = N_{IO} \cdot N^r = A \cdot (N_{\text{gates}} \cdot N)^r$$

Cette loi s'applique donc à la fois au circuit intégré et à son packaging. Quelques estimations de longueurs d'interconnexion qui suivent, ont été conçues initialement pour résoudre les problèmes de conception des circuits intégrés.

#### II.A.2. GENERALISATION DE LA LOI DE RENT ⑦

La loi de Rent peut être généralisée à la recherche du nombre de connexions traversant une frontière arbitraire (fermée) à l'intérieur de laquelle se trouve un ensemble d'éléments (Cf. figure II.1).

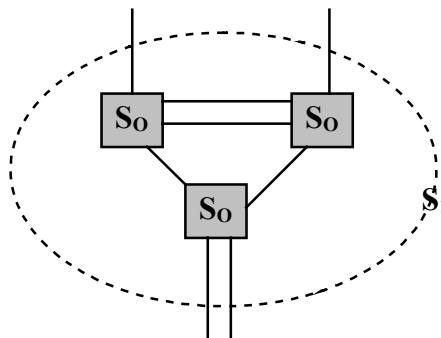


Figure II-1: Estimation du nombre de « wires » traversant la limite du système  $S_1$ .

$$P = P_0 \cdot N^r$$

**P:** Nombre de wires traversant la frontière du système  $S_1$ .

**N:** Nombre d'éléments  $S_0$  contenus dans  $S_1$ .

**$P_0$ :** Nombre d'I/O de chaque élément  $S_0$ .

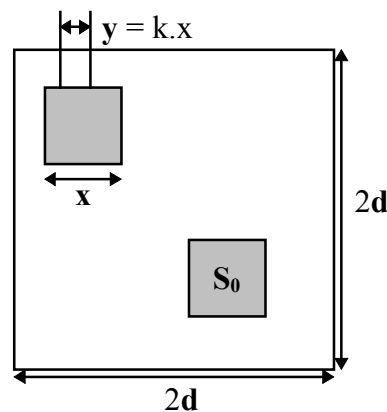
**r:** Coefficient de Rent (Constante comprise en général entre 0.5 et 0.7).

Il a été observé que dans tout système composé d'un ensemble de composants, ces derniers sont disposés dans l'espace d'une façon quasi-uniforme ⑦. Dans le cas d'un système 2D, une densité de composant  $\rho$  (supposée uniforme) est définie. De plus, il est supposé qu'une fraction  $\gamma$  de la surface totale est consommée par les composants. Ceux-ci sont considérés comme des carrés de côté  $x$ .

$$\gamma \cdot A_{\text{tot}} = N \cdot x^2 \text{ et } \rho = \frac{N}{A_{\text{tot}}}$$

soit:

$$x^2 = \frac{\gamma}{\rho}$$



L'étude qui suit s'applique au système représenté sur la figure précédente. Nous souhaitons calculer le nombre de connexions (*wires*) traversant le périmètre de longueur  $8d$ . Soit  $y = k \cdot x$  l'espacement moyen entre deux connexions adjacentes. Le nombre de composants  $N$  vérifie:

$$N = 4d^2 \cdot \rho$$

Le nombre maximum de I/O par élément est limité par le nombre de *wires* pouvant se connecter sur un seul élément:

$$P_0 = \frac{4x}{y} = \frac{4}{k}$$

Dans cette analyse, nous supposons qu'aucun routage ne peut occuper la même position qu'un des composants (pas d'interconnexion en dessous des composants). Cette approximation n'est pas appropriée pour des technologies comme les MCM et les PCB multicouches, cependant cette hypothèse n'affecte que quelques constantes multiplicatives, mais en aucun cas la forme générale des équations est critiquable.

Pour un positionnement aléatoire des composants, la probabilité qu'aucun point sur le périmètre ne figure à l'intérieur de la surface occupée par un composant est  $\gamma$ . Par conséquent, la quantité disponible sur la périmètre pour câbler vers l'extérieur du système est  $8d(1-\gamma)$ . Le nombre maximum de pistes est alors:

$$P = \frac{8d \cdot (1-\gamma)}{k \cdot x}$$

En combinant cette équation avec les trois précédentes, et celle exprimant  $x^2$  en fonction de  $\rho$ , il advient alors:

$$P = \frac{1-\gamma}{\gamma^{1/2}} \cdot P_0 \cdot N^{1/2}$$

Cette équation ressemble à l'expression conventionnelle de la loi de Rent. L'équivalence est obtenue en posant  $r = 0,5$  et  $\gamma \approx 0,38$  (environ 40% de la surface est occupée). Si le même raisonnement est utilisé en 3D, en posant:

$$y = k \cdot x^3 \text{ et } x^3 = \frac{\gamma}{\rho}$$

on a:

$$P = \frac{1-\gamma}{\gamma^{2/3}} \cdot P_0 \cdot N^{2/3}$$

$0.5 < r < 0.7$  est dû aux contraintes dimensionnelles de la technologie.

## II.B. 1<sup>ERE</sup> ESTIMATION DE LA LONGUEUR MOYENNE D'INTERCONNEXION ①

### II.B.1. CAS UNIDIMENSIONNEL

Pour un réseau unidimensionnel ( $M = 0$ ), l'expression de la longueur moyenne d'interconnexion  $L_{pp}^1$  entre deux I/O peut s'estimer de la façon suivante:

$$L_{pp}^1 = \frac{1-2^{r-1}}{1-2^{(r-1)L}} \cdot \frac{1-2^{rL}}{1-2^r} \cdot X$$

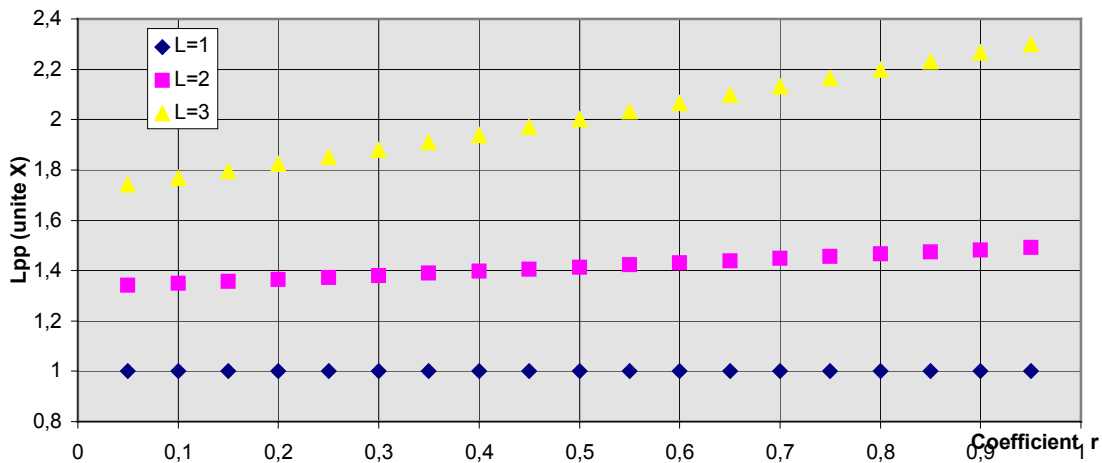
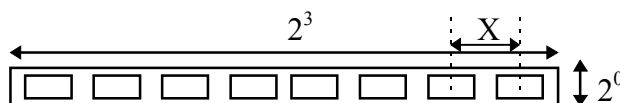


Figure II-2:  $L_{pp}=f(r,2^L)$ .

Exemple:  $L = 3$  et  $M = 0$ .



## II.B.2. CAS BIDIMENSIONNEL

La longueur moyenne d'interconnexion  $L_{pp}^2$  relative à un réseau de composants  $[2^L \times 2^M]$ , avec  $M \geq L$ , est estimée par:

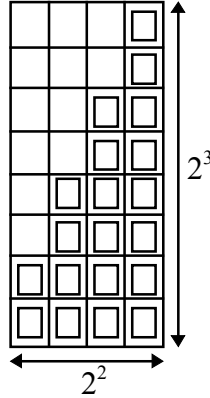
- Pour  $r \neq \frac{1}{2}$ :

$$L_{pp}^2 = \frac{1}{9} \cdot \frac{1 - 2^{2(r-1)}}{1 - 2^{2(r-1)M}} \cdot \left\{ 7 \cdot (X \cdot 2^{L-M} + Y) \cdot \frac{2^{(2r-1)M} - 1}{2^{(2r-1)} - 1} - (X \cdot 2^{M-L} + Y) \cdot \frac{1 - 2^{(2r-3)M}}{1 - 2^{(2r-3)}} \right\}$$

- Pour  $r = \frac{1}{2}$ :

$$L_{pp}^2 = \frac{1}{9} \cdot \frac{1 - 2^{2(r-1)}}{1 - 2^{2(r-1)M}} \cdot \left\{ 7 \cdot (X \cdot 2^{L-M} + Y) \cdot M - (X \cdot 2^{M-L} + Y) \cdot \frac{1 - 2^{(2r-3)M}}{1 - 2^{(2r-3)}} \right\}$$

Exemple:  $M = 3, L = 2$ .



Si  $M+1 \leq L$ , il est possible d'invertir  $L$  et  $M$  dans l'expression de  $L_{pp}^2$ .

## II.B.3. CAS PARTICULIER D'UN RESEAU CARRE

Dans le cas d'une configuration carrée, c'est à dire  $L = M$  et  $X = Y = P$ :

- Pour  $r \neq \frac{1}{2}$

$$L_{pp}^3 = \frac{2}{9} \cdot \frac{1 - 2^{2(r-1)}}{1 - 2^{2(r-1)M}} \cdot P \cdot \left\{ 7 \cdot \frac{2^{(2r-1)M} - 1}{2^{(2r-1)} - 1} - \frac{1 - 2^{(2r-3)M}}{1 - 2^{(2r-3)}} \right\}$$

- Pour  $r = \frac{1}{2}$

$$L_{pp}^3 = \frac{2}{9} \cdot \frac{1 - 2^{2(r-1)}}{1 - 2^{2(r-1)M}} \cdot P \cdot \left\{ 7 \cdot M - \frac{1 - 2^{(2r-3)M}}{1 - 2^{(2r-3)}} \right\}$$

**Remarque:** Cette expression peut être écrite en fonction du nombre de composants dans le réseau, c'est à dire  $N = 4^M$ .

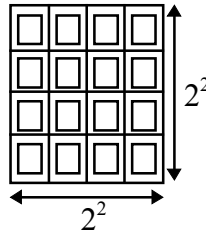
- Pour  $r \neq \frac{1}{2}$

$$L_{pp}^3 = \frac{2}{9} \cdot \frac{1 - 2^{2(r-1)}}{1 - N^{(r-1)}} \cdot P \cdot \left\{ 7 \cdot \frac{N^{(r-\frac{1}{2})} - 1}{2^{(2r-1)} - 1} - \frac{1 - N^{(r-\frac{3}{2})}}{1 - 2^{(2r-3)}} \right\}$$

- Pour  $r = \frac{1}{2}$

$$L_{pp}^3 = \frac{2}{9} \cdot \frac{1 - 2^{2(r-1)}}{1 - N^{(r-1)}} \cdot P \cdot \left\{ 7 \cdot \log_4(N) - \frac{1 - N^{(r-\frac{3}{2})}}{1 - 2^{(2r-3)}} \right\}$$

Exemple:  $M = L = 2$ .



Pour un nombre de composants très élevé, la longueur moyenne d'interconnexion peut s'estimer de la façon suivante (comportement asymptotique): ⑤

$$\begin{aligned} r > \frac{1}{2} & \quad L_{pp} \approx N^{r-\frac{1}{2}} \cdot P \\ r = \frac{1}{2} & \quad L_{pp} \approx \ln(N) \cdot P \\ r < \frac{1}{2} & \quad L_{pp} \approx g(r) \cdot P \end{aligned}$$

Dans le dernier cas,  $g$  est une fonction ne dépendant pas du nombre de composants  $N$ .

**Erreur! Objet incorporé incorrect.**

**Figure II-3:  $[L_{pp}] = f(r, N)$ .**

## II.C. 2<sup>NDE</sup> ESTIMATION

Les longueurs moyennes d'interconnexion  $[L_{pp}]$  qui suivent sont exprimées en unité de longueur  $P$ , c'est à dire le pas entre chaque composant dans le réseau.

➔ si  $r < 0.5$ :

$$\begin{aligned} [L_{pp}] &= -a(r) - \frac{2}{9} b(r) \\ b(r) &= \left( \frac{1 - 4^{r-1}}{4^{r-\frac{3}{2}} - 1} \right) \\ a(r) &= \frac{14}{9} \left( \frac{1 - 4^{r-1}}{4^{r-\frac{1}{2}} - 1} \right) \end{aligned}$$

Il est intéressant de noter que cette longueur moyenne d'interconnexion est indépendante du nombre de composants  $N$ . Une représentation graphique de cette expression est présente figure II.4.

↳ si  $r > 0.5$ :

$$[L_{pp}] = a(r) \cdot N^{r-\frac{1}{2}}$$

La longueur moyenne d'interconnexion pour  $r > 0,5$  est fonction du nombre de composants présentes dans le réseau. Cette dépendance à la fois au coefficient de Rent  $r$ , et du nombre de composants  $N$  est représentée graphiquement figure II.5.

↳ si  $r = 0.5$ :

La grandeur  $[L_{pp}]$  subit un changement radical au voisinage de  $r \approx 0,5$ : Les deux expressions précédentes ne sont pas continues en ce point. Il subsiste donc une incertitude au voisinage de cette valeur.

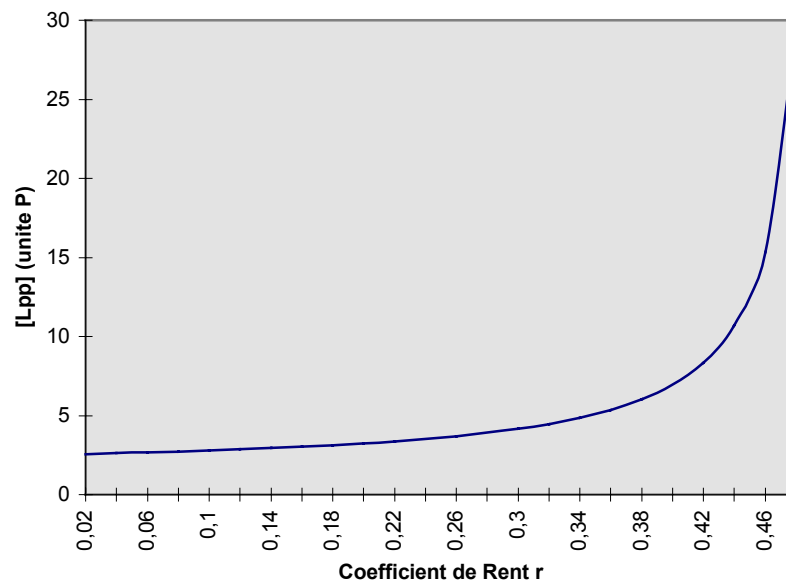


Figure II-4: 2<sup>nde</sup> Estimation:  $[L_{pp}] = f(r)$  pour  $0 < r < 0,5$ .

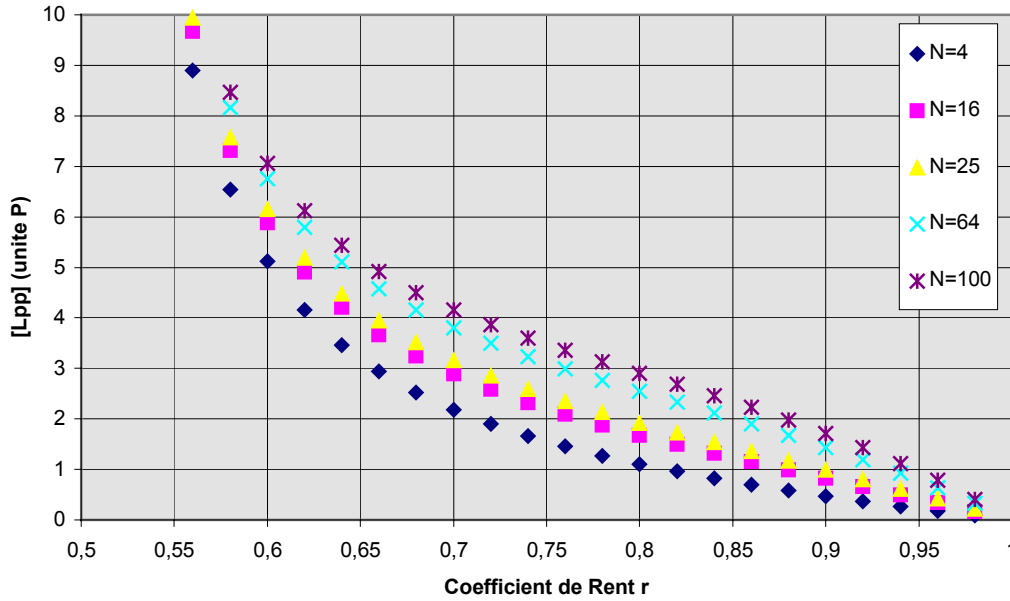


Figure II-5: 2<sup>nde</sup> Estimation:  $[L_{pp}] = f(r, N)$  avec  $0.5 < r < 1$ .

Cette estimation de la longueur d'interconnexion n'apporte pas de résultats semblables aux autres (Cf. courbes). De plus la discontinuité en  $r = 0,5$  conduit à des valeurs de longueurs moyennes incohérentes, au voisinage de ce point. C'est pourquoi, cette estimation est exclue dans la suite de notre étude.

#### II.D. 3<sup>EME</sup> ESTIMATION ④

Des études provenant de chez IBM ont indiqué que la longueur moyenne d'interconnexion entre deux entrées / sorties était proportionnelle à la distance séparant deux composants adjacents (pas **P**). Cette grandeur s'écrit alors:

$$L_{pp} = R \cdot P$$

De plus, une approximation de cette longueur peut être obtenue en égalant la constante de proportionnalité **R** à 1,5. Cette estimation conduit à l'expression de la longueur totale d'interconnexion de D. SERAPHIM (IBM) (Cf. partie III).

## II.E. 4<sup>EME</sup> ESTIMATION ⑧ ⑨

Une autre estimation de la longueur moyenne d'interconnexion, élaborée par MIKHAIL, s'écrit de la façon suivante:

$$[L_{pp}] = k.(1 + 0,1.\ln(N)).N^{r-\frac{1}{2}}$$

avec:

**[L<sub>pp</sub>]**: Longueur moyenne d'interconnexion exprimée en pas **P**.

**k**: Constante comprise entre 0.6 et 1.0 (≈0.8 pour les PCB).

**N**: Nombre de cellules (composants) à interconnecter.

**r**: Coefficient de Rent.

Cette expression est représentée graphiquement sur la figure II.6.

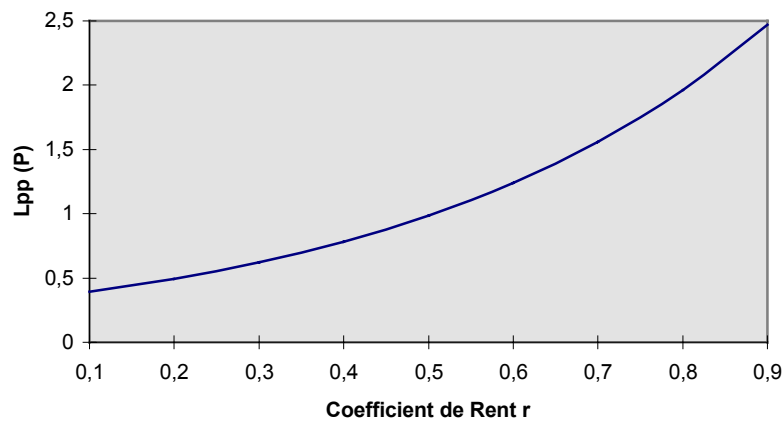


Figure II-6:  $[L_{pp}] = k.(1 + 0,1.\ln(N)).N^{(r-0,5)}$ .

**Remarque:** Cette équation est généralement utilisée avec le coefficient de Rent  $r = 2/3$ . C'est à dire:

$$[L_{pp}] = 0,8.(1 + 0,1.\ln(N)).N^{1/6}$$

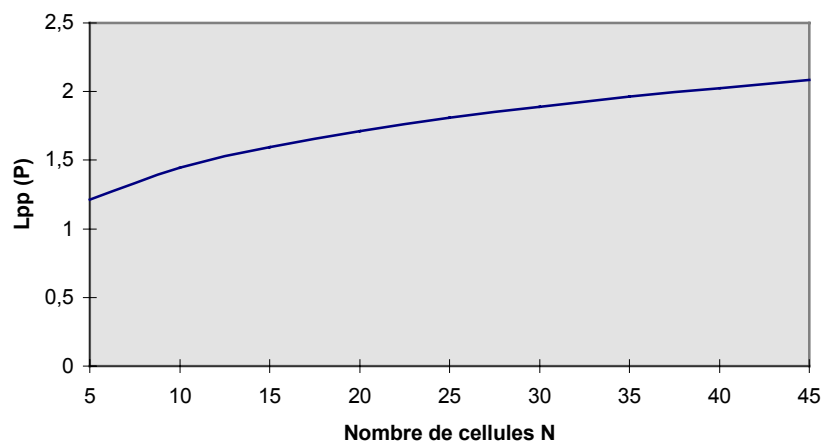


Figure II-7:  $[L_{pp}] = 0,8(1 + 0,1\ln(N))N^{(1/6)}$ .

### III. DENSITE D'INTERCONNEXION

#### III.A. LONGUEUR TOTALE D'INTERCONNEXION

Soit  $N_f+1$ , le nombre moyen de noeuds étant connectés les uns avec les autres électriquement, c'est à dire appartenant à la même équipotentielle (1 entrée et  $N_f$  sorties) (Cf. figure III.1).

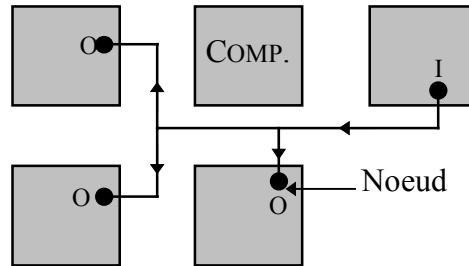


Figure III-1: Exemple d'équipotentielle ( $N_f = 3$ ).

Si chaque composant dispose d'un nombre  $N_{IO}$  d'entrées / sorties, le nombre d'équipotentiels  $N_{equi}$  présents dans le système des  $N$  composants s'écrit:

$$N_{equi} = \frac{N \cdot N_{IO}}{N_f + 1}$$

La longueur totale d'interconnexion  $L_T$  peut s'exprimer de la façon suivante:

$$L_T = N_{equi} \cdot N_f \cdot L_{pp}$$

soit:

$$L_T = N \cdot N_{IO} \cdot \frac{N_f}{N_f + 1} \cdot L_{pp}$$

D. SERAPHIM (IBM) a réduit cette équation en considérant que la longueur moyenne d'interconnexion  $L_{pp} = 1,5 \cdot P$  et que  $N_f \approx 3$  (En général, l'hypothèse  $N_f \approx 3$  est utilisée, mais il est possible de trouver des valeurs de  $N_f$  beaucoup plus élevées). Il advient:

$$L_{tot} = \frac{9}{8} N \cdot N_{IO} \cdot P$$

avec:

**P**: Pas entre deux composants adjacents.

**N**: Nombre de composants dans le système.

**$N_{IO}$** : Nombre d'entrées / sorties par composant.

### III.B. DENSITE D'INTERCONNEXION

La densité d'interconnexion **D** s'écrit:

$$D = \frac{L}{S} = N_{IO} \cdot \frac{N_f}{N_f + 1} \cdot \frac{L_{pp}}{A_{comp}}$$

Sachant que lorsque **P** est la distance séparant deux composants adjacents (**X = Y = P**), la surface d'interconnexion occupée par chaque composant est:

$$A_{comp} = P^2$$

La densité **D** peut donc se simplifier de la façon suivante:

$$D = N_{IO} \cdot \frac{N_f}{N_f + 1} \cdot \frac{[L_{pp}]}{P}$$

avec:

**[L<sub>pp</sub>]**: Longueur moyenne d'interconnexion exprimée en pas P.

**N<sub>IO</sub>**: Nombre d'entrées / sorties disponibles sur chaque composant (Attention, les connexions de masse et de puissance ne sont pas prises en compte).

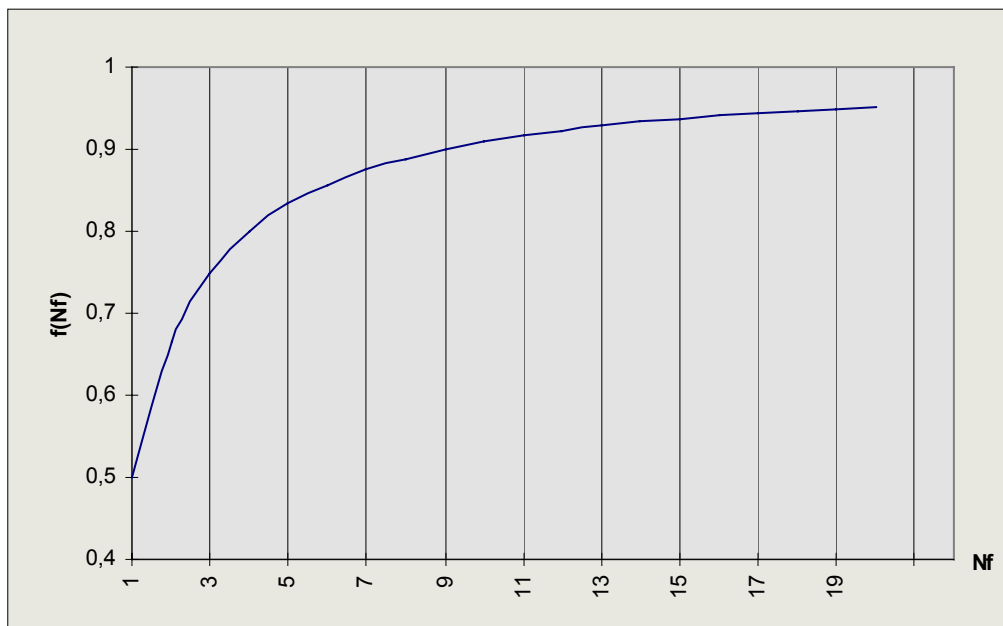


Figure III-2: Rapport  $f(N_f) = N_f/(N_f+1)$ .

**Remarque:** Il est possible d'écrire la densité d'interconnexion sous la forme (estimation n°3):

$$D = \alpha \cdot \frac{N_{IO}}{P}$$

*Exemple:* Densité de D. SERAPHIM (IBM):

$$D = \frac{9}{8} \cdot \frac{N_{IO}}{P}$$

## IV. CALCUL DE LA SURFACE D'INTERCONNEXION POUR UN RESEAU IDEAL DE COMPOSANTS

### IV.A. INTRODUCTION

Lorsque un ensemble de composants doit être assemblé sur un même support, une grande quantité d'interconnexion est à mettre en place. Afin d'estimer la surface d'interconnexion nécessaire pour connecter tous ces composants, il est indispensable d'évaluer la longueur moyenne d'interconnexion entre deux IOs. Dans certains systèmes dits idéaux, cette évaluation est possible.

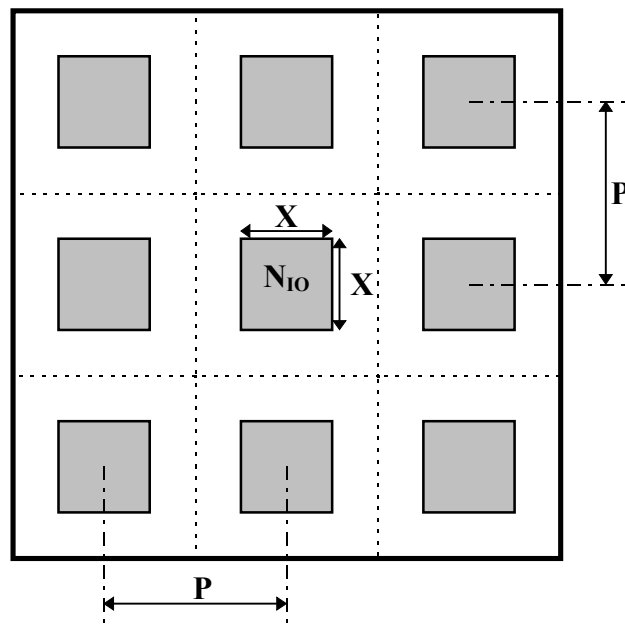


Figure IV-1: Réseau idéal de 9 composants identiques.

Un réseau est considéré idéal lorsque celui-ci est carré, ordonné (pas **P**), et constitué de **N** composants identiques (même dimensions **X** et même nombre d'entrées / sorties **N<sub>IO</sub>**). Un exemple de réseau idéal est représenté figure IV.1.

### IV.B. DENSITE DU SUBSTRAT

Soit **D<sub>ultime</sub>**, la densité ultime, c'est à dire la densité maximale que peut supporter le substrat sur lequel les composants sont assemblés. Cette densité peut être calculée de façon simple (elle dépend de la classe utilisée pour l'assemblage):

$$D_{ultime} = \frac{N_c \cdot N_{pistes}}{P_{vias}}$$

avec:

**N<sub>c</sub>**: Nombre de couches (signaux).

**P<sub>vias</sub>**: Distance minimum séparant deux *vias* adjacents.

**N<sub>pistes</sub>**: Nombre de pistes pouvant passer entre ces deux précédents *vias*.

Cependant cette densité ultime ne peut être atteinte réellement. En effet, même les meilleurs logiciels de routage n'atteignent qu'une portion  $\eta$  de cette densité. Soit  $D_{\text{eff}}$ , la densité maximale pouvant être effectivement utilisée (nommée densité effective):

$$D_{\text{eff}} = \eta \cdot D_{\text{ultime}}$$

$\eta$  est compris entre 0.7 et 0.4 (environ).

Les valeurs de  $\eta$  sont (⊙):

- $\eta = 0.65$  (Routage manuel).
- $\eta = 0.55$  (Routage automatique A).
- $\eta = 0.40$  (Routage automatique B).

#### IV.C. CONTRAINTES SUR LE PAS P

Le pas  $P$  étant la distance séparant deux composants adjacents, il est possible d'écrire:

$$P = X + 2\delta$$

avec:

$\delta$ : Epaisseur de la bande d'interconnexion entourant chaque composant.

La grandeur  $\delta$  ne peut être nulle, car il existe des contraintes physiques qui imposent une distance minimale  $2\delta_{\text{min}}$  dans la séparation de deux composants adjacents:

##### ◆ Contrainte mécanique:

Pour disposer les composants sur leur support, une zone d'assemblage autour de chaque composant est à prendre en compte. Soit  $\beta$ , la grandeur symbolisant cette contrainte mécanique:

$$\delta > \delta_M = \beta \cdot X$$

##### ◆ Contrainte thermique:

Lorsqu'un ensemble de composants est assemblé sur un même support, les dissipations thermiques sont généralement importantes. C'est pourquoi, une bonne évacuation des calories produites par chaque composant, est nécessaire au bon fonctionnement du système. Une surface minimale d'interconnexion est alors définie afin d'éviter tout problème de surchauffe:

$$P^2 > \frac{\Psi}{Q} \text{ soit } \delta > \delta_T$$

avec:

$\Psi$ : Puissance dissipée par un composant (W)

$Q$ : Quantité de chaleur pouvant être évacuée par unité de surface ( $W \cdot \text{cm}^{-2}$ )

En conclusion, la distance  $\delta$  doit satisfaire les contraintes mécanique et thermique, c'est à dire:

$$\delta > \delta_{\text{min}} = \min\{\delta_M, \delta_T\}$$

**IV.D. DENSITE D’INTERCONNEXION NECESSAIRE A UN SEUL COMPOSANT D**

D’après ce qui précède, la densité d’interconnexion d’un composant s’écrit de la façon suivante:

$$D = N_{IO} \cdot \frac{N_f}{N_f + 1} \cdot \frac{[L_{pp}]}{P}$$

avec:

$[L_{pp}]$ : Longueur moyenne d’interconnexion (exprimée en pas P), dépendant de  $r$  et  $N$ .

$r$ : Coefficient de Rent.

$N$ : Nombre de composants présents dans le réseau.

$N_{IO}$ : Nombre d’entrées / sorties disponibles sur chaque composant.

$N_f$ : Nombre de sorties associées à une même entrée (équipotentielle).

Cette densité est donc de la forme:

$$D = \frac{f(N_{IO}, N_f, N, r)}{P}$$

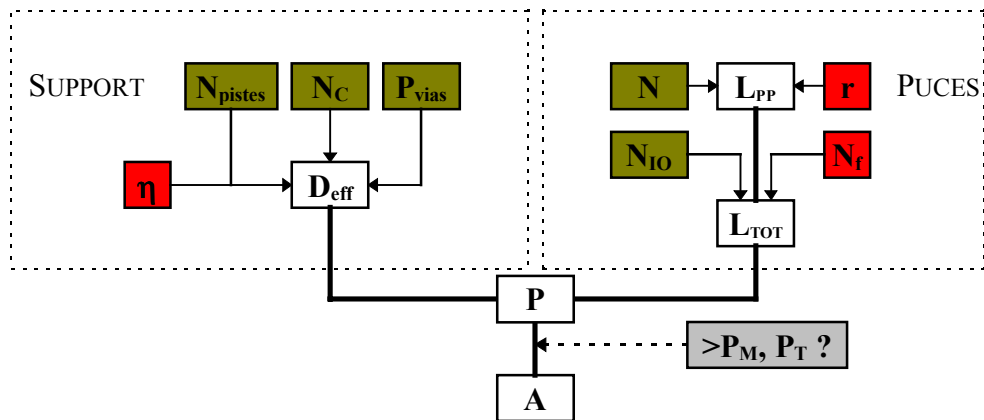
**IV.E. AJUSTAGE DES DENSITES D ET D<sub>EFF</sub>**

Lors de l’assemblage du composant sur son support, la densité d’interconnexion  $D$  doit être identique à celle disponible sur le substrat  $D_{eff}$ , c’est à dire:

$$D_{eff} = \frac{f(N_{IO}, N_f, N, r)}{P}$$

Par conséquent, il est possible d’en déduire la distance  $P$  séparant deux composants adjacents, et donc la surface d’interconnexion de chaque composant c’est à dire  $P^2$ . Il faut cependant tenir compte des contraintes existant sur la grandeur  $P$ :

$$P > X + 2\delta_{min}$$



**Figure IV-2: Schéma synoptique de l'estimation d'une surface d'interconnexion A.**

#### IV.F. CONCLUSION

A partir de la technologie utilisée dans l'assemblage des composants (c'est à dire la classe), il est possible de calculer la densité effective  $D_{\text{eff}}$  du substrat. Les paramètres  $N_{\text{IO}}$ ,  $N_f$ ,  $N$ ,  $r$  permettent d'obtenir la longueur totale d'interconnexion en unité de longueur  $P$ . Lorsque ces deux résultats sont associés, c'est à dire lorsque cette quantité d'interconnexion est appliquée sur le substrat possédant une densité  $D_{\text{eff}}$ , nous aboutissons à la surface d'interconnexion utilisée par chaque composant.

### V. CALCUL DE LA SURFACE D'INTERCONNEXION POUR UN ENSEMBLE QUELCONQUE DE COMPOSANTS

#### V.A. PRESENTATION DU PROBLEME

L'étude se porte cette fois sur l'assemblage d'un ensemble de composants, de la manière la plus générale possible. Soit  $N$  composants quelconques, disposés sur un substrat de façon désordonnée (Cf. figure V.1).

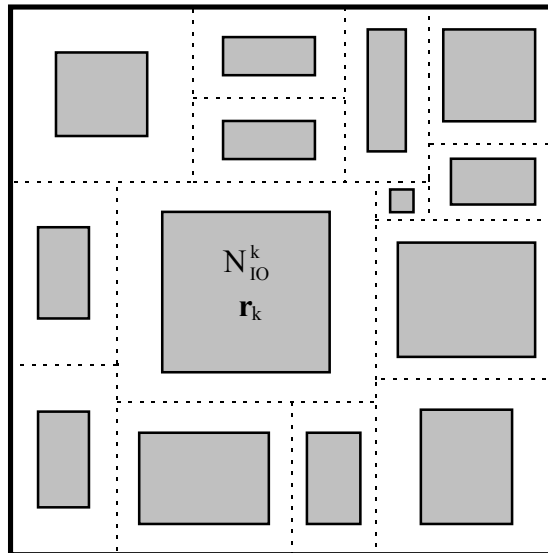


Figure V-1:Exemple d'un assemblage quelconque de composants.

Les éléments sont numérotés de 1 à  $N$ , tels que le composant  $k$  est associé à un nombre d'IOs  $N_{\text{IO}}^k$  et au coefficient de Rent  $r_k$ . Le nombre total d'entrées / sorties présentes dans le système est noté  $N_{\text{IO}}^{\text{tot}}$  et s'exprime facilement de la façon suivante:

$$N_{\text{IO}}^{\text{tot}} = \sum_{k=1}^N N_{\text{IO}}^k$$

La surface d'interconnexion de chaque composant étant l'objectif de cette étude, il serait avantageux de pouvoir utiliser les résultats théoriques relatifs au réseau idéal précédent. C'est pourquoi, trouver une équivalence entre celui-ci et notre système permettrait d'aboutir à des solutions relativement simples pour les surface d'interconnexion.

### V.B. 1<sup>ERE</sup> METHODE

Le composant n°**k** dispose de  $N_{IO}^k$  entrées/sorties. Elle est donc entourée de  $N_{IO}^{tot} - N_{IO}^k$  IOs. Une première méthode pour calculer la surface d'interconnexion de ce composant **k**, consiste à créer un système idéal équivalent, respectant le nombre d'IOs entourant celui-ci. Soit  $N_{eq}$ , le nombre total de composants (identiques au composant **k**) dans le système équivalent, et  $N_{IO}^{eq}$ , le nombre d'IOs que possèdent chacune d'elles (c'est à dire, ici,  $N_{IO}^k$ ).

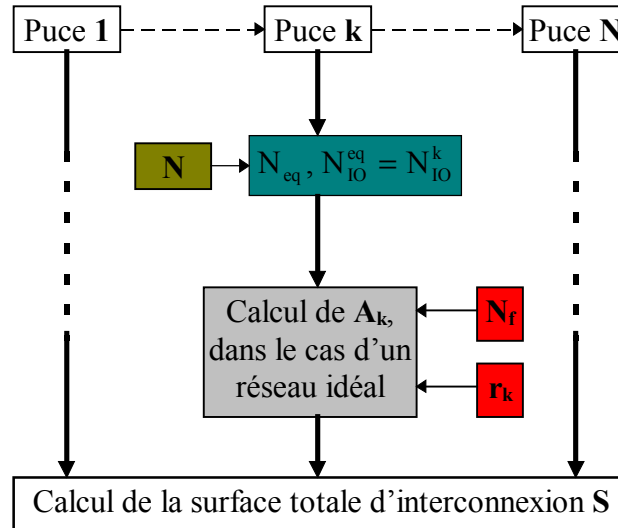


Figure V-2: Schéma synoptique de la 1<sup>ere</sup> méthode.

L'équivalence est vérifiée lorsque:

$$N_{eq} \cdot N_{IO}^{eq} = N_{IO}^{tot}$$

soit:

$$N_{eq} = \frac{N_{IO}^{tot}}{N_{IO}^k}$$

Une fois que le système équivalent est défini ( $N_{eq}$ ,  $r_k$ ,  $N_{IO}^k$ ) et que les caractéristiques techniques du substrat sont évaluées ( $D_{eff}$ ), il est possible de calculer la surface d'interconnexion  $A_k$  du composant **k**, dans ce réseau idéal, telle que:

$$A_k = \left( \frac{f(N_{IO}^k, r_k, N_{eq}, N_f)}{D_{eff}} \right)^2$$

avec:

**f**: Fonction intervenant dans le calcul de la longueur d'interconnexion, à l'intérieur du réseau idéal des  $N_{eq}$  composants.

**N<sub>f</sub>**: Nombre de sorties associées à une même entrées (Grandeur variant selon la technologie).

Enfin, une fois que la surface d'interconnexion du composant **k** est trouvée, le même raisonnement est appliqué à tous les autres du système étudié (**k** compris entre 1 et **N**). Lorsque toutes les surfaces d'interconnexion sont calculées, la surface totale d'interconnexion **S** du système devient:

$$S = \sum_{k=1}^N A_k$$

Il est fort possible que cette somme de surfaces soit un peu trop simpliste, pour fournir effectivement la surface totale d'interconnexion. Le passage des surfaces  $A_k$  à la surface  $S$  est expliqué dans une partie ultérieure.

REMARQUE: Chaque surface d'interconnexion  $A_k$  doit satisfaire les contraintes mécanique et thermique, explicitées précédemment.

### V.C. 2<sup>NDE</sup> METHODE

Cette fois le système étudié est analysé en un seul bloc, mais des modifications lui sont apportées afin de satisfaire les critères d'un réseau idéal de composants: Une moyenne des  $N_{IO}^k$  pour  $k$  allant de 1 à  $N$  est réalisée. Cette valeur moyenne  $\langle N_{IO} \rangle$  correspond au nombre de IOs de chaque composant du réseau idéal. Le coefficient de Rent connaît le même processus:  $\langle r \rangle$  est attribué à tous les composants du système équivalent.

Nous avons donc:

$$\langle N_{IO} \rangle = \frac{\sum_{k=1}^N N_{IO}^k}{N}$$

et

$$\langle r \rangle = \frac{\sum_{k=1}^N N_{IO}^k \cdot r_k}{N \cdot \langle N_{IO} \rangle}$$

Le réseau équivalent (idéal) possède donc les paramètres suivants:

- $N_{eq} = N$ .
- $N_{IO}^{eq} = \langle N_{IO} \rangle$ .
- $r_{eq} = \langle r \rangle$ .

La surface totale d'interconnexion  $S$  est calculée de la même façon que dans la méthode précédente. Son expression vérifie:

$$S = N \cdot \left( \frac{f(\langle N_{IO} \rangle, \langle r \rangle, N_{eq}, N_f)}{D_{eff}} \right)^2$$

Cette méthode ne donne que la surface d'interconnexion de l'ensemble du système, contrairement à la première qui apportait une estimation de la surface d'interconnexion de chaque composant présent dans le système. Les résultats fournis par ce procédé sont assez éloignés de la réalité.

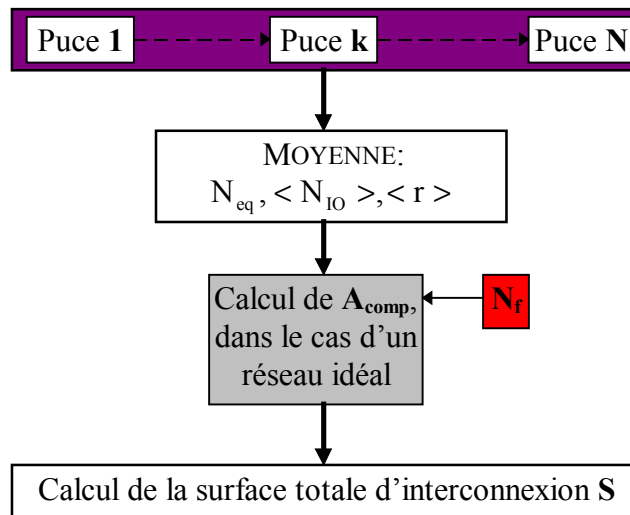


Figure V-3: Schéma synoptique de la 2<sup>nd</sup>e méthode.

**V.D. ESTIMATION DE LA SURFACE TOTALE D'INTERCONNEXION A PARTIR DES SURFACES PARTIELLES A<sub>k</sub> (METHODE 1)**

La méthode 1, nous l'avons vu, estime la surface d'interconnexion partielle de chaque composant A<sub>k</sub>. Lorsque la totalité de ces surfaces est connue, il survient le problème du calcul de la surface totale d'interconnexion S. Celle-ci peut se restreindre à la somme des surfaces partielles, mais dans ce cas, des erreurs peuvent apparaître dues à la surface totale minimale imposée par les contraintes mécanique et thermique.

En effet, il est évident que la surface d'interconnexion requise par un composant ne peut être inférieure à la surface de ce même composant. De plus, des contraintes existent sur les distances inter-composants, il advient alors que:

$$A_k \geq A_{min} = x \cdot y + \sigma_k$$

avec:

x, y: Dimensions du composant.

σ<sub>k</sub>: Contraintes sur la surface du composant.

Cependant, il peut arriver que la surface d'interconnexion estimée pour un composant ne vérifie pas cette précédente relation (Cf. figure V.4). Il en résulte alors une surface inexploitée par le composant en dessous de celui-ci.

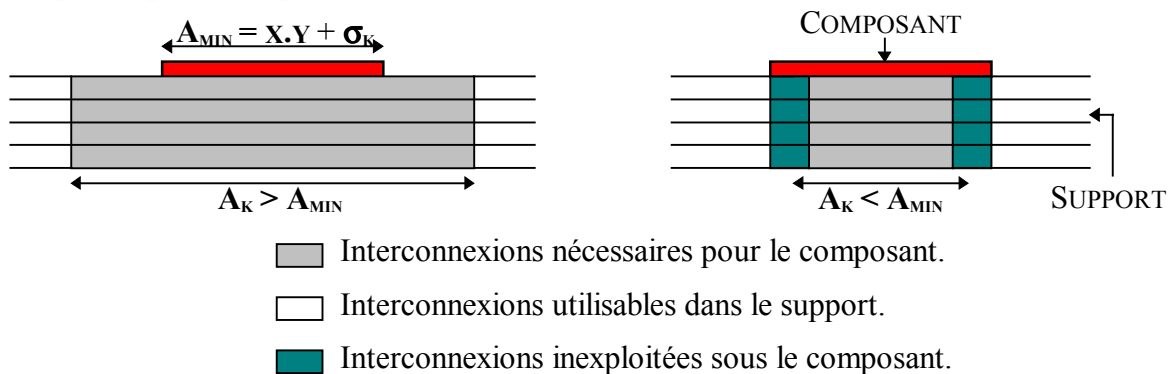


Figure V-4: Surface d'interconnexion d'un composant.

Afin d'exploiter au mieux les performances du support lors de l'assemblage de tous les composants, il faut pouvoir réutiliser ces surfaces inexploitées. Dans ce but, de nouvelles grandeurs sont introduites:

- $\Delta S_k$ : Surface d'interconnexion d'un composant placée dans un nouveau repère dont l'origine est la surface minimale de ce même composant.

$$\Delta S_k = (A_k - (A_{\min})_k) \text{ et } \Delta S = \sum_{k=1}^N \Delta S_k$$

$\Delta S_k > 0$ : Le composant consomme une surface d'interconnexion excédentaire par rapport à la surface minimale de celui-ci.

$\Delta S_k < 0$ : Le composant stocke une surface d'interconnexion disponible sous la surface minimale de celui-ci.

- $A_{\min}$ : Surface totale d'interconnexion minimale, du système constitué de  $N$  composants.

$$A_{\min} = \sum_{k=1}^N (A_{\min})_k$$

Avec ces notations, la surface totale d'interconnexion (optimisant au maximum les capacités du support), peut s'exprimer de la façon suivante:

$$S = A_{\min} + \Delta S \quad \text{si } \Delta S > 0$$

#### Remarque:

Si  $\Delta S < 0$ , la surface totale d'interconnexion  $S$  est alors égale à celle minimale, c'est à dire,  $A_{\min}$ . Le système n'est donc pas optimisé, car il existe des surfaces du support, partiellement ou totalement inexploitées. Cette situation apparaît, évidemment lorsque la densité effective du support est trop importante pour le type d'assemblage envisagé: Par exemple, quelques composants passifs (2 IOs) sur un support de plusieurs couches).

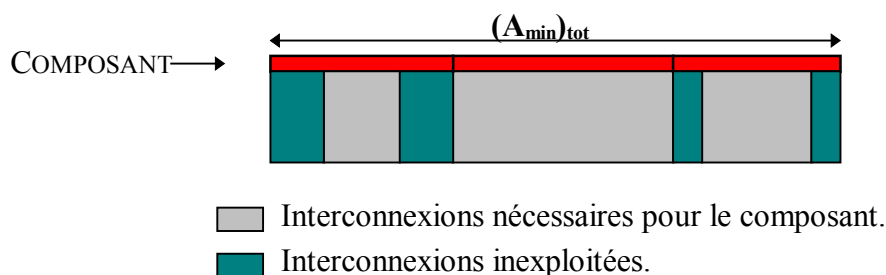


Figure V-5: Exemple d'une inadaptation du support.

### V.E. CALCUL DE LA GRANDEUR $\Delta S_k$

Soit un composant  $k$  de surface minimale  $(A_{\min})_k$  et de surface d'interconnexion  $A_k = P^2$ . Plusieurs situations se présentent à nous:

- Si  $A_k > (A_{\min})_k$ :

$$\Delta S_k = (A_k - (A_{\min})_k) > 0$$

La grandeur  $\Delta S_k$  est alors positive. Le composant consomme une surface  $\Delta S_k$  en plus de sa propre surface minimale.

- Si  $A_k = (A_{\min})_k$ :

$$\Delta S_k = 0$$

- Si  $A_k < (A_{\min})_k$ :

➤ Dans une configuration G.A. (Grid Array):

$$\Delta S_k = (A_k - (A_{\min})_k) < 0$$

➤ Dans une configuration P.A. (Peripheral Array):

Si  $x.y > A_k$ :

$$\Delta S_k = \left( \frac{N_c - 1}{N_c} \right) \cdot (A_k - (A_{\min})_k) + \frac{1}{N_c} (x.y - (A_{\min})_k) < 0$$

Si  $x.y \leq A_k$ :

$$\Delta S_k = (A_k - (A_{\min})_k) < 0$$

(La première couche est partiellement inexploitable (Densité nulle), car les IOs sont disposées sur la périphérie du composant (Cf. figure V.6).)

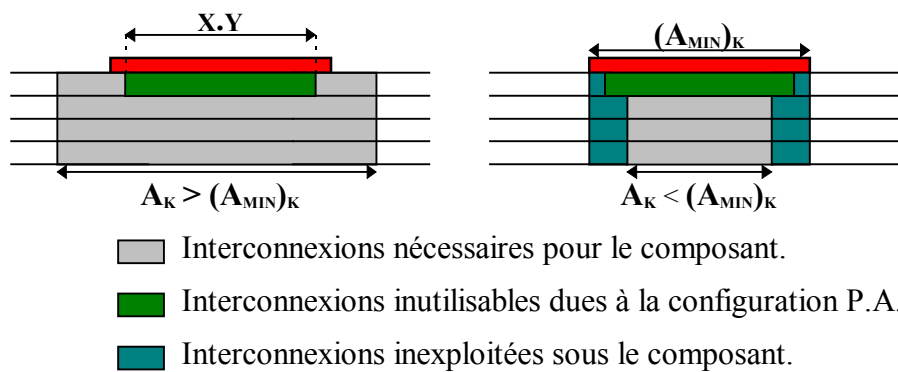


Figure V-6: Influence de la disposition des IOs sur la surface d'interconnexion.

### V.F. CAS PARTICULIER DU « DOUBLE FACES »

Le « double faces » permet l'assemblage de composants au recto et au verso d'un même support. Cette configuration apporte principalement deux modifications par rapport au support « simple face »:

➔ La surface minimale, totale, d'interconnexion  $(A_{\min})_{\text{tot}}$  devient:

$$(A_{\min})_{\text{tot}} = \max \left\{ \sum_{\text{recto}} (A_{\min})_k ; \sum_{\text{verso}} (A_{\min})_k \right\}$$

En effet, la surface totale d'interconnexion est désormais limitée par la surface minimale d'une seule face, occupée par une portion de composants (et non la totalité comme dans le cas d'un assemblage « simple face »).

➔ La longueur moyenne d'interconnexion, entre deux IOs se trouve modifiée.

$$L_{pp}^{2F} = \rho \cdot L_{pp}^{1F} \quad \text{avec} \quad 0 < \rho \leq 1$$

Une estimation de la longueur moyenne d'interconnexion, dans un réseau de composants tridimensionnel est présentée en annexe.

### V.G. HETEROGENEITE DE LA DENSITE D'INTERCONNEXION EXPLOITEE DANS LE SUPPORT

Cette façon d'optimiser la surface du support est peut être peu réaliste. En effet, dans notre étude, la réunion de toutes les surfaces partielles d'interconnexion s'effectue de manière optimale, c'est à dire que la valeur de  $\Delta S$  est minimale.

Cependant, dans la réalité, il peut arriver que des regroupements de composants soient associés à des  $\Delta S$  partielles négatifs. Les surfaces inexploitées sous ces composants, ne peuvent profiter aux autres, demandeurs de surface (Cf. figure V.7). La densité d'interconnexion réellement exploitée n'est plus homogène sur toute la surface du support.

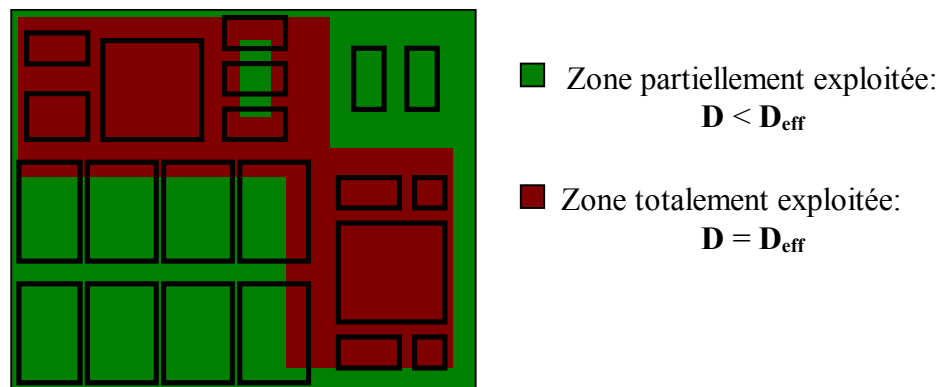


Figure V-7: Exemple de distribution réelle de la densité d'interconnexion sur un support.

Afin de résoudre ce problème ou du moins, le limiter, il peut être judicieux de constituer des blocs de composants, et de les traiter séparément. Lorsque la surface d'interconnexion de chaque bloc est estimée, la surface totale est obtenue par sommation: La densité exploitée est alors homogène par bloc.

Si la surface totale d'interconnexion relative à un bloc, estimée par nos calculs, est inférieure à la surface minimale, c'est à dire:

$$S \leq A_{\min}$$

alors la densité réellement utilisée à l'intérieur du support s'exprime de la façon suivante:

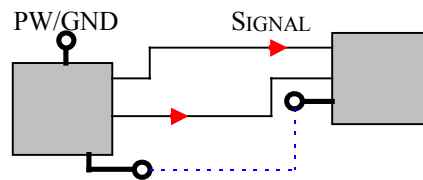
$$D_0 = \sqrt{\frac{S}{A_{\min}}} \cdot D_{\text{eff}}$$

L'hétérogénéité de la densité d'interconnexion est certainement une des contraintes les plus perturbantes, dans l'estimation de la surface d'interconnexion. Entre la densité ultime, la densité effective et la densité réellement exploitée par les interconnexions du composant, il peut apparaître des écarts non négligeables pour évaluer de façon précise la répartition des interconnexions sur le support.

### V.H. INTERCONNEXIONS DE LA MASSE ET DES TENSIONS DE PUISSANCE

Dans un système électronique ou micro-électronique, les interconnexions ne concernent pas uniquement les signaux (variables), mais également les tensions d'alimentation (fixes) telles que la masse par exemple. Cependant ces deux types d'interconnexions sont différentes, sur les points suivants:

- Les pistes parcourues par un signal sont prédominantes en nombre.
- Les pistes associées aux tensions d'alimentation sont souvent plus larges que les autres (donc possèdent une densité plus faible).
- La longueur d'interconnexion de ces mêmes pistes est moins élevée, car il existe des couches conductrices réservées aux tensions de référence. Les connexions se font donc principalement à l'aide de celles-ci et étant donné que ces couches n'interviennent pas dans l'estimation de la surface d'interconnexion (elles n'apportent aucune contrainte), la longueur d'interconnexion à prendre en compte dans ce cas, est moindre que celle demandée par des signaux.



Soient  $\alpha$ , la proportion de connexions relatives à la puissance, sur un composant et  $\rho$  le facteur modulant la longueur de ce type d'interconnexion. La longueur d'interconnexion  $L_k$  requis par celui-ci (en unité de pas  $P$ ), peut s'exprimer de la façon suivante:

$$L_k = L_{PW} + L_S = (1 - \alpha + \alpha\rho) \cdot L_{tot}$$

avec:

$L_{PW}$ : Longueur d'interconnexion nécessaire pour les tensions d'alimentation.

$L_S$ : Longueur d'interconnexion nécessaire pour les signaux.

$L_{tot}$ : Longueur d'interconnexion du composant, estimée dans l'hypothèse où toutes les connexions sont des IOs (signaux).  $L_{tot}$  est en fait issue des résultats précédents (en unité de pas  $P$ ).

Si  $D_{PW}$  et  $D_S$  sont les densités effectives d'interconnexion associées respectivement aux tensions de référence, et aux signaux, la surface d'interconnexion du composant  $A_k$  devient alors:

$$A_k = P^2 = \left( \frac{L_{PW}}{D_{PW}} + \frac{L_S}{D_S} \right)^2 = \left( \frac{\alpha\rho}{D_{PW}} + \frac{1-\alpha}{D_S} \right)^2 \cdot L_{tot}^2$$

L'écart entre les grandeurs  $D_{PW}$  et  $D_S$  est due à la différence de largeur, des pistes relatives aux signaux et à l'alimentation. Généralement  $D_S$  est supérieure à  $D_{PW}$ .

La nouvelle densité effective  $D_{eff}$  exploitée sur le support est alors:

$$D_{eff} = \frac{L_{tot}}{\sqrt{A_k}}$$

**Remarque:** Les densités  $D_S$  et  $D_{PW}$  sont de la forme:  $D_i = \eta \cdot N_C \cdot \frac{N_{pistes}^i}{P_{vias}}$

## VI. CONCLUSION

La surface et la densité d'interconnexion sont deux grandeurs qu'il est important de connaître ou d'estimer dans la conception d'un système électronique. En effet, pour évaluer les coûts de fabrication ou le niveau d'intégration d'un montage (ou encore ses aptitudes thermiques), il est nécessaire de posséder ces données.

L'étude qui vient d'être développée permet donc d'estimer la surface d'interconnexion, nécessaire pour assembler un ensemble de composants sur un support quelconque. La méthode est récapitulée de façon précise en annexe (*ANNEXE C*). La longueur d'interconnexion exigée par chaque composant est estimée puis associée aux capacités du support. Cette équilibre entre l'offre et la demande (en terme de longueur d'interconnexion) permet d'établir une estimation de la surface nécessaire à l'assemblage des composants.

## VII. BIBLIOGRAPHIE

- ❶ « *Equations for Estimating Wire Length in Various Types of 2D and 3D System Packaging Structures.* » Akira MASAKI and Minoru YAMADA  
IEEE Trans. components, hybrids and manufacturing technology.  
VOL 10 N°2 JUNE 1987.
- ❷ « *Interconnection Lengths and VLSI* » David K.FERRY  
IEEE Circuits Device Mag.  
July 1985.
- ❸ « *Cost-Density Analysis of Interconnections.* » George MESSNER, IEEE.  
IEEE Trans. components, hybrids and manufacturing technology.  
VOL 10 N°2 JUNE 1987.
- ❹ « *Chip packaging: Geometrical requirements and constraints.* »  
Integrated circuit engineering corporation.
- ❺ « *Placement and Average Interconnection Lengths of Computer Logic.* » Wilm E.DONATH  
IEEE Trans. Circuits Syst.  
VOL 26 N°4 APRIL 1979.
- ❻ « *Limitation of the Signal Pin Density on Wiring Boards.* »  
Tsuneyo CHIBA, Minoru YAMADA ET F. KOBAYASHI.  
IEEE Trans. Components, Packaging, Manufact. Technology.  
PART B, VOL 19, N°2 MAY 1996.
- ❼ « *Analog VLSI: Signal and Information Processing.* »  
Mohammed ISMAIL, Terri FIEZ.  
McGraw-Hill International Editions.
- ❽ « *Updated Cost/Density Analysis of Interconnections* »  
George MESSNER IDC.  
IEPS conference 1995.
- ❾ « *Microelectronics Packaging Handbook*»  
Rao R. TUMMALA, Eugene J.RYMASZEWSKI.  
Van Nostrand Reinhold.

**ANNEXE A:**  
**SUPPORT POSSEDANT UNE PREMIERE COUCHE, PARTIELLEMENT UTILISABLE**  
**(INTERCONNEXION D'UN COMPOSANT (PA OU SGA)).**

Soient les grandeurs suivantes:

$N_C$ : Nombre de couches.

$A$ : Surface élémentaire, considérée ici comme étant la surface d'interconnexion associée à un composant, dont la taille physique est définie par  $x$  et  $y$ .

$D_1$ : La densité d'interconnexion sur la 1<sup>ère</sup> couche.

$D_k$ : La densité d'interconnexion sur une couche  $k$ ,  $1 < k \leq N_C$ .

$D'$ : Densité effective imposée par la disposition des IOs sous le composant  $D' \leq D_{\text{eff}}$ .

$L$ : Longueur d'interconnexion, nécessaire à l'assemblage d'un composant.

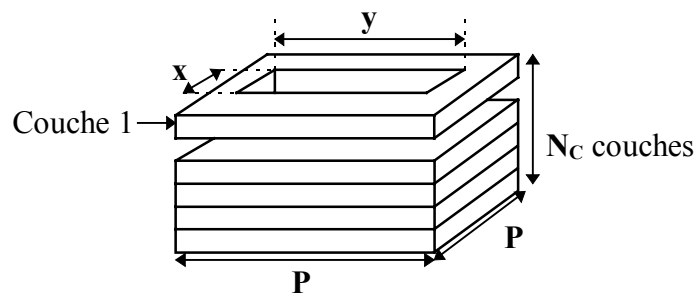
$L_1$ : Longueur d'interconnexion présente sur la 1<sup>ère</sup> couche.

$L_k$ : Longueur d'interconnexion sur une couche  $k$ ,  $1 < k \leq N_C$ .

Le composant ayant besoin d'une longueur d'interconnexion précise  $L$ , il faut que le support lui fournisse cette même longueur. Dans le cas général, c'est à dire lorsque le support est homogène (densité  $D_{\text{eff}}$ ), la longueur d'interconnexion nécessaire à l'assemblage du composant vérifie:

$$L = P_0^2 \cdot D_{\text{eff}}$$

Dans la situation présentée sur le schéma ci-dessous, la première couche est hétérogène du point de vue de la densité d'interconnexion: Sur une surface  $x.y$  (correspondant à la surface occupée par le composant), la densité est  $D'$ , tandis que sur le reste de la 1<sup>ère</sup> couche, la densité est  $D_{\text{eff}}/N_C$ . Les autres couches sont homogènes de densité  $D_{\text{eff}}/N_C$ . Une nouvelle surface d'interconnexion  $P^2$  est à calculer. Il est important de noter que pour l'instant la surface  $x.y$  est considérée comme inférieure à  $P^2$ .



La longueur  $L_1$  d'interconnexion exploitable sur la première couche s'écrit:

$$L_1 = D' \cdot (x \cdot y) + \frac{D_{\text{eff}}}{N_C} (P^2 - x \cdot y)$$

Les couches  $k$  ( $1 < k \leq N_C$ ) sont identiques, c'est pourquoi:

$$L - L_1 = (N_C - 1) \cdot L_k$$

avec:

$$L_k = \frac{D_{\text{eff}}}{N_C} \cdot P^2$$

La longueur d'interconnexion nécessaire au composant étant connue, il advient:

$$L = P_0^2 \cdot D_{\text{eff}} = L_1 + (N_c - 1) \cdot L_k = \left[ D' - \frac{D_{\text{eff}}}{N_c} \right] (x \cdot y) + D_{\text{eff}} \cdot P^2$$

La surface d'interconnexion  $P^2$  vérifie donc:

$$P^2 = P_0^2 + (x \cdot y) \left[ \frac{1}{N_c} - \frac{D'}{D_{\text{eff}}} \right]$$

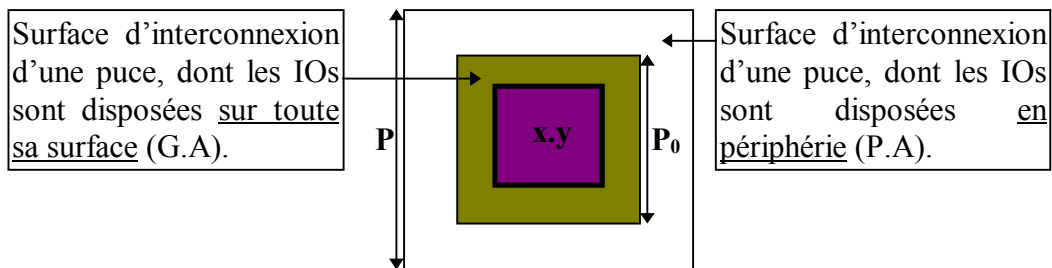
Il est important de remarquer que la valeur de  $P$  est obtenue à partir de celle de  $P_0$ . Tous les raisonnements d'estimation de surface d'interconnexion, précédemment étudiés, restent donc valables, moyennant une simple modification du résultat final.

**Remarque:** Ces équations sont valables uniquement lorsque:

$$(x \cdot y) \leq P^2$$

Cette condition correspond à l'inégalité suivante:

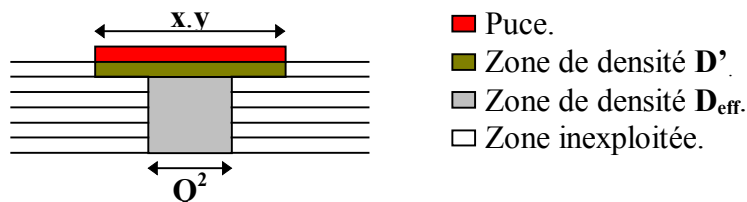
$$P_0^2 \geq (x \cdot y) \left[ \frac{N_c - 1}{N_c} + \frac{D'}{D_{\text{eff}}} \right]$$



Différence de surface d'interconnexion selon les technologies d'assemblage utilisées.

CAS OU  $x \cdot y > P^2$

La 1<sup>ère</sup> couche est occupée sur une surface égale à celle du composant, par une densité d'interconnexion  $D'$ . Les autres couches sont exploitées sur une surface  $Q^2$ , par une densité égale à celle effective  $D_{\text{eff}}$ . Nous nous intéressons ici à la situation où la surface  $x \cdot y$  est supérieure à la surface  $Q^2$ .



La longueur d'interconnexion de la 1<sup>ère</sup> couche, sur la surface  $x \cdot y$  est égale à:

$$L_1 = D' \cdot (x \cdot y)$$

Celle d'une couche  $k$  quelconque ( $1 < k \leq N_C$ ), sur la surface  $Q^2$  est égale à:

$$L_k = \frac{D_{\text{eff}}}{N_C} \cdot Q^2$$

La longueur d'interconnexion demandée par un composant afin d'être assemblé sur le support est donc:

$$L = D' \cdot (x.y) + \left( \frac{N_C - 1}{N_C} \right) \cdot D_{\text{eff}} \cdot Q^2$$

Or cette longueur est identique quelque soit le type de disposition des IOs. Nous pouvons donc écrire l'équation suivante:

$$L = D' \cdot (x.y) + \left( \frac{N_C - 1}{N_C} \right) \cdot D_{\text{eff}} \cdot Q^2 = D_{\text{eff}} \cdot P_0^2$$

soit:

$$Q^2 = \left( \frac{N_C}{N_C - 1} \right) \cdot \left[ P_0^2 - \frac{D'}{D_{\text{eff}}} \cdot (x.y) \right]$$

**Remarque:** Il est possible de généraliser ces expressions au cas où il existe  $M$  couches hybrides ( $M$  compris entre 1 et  $N_C$ ), en y substituant la surface  $x.y$  par celle  $M.x.y$ .

#### BILAN:

L'estimation de la surface d'interconnexion peut donc se résumer à cela: Soit le composant possède des IOs réparties sur toute sa surface, et dans ce cas la surface d'interconnexion de celui-ci est  $P_0^2$ , soit les IOs sont disposées sur la périphérie du composant et alors:

- Si  $P_0^2 \geq (x.y) \left[ \frac{N_C - 1}{N_C} + \frac{D'}{D_{\text{eff}}} \right]$ , la surface d'interconnexion du composant est  $P^2$ .
- Sinon, elle est égale à  $Q^2$ .

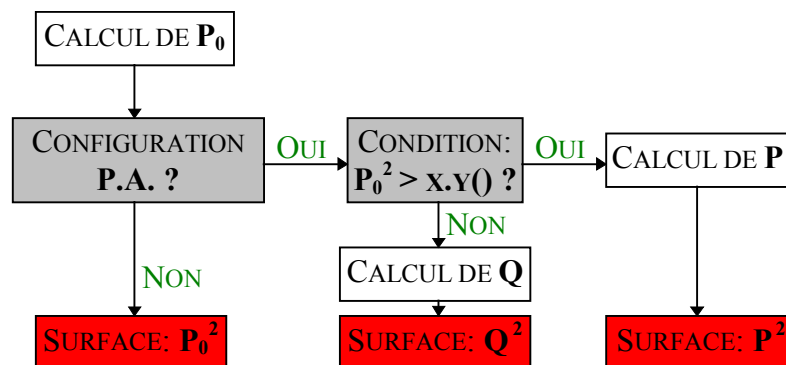
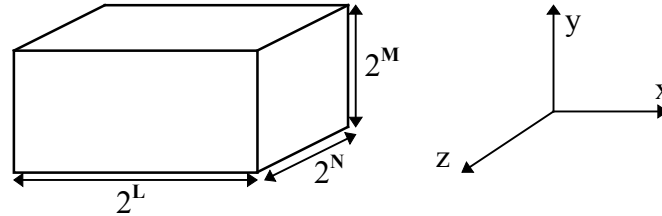


Schéma synoptique du passage de  $P_0$  à la surface d'interconnexion.

**Remarque:** Dans le cas d'une implantation des IOs du type SGA (Semi Grid Array), le même raisonnement est appliqué en substituant  $X.Y$  par  $S_1$  (surface sous le composant vierge de broche).

**ANNEXE B: ❶****LONGUEUR MOYENNE D'INTERCONNEXION D'UN RESEAU 3D DE COMPOSANTS.**

Soit un réseau 3D de cellules (ou composants) décrit par la figure suivante:



Ce réseau possède  $2^L$  cellules dans l'axe des  $x$ ,  $2^M$  dans celui des  $y$  et  $2^N$  dans celui des  $z$ . Soient  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  les distances séparant deux cellules voisines suivant les axes respectifs  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

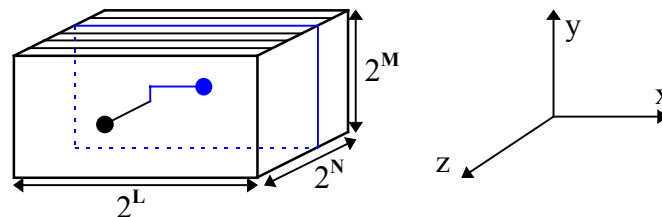
Pour calculer les longueurs moyennes d'interconnexion entre deux cellules, un découpage du réseau en un ensemble de plans est réalisé. Deux situations se présentent alors:

- ❶ Si la distance existant entre les différents plans, c'est à dire  $Z$ , est nettement supérieure aux distances séparant deux pistes existant à l'intérieur d'un plan, la longueur moyenne  $L_{pp}$  s'écrit:

$$L_{pp} = \frac{1}{3} \left[ (2^L - 2^{-L}) \cdot X + (2^M - 2^{-M}) \cdot Y \right] + \frac{(1 - 2^{r-1})(2^{N \cdot r} - 1)}{[1 - 2^{N \cdot (r-1)}](2^r - 1)} \cdot Z \quad \text{❶}$$

Dans le cas particulier où  $N = 1$  et  $L = M$ , avec  $X = Y = P$ , l'expression précédente se réduit à:

$$L_{pp} = \frac{2}{3} (2^L - 2^{-L}) \cdot P + Z$$

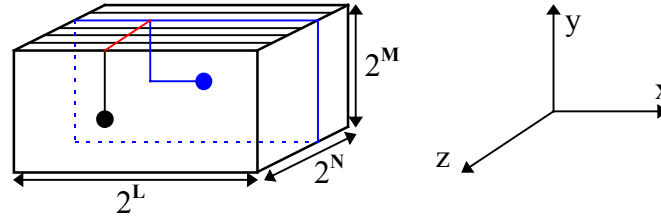


- ❷ Dans le cas, où les interconnexions entre différents plans s'effectuent uniquement sur un des bords du réseau (Cf. figure suivante), cette même longueur moyenne d'interconnexion s'exprime de la façon suivante:

$$L_{pp} = \frac{1}{3} (2^L - 2^{-L}) \cdot X + (2^M) \cdot Y + \frac{(1 - 2^{r-1})(2^{N \cdot r} - 1)}{[1 - 2^{N \cdot (r-1)}](2^r - 1)} \cdot Z \quad \text{❷}$$

Dans le cas particulier où  $N = 1$  et  $L = M$ , avec  $X = Y = P$ , l'expression précédente se réduit à:

$$L_{pp} = \frac{1}{3} [4 \cdot (2^L) - 2^{-L}] \cdot P + Z$$



Si deux faces opposées du réseau permettent la connexion entre les différents plans, l'expression de la longueur moyenne d'interconnexion s'écrit alors:

$$L_{pp} = \frac{1}{3} [(2^L - 2^{-L}) \cdot X + (2 \cdot 2^M - 2^{-M}) \cdot Y] + \frac{(1 - 2^{r-1})(2^{N \cdot r} - 1)}{[1 - 2^{N \cdot (r-1)}](2^r - 1)} \cdot Z \quad \textcircled{3}$$

Lorsque 3 ou 4 cotés du réseaux sont utilisés pour interconnecter les plans entre eux, le calcul de la longueur moyenne d'interconnexion est trop complexe, et demande une évaluation numérique.

#### CAS PARTICULIER D'UNE CONFIGURATION DOUBLE FACES:

Un assemblage de composants sur les deux faces d'un même support peut être comparé à un réseau 3D de cellules ( $2^L, 2^M, 2$ ). Si, de plus, nous nous plaçons dans la situation idéale d'un réseau carré, « double faces »:  $N_T = 4^L$  cellules au recto et au verso, soit un total de  $2 \cdot N_T$  cellules.

$$\textcircled{1} \text{ devient } L_{pp} = \frac{2}{3} \left( \frac{N_T - 1}{\sqrt{N_T}} \right) P + Z$$

$$\textcircled{2} \text{ devient } L_{pp} = \frac{1}{3} \left( \frac{4N_T - 1}{\sqrt{N_T}} \right) P + Z$$

$$\textcircled{3} \text{ devient } L_{pp} = \frac{1}{3} \left( \frac{3N_T - 2}{\sqrt{N_T}} \right) P + Z \quad (?)$$

