



HAL
open science

Agencement des systèmes de fabrication cellulaires

Jean-Marie Proth, Abdelghani Souilah

► **To cite this version:**

Jean-Marie Proth, Abdelghani Souilah. Agencement des systèmes de fabrication cellulaires. [Rapport de recherche] RR-1442, INRIA. 1991, pp.47. inria-00075118

HAL Id: inria-00075118

<https://inria.hal.science/inria-00075118>

Submitted on 24 May 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

INRIA

UNITÉ DE RECHERCHE
INRIA-LORRAINE

Institut National
de Recherche
en Informatique
et en Automatique

Domaine de Voluceau
Rocquencourt
B.P.105
78153 Le Chesnay Cedex
France
Tél.: (1) 39 63 55 11

Rapports de Recherche

N° 1442

*Programme 5
Traitement du Signal,
Automatique et Productique*

AGENCEMENT DES SYSTEMES DE FABRICATION CELLULAIRES

Jean-Marie PROTH
Abdelghani SOUILAH

Juin 1991



★ R R - 1 4 4 2 ★

AGENCEMENT DES SYSTEMES DE FABRICATION CELLULAIRES

"CELLULAR MANUFACTURING SYSTEMS LAYOUT"

Jean-Marie PROTH* & Abdelghani SOULAH*

RESUME

L'agencement des systèmes de fabrication est un problème complexe. Une approche en trois étapes a été récemment proposée. La première étape consiste à grouper les machines en cellules. Dans la seconde étape, on structure les cellules. Enfin, la troisième étape consiste à placer les cellules dans l'atelier.

Dans ce travail, nous nous intéressons à cette troisième étape. Nous proposons une heuristique basée sur le recuit simulé, et dont l'objectif est de minimiser le critère "somme des produits (**flux x distance**) entre les couples de machines".

La principale caractéristique de notre approche est que nous utilisons des longueurs de chemins réels comme distances entre cellules.

Mots clés : Agencement, Production cellulaire, Optimisation, Recuit simulé.

ABSTRACT

The manufacturing system layout is a complex problem. A three steps approach has been recently proposed to solve this problem. The first step consists of selecting the resources to group in the cells. In the second step, the resources are arranged inside the cells (intra-cell design). Finally, the third step is devoted to the location of the cells in the shop-floor.

In the work presented hereafter, we focus on the third step. We propose an heuristic algorithm based on simulated annealing and which aims at minimizing the criterion "sum of the products (**flow x distance**) between each pair of cells".

The main characteristic of our approach is that we use as distances the lengths of real paths between cells.

Key Words : Layout, Cellular Manufacturing, Optimisation, Simulated annealing.

* INRIA-Lorraine, Projet SAGEP CESCO.
4, rue Marconi, Technopôle METZ 2000
57070 METZ, FRANCE.

1. INTRODUCTION

Face à l'intensification de la concurrence internationale, l'économie mondiale bascule de plus en plus de l'économie d'échelle vers l'économie d'envergure. Dans cette dernière, la production se caractérise par une grande variété de produits et de processus de fabrication, des systèmes de production complexes et un marché fortement fluctuant. Cela engendre de grandes difficultés dans la gestion des systèmes de production et nécessite des stratégies de contrôle et de commande de plus en plus dynamiques, souples et automatisées.

Parmi les tendances les plus récentes qui caractérisent cette nouvelle révolution industrielle, on trouve ce qu'on appelle la **Production Cellulaire** (Cellular Manufacturing). Un grand nombre de systèmes sont le résultat de l'application de cette philosophie. En effet, de nombreuses études [Ffp 86], conduites dans les pays les plus industrialisés, montrent que 80% à 90% de toutes les pièces fabriquées sur des machines outils de nos jours, peuvent être entièrement usinées dans des systèmes de fabrication cellulaires. Ces cellules de fabrication, définies selon des critères liés aux pièces à produire, doivent avoir une grande autonomie de fonctionnement.

Il s'agit donc de regrouper les ressources utiles en cellules, de sorte que les produits passent la plus grande partie, sinon la totalité, de leur temps de fabrication dans la même cellule. Cela permet d'éviter les transports de pièces qui compliquent la gestion, augmentent les en-cours et nuisent à la qualité. On cherche également à installer les cellules sur le sol de l'atelier suivant une configuration conduisant à un trafic inter-cellulaire aussi faible que possible afin de réduire les cycles de fabrication.

2. AGENCEMENT DES SYSTEMES DE FABRICATION DISCRETS

L'important problème qu'est l'agencement des systèmes de production a commencé à intéresser les chercheurs dès le début des années 50. Le coup d'envoi a été donné par des chercheurs tels que GRANT en 1952 [Iwg 52] et RICHARD en 1955 [Mrd 55]. En 1970, EL-RAYAD et al. ont donné une définition de l'agencement des systèmes de production [Ray 70] qui est la suivante :

" L'agencement est une procédure visant à obtenir une disposition Optimale des postes de travail dans une unité de production "

Dans cette définition, un terme est mis en valeur et mérite notre attention. En effet, une **optimisation** est toujours liée à un ou plusieurs critères ou objectifs. Pour ce problème, on retrouve souvent les critères suivants :

- Minimisation du trafic entre les postes de travail,
- Minimisation du coût d'installation du système,
- Minimisation des "en-cours",
- Utilisation de l'espace offert d'une manière optimale,
- Minimisation du nombre de types de moyens de transport utilisables.

Certains de ces critères sont principaux, d'autres secondaires. D'autre part, certains sont quantitatifs et d'autres qualitatifs. Il existe aussi une dépendance entre ces critères. Néanmoins, on essaie toujours de trouver une solution qui conduit à une valeur acceptable pour l'ensemble de ces critères.

Quand le problème d'agencement se pose t-il ?

Dans la pratique, on distingue deux grandes situations dans lesquelles se pose un problème d'agencement. Nous les donnons ci-dessous.

a - Construction d'une nouvelle unité de production :

Cette situation ne se présente qu'une seule fois pour un système de production et a un coût de réalisation élevé. Elle repose sur les données souvent globales concernant les produits visés et les ressources disponibles.

b - Modification de l'agencement d'une unité de production existante :

Par contre, cette situation est beaucoup plus fréquente. Elle se présente dans plusieurs cas, par exemple : modification dans les produits, changement de

strategie de production, ajout ou modernisation des ressources, augmentation ou diminution de la surface de l'atelier, amelioration des conditions de travail et de sécurité des ouvriers,

Etat de l'art :

Depuis trois décennies, ce problème est une grande préoccupation, non seulement dans le domaine des industries manufacturières, mais aussi dans d'autres domaines, notamment celui de l'urbanisme où il s'agit d'adapter les lieux d'habitation, de travail et de prestation de services aux besoins de l'homme. A cet effet, on constate que ce problème est bien couvert dans la littérature. On le retrouve sous plusieurs noms, et cela suivant les spécificités du domaine d'application. Par exemple, "Plan Layout", "Facilities Allocation", "Facilities Layout", "Area Placement", etc... .

Finalement, on peut dire que, du point de vue des domaines d'application, ce problème se présente sous deux formes distinctes :

- **"l'agencement par sectionnement de la surface disponible"** posé dans le domaine de l'urbanisme [Has 86] ..., voir figure 1 ;
- **"l'agencement par placement des ressources sur la surface disponible"** dont les applications sont très variées :
 - agencement des cellules CMOS [Maz 90] ou des macro-cellules dans les circuits intégrés en VLSI [Sec 90] dans le domaine de l'électronique et de la micro-électronique ;
 - et ce qui nous intéresse le plus, **l'agencement des systèmes de fabrication**, [Anc 90] [Bez 90] (voir figure 2) ;
 -

En ce qui concerne les méthodes de résolution, on dira que les problèmes d'agencement pouvant être résolus à l'aide d'une méthode exacte et dans un temps raisonnable sont peu nombreux et très spécifiques. Dans la majorité des cas, on fait appel à des heuristiques.

Les méthodes d'agencement peuvent être classées en trois groupes [Cha 87] :

- Méthodes par construction :

Dans ces méthodes, on débute par un local vide et l'on y place progressivement les ressources.

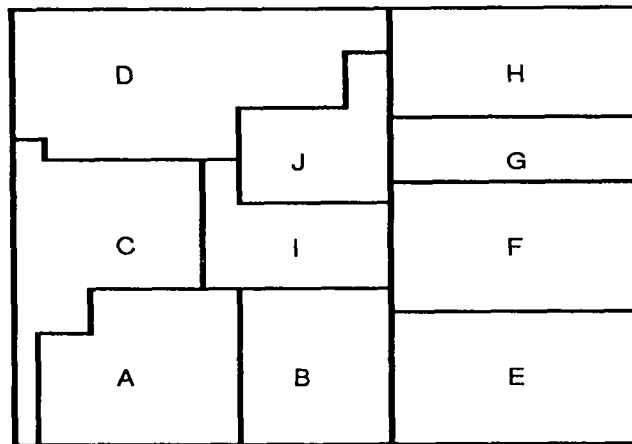


fig. 1 Agencement par sectionnement de la surface disponible

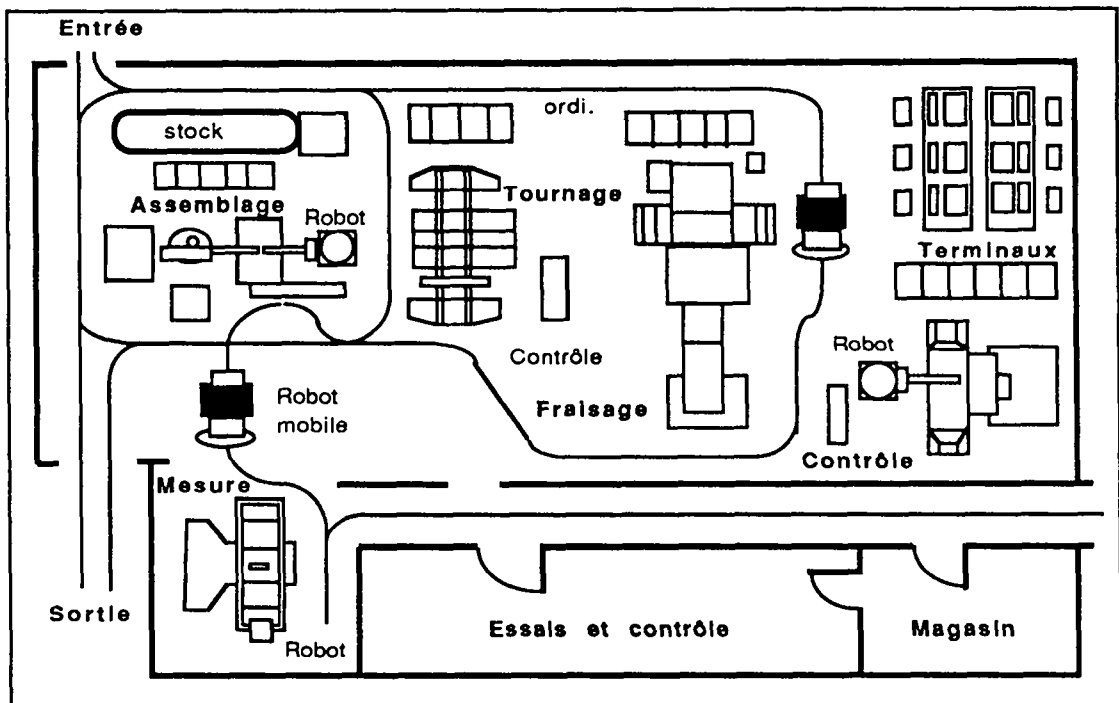


fig. 2 Agencement des ressources dans un atelier de fabrication mécanique

- Méthodes par amélioration :

Dans celles-ci, on commence par une configuration initiale donnée par l'utilisateur. Cette configuration est modifiée à chaque itération du processus, afin

d'améliorer la valeur du critère choisi.

- Méthodes mixtes ou hybrides :

Ces méthodes font collaborer les deux groupes précédents. Une configuration initiale est obtenue, dans un premier temps, à l'aide d'une méthode par construction. Ensuite, on améliore la solution obtenue, afin d'aboutir à la configuration donnant la valeur du critère la plus proche de l'optimum.

Une étude bibliographique statistique, très récente, a été menée par J. Current et al. [Cur 90] , où ils ont recensé tous les travaux effectués depuis 1970 dans ce domaine.

Nouvelle Approche :

Nous constatons, après avoir effectué l'état de l'art, que jusqu'à présent le problème de l'agencement des systèmes de fabrication n'a pas encore trouvé une solution acceptable. Cette méthode devrait tenir compte de tous les paramètres qui caractérisent les produits à fabriquer (type, matériaux, dimensions, poids, ...), les ressources utilisées pour la fabrication (leur fonction, leur capacité, ...), l'atelier (sa géométrie, ses entrées, ses sorties, ses zones interdites, ...), le système de transport et de manutention.

On distingue en ce moment deux grand types d'agencements des systèmes de fabrication :

1. **l'agencement par opérations** (ou par tâches),
2. **l'agencement cellulaire** (ou Group Technology Layout).

Ce deuxième type d'agencement a été critiqué dans le passé. Certaines études ont voulu prouver que l'agencement cellulaire avait tendance à réduire la flexibilité du système de fabrication. Cependant, d'autres études, plus proches de l'industrie, ont montré qu'il est pratiquement impossible de diriger efficacement un système de fabrication de grande taille sans avoir recours à une structure cellulaire [Kus 86]. En effet, plusieurs facteurs expliquent cela. Nous donnons les plus importants:

1. l'importance du volume des informations à traiter simultanément,
2. l'importance du réseau de transport et de manutention à gérer et à contrôler,

3. la technologie utilisée: certaines ressources ne peuvent fonctionner efficacement que si elles sont regroupées dans une même cellule (exemple : forge et traitement thermique),
4. La gestion, qui peut alors être hiérarchisée.

Nous proposons dans ce qui suit l'approche adoptée au sein du projet SAGEP. C'est une approche qui vise principalement les ateliers de fabrication cellulaires et donne un agencement optimal (sinon très proche de l'optimum). Elle se déroule en trois étapes, avec éventuellement une possibilité de retour arrière entre les étapes (voir figure 3) :

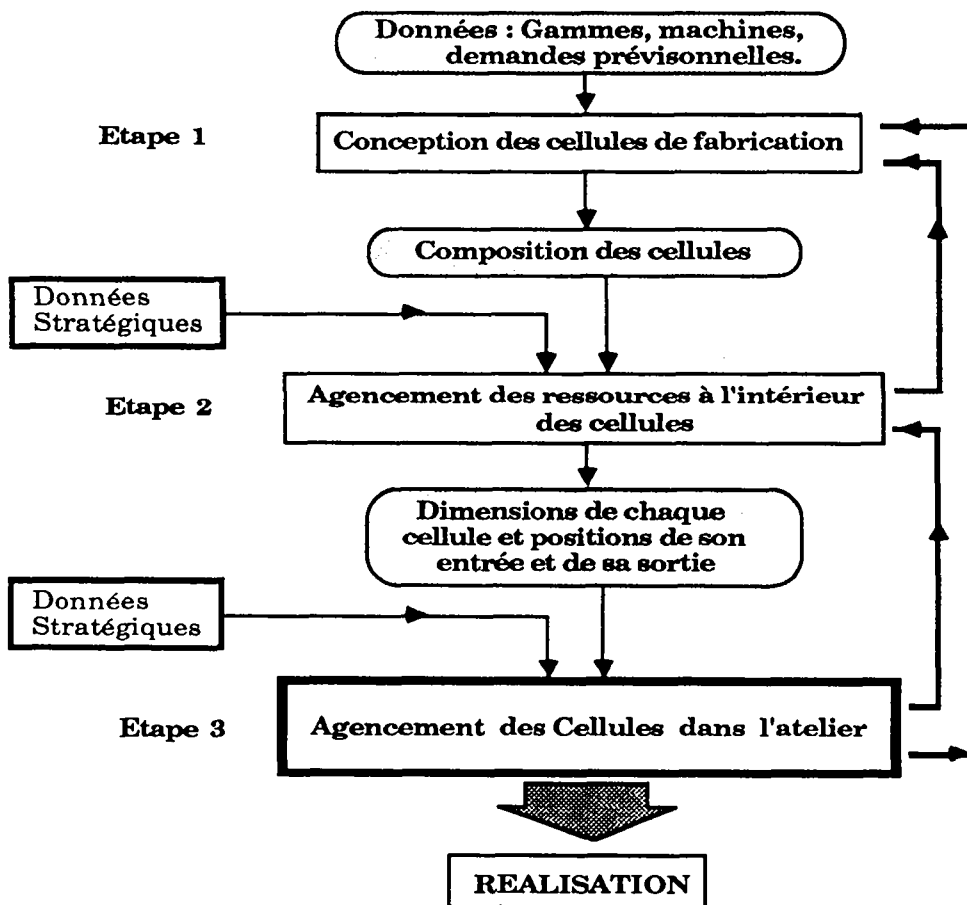


fig. 3 Nouvelle approche d'agencement des systèmes de fabrication

- La **première étape** consiste à **regrouper les machines en cellules**, en optimisant un ou plusieurs critères et en respectant certaines contraintes liées aux produits et aux machines. Le résultat obtenu à l'issue de cette étape constituera une partie des données de l'étape suivante.

• Dans la **deuxième étape** on réalise l'**agencement intra-cellulaire**, c'est à dire le choix du moyen de manutention et la disposition des machines à l'intérieur des cellules (construction physique des cellules).

• La **troisième** et dernière **étape**, est consacrée à l'**agencement des cellules sur le sol de l'atelier**. Cette dernière étape constitue le thème principal de notre travail.

Dans la suite, nous exposerons les trois étapes, en insistant particulièrement sur la troisième à laquelle nous consacrons le chapitre 3 de ce rapport.

ETAPE 1, Formation des cellules de fabrication :

Présentation et formulation du problème :

Dans ce problème, le but est de regrouper les machines du système en cellules de taille limitée (nombre de machines), de sorte que le trafic entre ces cellules soit le plus faible possible. En d'autres termes, on doit faire en sorte que le produit passe la plus grande partie, sinon la totalité, de son temps de fabrication à l'intérieur d'une même cellule. On réduira ainsi ses déplacements inter-cellulaires qui, relativement aux déplacements intra-cellulaires, se font sur de plus grandes distances et engendrent une augmentation des en-cours. Il s'agira donc de générer une partition de l'ensemble des machines donnant un **trafic inter-cellulaire minimum**.

Le problème consiste donc à **minimiser** le critère suivant :

Pour tout couple de cellules (C_i, C_j), ($i \neq j$)

$$tr_{i,j} = \sum_{M_u \in C_i} \sum_{M_v \in C_j} tr(M_u, M_v)$$

où $tr(M_u, M_v)$ est le trafic entre les machines M_u et M_v ($u \neq v$).

Cette fonction objectif est soumise à deux types de contraintes : les contraintes fortes et les contraintes molles.

Les contraintes fortes :

- Limitation de la taille des cellules.
- Le deuxième type de contraintes fortes concerne la cohabitation entre les machines dans une même cellule. Elle se réduisent aux deux types suivantes :

- les machines M_u et M_v doivent être dans la même cellule,
- les machines M_u et M_v ne doivent pas être dans la même cellule.

Toute partition de l'ensemble \mathcal{M} des machines ne vérifiant pas ces contraintes est inacceptable.

Les contraintes molles :

Il y a souvent des contraintes non impératives dont la réalisation n'est que souhaitable. Elles se réduisent aussi aux deux types suivants :

- 1 - Il est souhaitable que les machines M_u et M_v soient dans la même cellule,
- 2 - Il est souhaitable que les machines M_u et M_v ne soient pas dans la même cellule.

Résolution du problème :

Ce problème est combinatoire, par conséquent une solution exacte n'est pas envisageable. Plusieurs méthodes heuristiques ont été proposées pour le résoudre, notamment celles élaborées au sein du projet SAGEP.

Une première méthode a été proposée par J. Hilger, G. Harhalakis et J. M. Proth [Hil 91], nommée "Méthode des densités". Elle est basée sur l'emploi de deux entités :

- un indice de proximité S , défini pour tout couple de machines,
- une valeur limite inférieure L de la densité de présence de machines autour d'une machine donnée.

Une autre méthode a été proposée par R. Nagi, G. Harhalakis et J.M. Proth [Nag 90]. Elle s'applique mieux aux systèmes avec des produits à routages multiples et utilisant certaines ressources identiques. C'est une heuristique qui se déroule en deux étapes; dans la première étape on cherche, à l'aide d'une heuristique, une "bonne" partition de l'ensemble \mathcal{M} des machines du système, puis dans la deuxième étape on procède à un raffinement de la solution précédemment trouvée.

La dernière méthode en date est celle proposée par G. Harhalakis, J.M. Proth

et X.L. Xie [Har 90]. C'est une approche basée sur la technique du **Recuit Simulé**. Elle donne de bons résultats avec des délais relativement courts. La technique du **Recuit Simulé** sera présentée au chapitre III où elle est utilisée pour résoudre le problème du placement des cellules sur le sol de l'atelier.

ETAPE 2, Agencement des ressources à l'intérieur des cellules :

Présentation du problème :

Dans cette deuxième étape du processus d'agencement d'un atelier de production, le but est de trouver la disposition des machines à l'intérieur des cellules et le ou les moyens de manutention à utiliser dans chacune des cellules afin de minimiser les trois critères principaux suivants :

- le trafic intra-cellulaire,
- le coût d'installation et de fonctionnement de la cellule,
- la surface de la cellule.

A l'issue de cette étape, on doit aboutir aux résultats suivants :

- les positions des machines à l'intérieur de chaque cellule,
- le ou les moyens de manutention utilisés dans chaque cellule,
- la taille de la cellule (dimensions),
- la position de l'entrée et celle de la sortie de chaque cellule.

Toute cellule est finalement caractérisée par deux aspects: le type de configuration et le ou les moyens de manutention qu'elle utilise. Ces deux aspects sont très liés et dépendants.

On distingue quatre types de configurations élémentaires :

- la configuration en simple ligne droite,
- la configuration en simple ligne circulaire,
- la configuration en double ligne,
- la configuration en multi-lignes.

La cellule peut être organisée suivant une seule ou sous une combinaison de ces configurations élémentaires, par conséquent plusieurs moyens de manutention peuvent coexister dans une même cellule.

Les moyens de manutention les plus communément utilisés sont eux aussi répartis en quelques types précis, entre autres :

- les convoyeurs,
- les robots de manutention,
- les véhicules filo-, opto-, ou auto-guidés,
- les ponts roulants.

Chacun de ces outils de manutention est généralement dédié à un type de configuration élémentaire bien précis. Néanmoins, sous certaines contraintes, on peut être obligé d'utiliser un type au lieu d'un autre. Par exemple, dans le cas d'un multi-lignes, on a tendance à utiliser un véhicule auto-guidé, mais si le poids des pièces dépasse une certaine limite, on se trouve obligé d'utiliser un pont roulant.

Les contraintes auxquelles est soumis le problème sont généralement liées aux produits, aux machines, aux moyens de manutention, à l'opérateur, et aux liens qui existent entre ces quatre constituants de la cellule.

Les facteurs tels que :

- le nombre de types différents de produits traversant la cellule,
- la forme, les dimensions et le poids des produits et des outils transportés,
- le nombre de machines dans la cellule,
- l'espacement entre les machines exigé par le produit et/ou par le moyen de transport,
- l'orientation des machines,
- les machines particulières dans des sites particuliers,
- la sécurité de l'opérateur,
- la commodité d'utilisation (ergonomie),
- les gammes des produits traversant la cellule,
- ... ,

doivent être pris en compte lors de la résolution du problème.

Résolution du problème :

Ce problème présente une difficulté particulière. La présence d'une multitude de critères à optimiser simultanément et d'un nombre impressionnant de contraintes quantitatives et qualitatives rend le recours à l'expérience humaine inévitable. La résolution de ce problème se fait en deux phases.

1 - Dans la **première phase**, on utilise un système expert conçu pour aider au **choix du type de configuration et du système de manutention** à utiliser. Ce système

expert s'appuie sur une base de connaissances et une base de faits actionnées par un moteur d'inférence permettant d'aboutir à la solution du problème. La structure de ce système expert est donnée dans la figure 4.

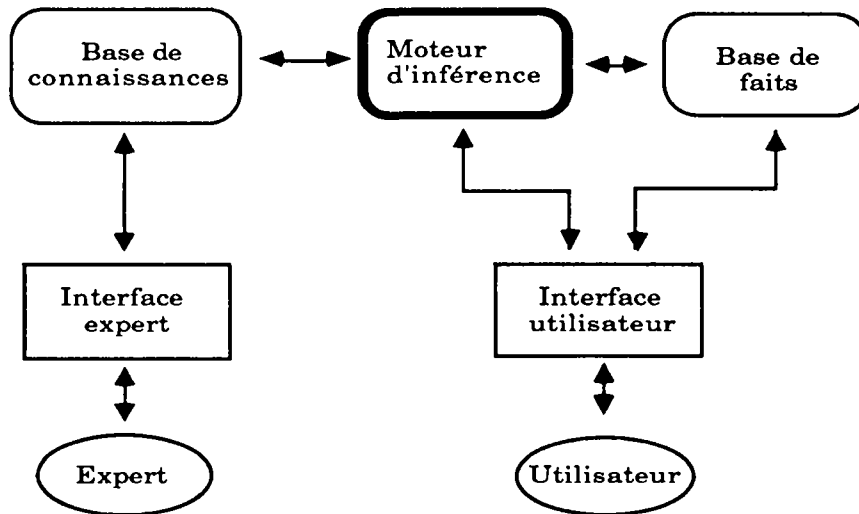


fig. 4 Structure générale du système expert de sélection d'architecture de cellules de fabrication

2 - La **deuxième phase** est consacrée à l'organisation de tous les éléments de la cellule suivant la configuration sélectionnée. Pour cela, on utilise des algorithmes d'optimisation qui permettent de déterminer la position et la disposition réelles de chaque machine au sein de la cellule.

Le but principal visé lors de cette opération est de minimiser le trafic entre les machines en respectant le type de configuration imposé lors de la phase précédente ainsi que les contraintes quantitatives restantes.

Pour chaque type de configuration élémentaire sélectionnée ci-dessus, le problème se réduit à une affectation qui, moyennant une modélisation adéquate, est résolue en utilisant une technique d'optimisation.

Exemples de modèles :

- Cas de la configuration en ligne simple (voir figure 5) :

Pour ce cas nous proposons la fonction objectif suivante :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1(j \neq i)}^N f_{i,j} \times |x_{s(i)} - x_{s(j)}|$$

Elle est soumise aux contraintes suivantes :

$$|x_{s(i)} - x_{s(j)}| \geq (l_i + l_j) / 2 + c(i,j),$$

$$x_{s(i)} \geq 0 \text{ et } x_{s(j)} \geq 0,$$

$$s(i) \neq s(j), \forall (i, j) \in \{1, 2, \dots, N\} \times \{1, 2, \dots, N\}$$

où : $f_{i,j} = 0$ si $i = j$ et $f_{i,j} =$ nombre de transferts (flux) de produits de la machine i à la machine j ,
 $c(i,j)$ est l'espacement minimal entre les machines i et j ,
 l_j est la longueur de la machine j .

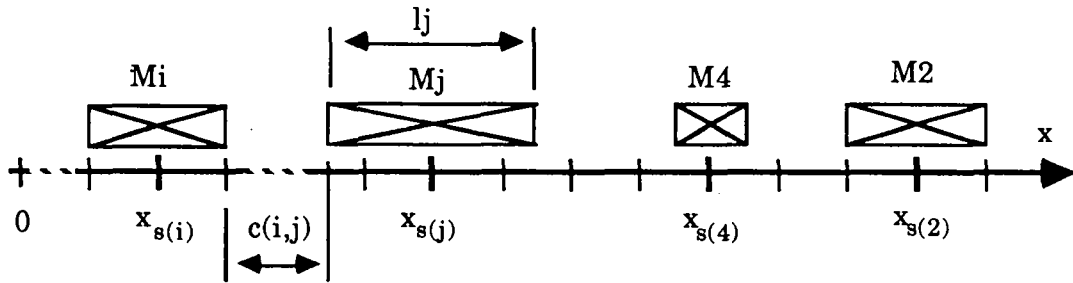


fig. 5 Configuration en ligne simple droite

- Cas de la configuration en ligne simple circulaire (voir figure 6) :

La fonction objectif associée à ce type de configuration est :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1(j \neq i)}^N f_{i,j} \times |\beta_{s(i)} - \beta_{s(j)}|$$

Elle est soumise aux contraintes suivantes

$$|\beta_{s(i)} - \beta_{s(j)}| \geq [(l_i + l_j) / 2 * R] + \mu_{i,j},$$

$$\beta_{s(i)} \geq 0 \text{ et } \beta_{s(j)} \geq 0,$$

$$s(i) \neq s(j), \forall (i, j) \in \{1, 2, \dots, N\} \times \{1, 2, \dots, N\}$$

où : $\beta_{s(i)}$ est l'angle de position du site de la machine i ,

$\mu_{i,j}$ est l'angle d'espacement entre les machines i et j ,

R est le rayon du cercle de cette configuration (rayon d'action du robot),

Ω est le pas angulaire entre deux sites.

- Cas de la configuration en double ou en multi-lignes (voir figure 7) :

La fonction objectif est :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1(j \neq i)}^N f_{i,j} \times (|x_{s(i)} - x_{s(j)}| + |y_{s(i)} - y_{s(j)}|)$$

Elle est soumise aux contraintes suivantes :

$$|x_{s(i)} - x_{s(j)}| \geq [(lx_i + lx_j) / 2] + \Delta x(i,j),$$

$$|y_{s(i)} - y_{s(j)}| \geq [(ly_i + ly_j) / 2] + \Delta y(i,j),$$

$$x_{s(i)} \geq 0, y_{s(i)} \geq 0,$$

$$s(i) \neq s(j), \forall (i, j) \in \{1, 2, \dots, N\} \times \{1, 2, \dots, N\}$$

où : lx_i (resp. ly_i) est la dimension suivant l'axe x (resp. y) de la machine i ,

Δx_i (resp. Δy_i) est l'espacement suivant l'axe x (resp. y) entre les machines i et j ,

Δ est le pas entre deux sites.

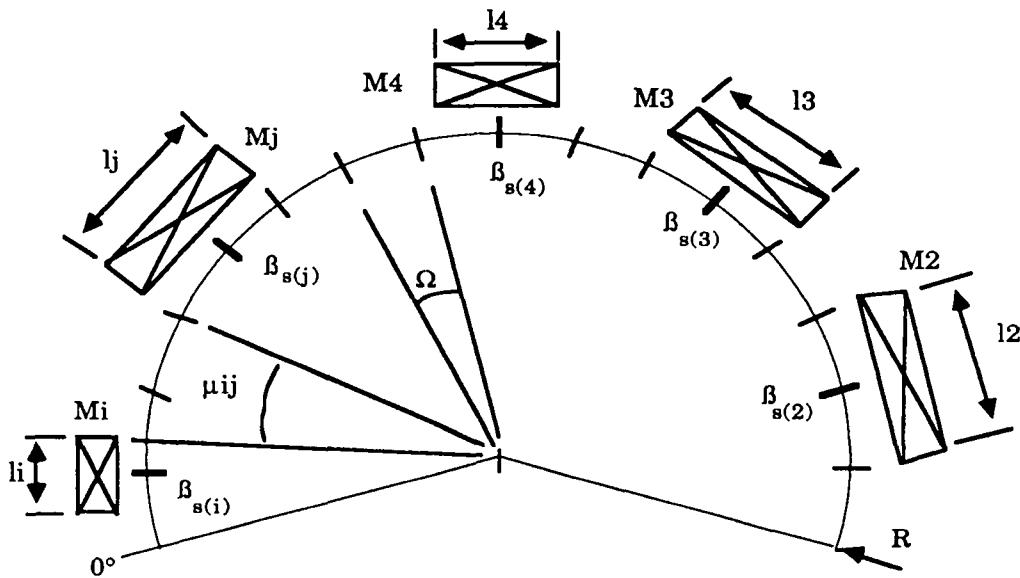


fig. 6 Configuration en ligne simple circulaire

Une fois encore, c'est un problème combinatoire où la technique du recuit simulé peut parfaitement être utilisée. La modification élémentaire permettant de passer d'un état de la cellule à un autre se réduit à une permutation de deux machines.

Les dimensions des cellules et les positions de leur entrée et sortie obtenues à l'issue de cette étape seront utilisées comme les données de l'étape suivante.

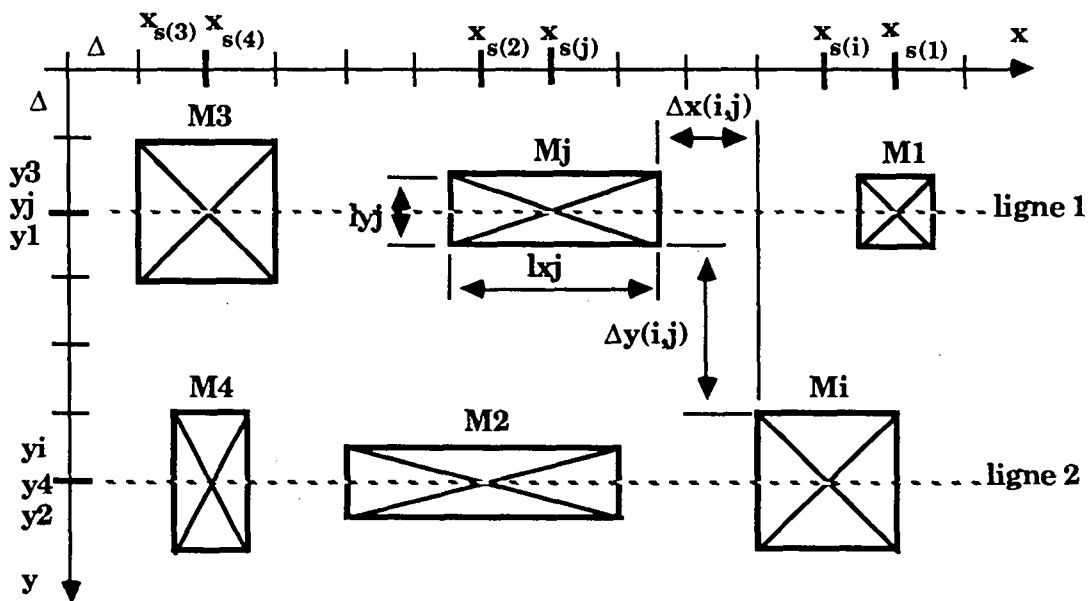


fig. 7 Configuration en double ou en multi-lignes

ETAPE 3, Agencement des cellules sur la surface disponible de l'atelier :

C'est la dernière étape avant de passer à la réalisation du système de fabrication. Dans cette étape, il s'agit de placer les cellules obtenues sur le sol de l'atelier de manière à minimiser un critère lié au trafic et aux distances inter-cellulaires. Nous consacrons tout le chapitre III à cette étape qui constitue l'objet principal de notre intervention.

3. AGENCEMENT DES CELLULES DANS L'ATELIER DE FABRICATION

Présentation du problème :

Soient :

- Un atelier de fabrication dont les côtés sont parallèles à deux directions orthogonales et à l'intérieur duquel il peut y avoir des zones interdites (piliers, bureau, armoire électrique, ...) (voir figure 8).

- Des cellules à installer sur la surface disponible de cet atelier. Chaque cellule est inscrite dans le plus petit rectangle pouvant la contenir. Sur les côtés de ces rectangles, on trouve les positions d'entrée et de sortie de la cellule (voir figure 8)

- La matrice **Tracel** [$N_c \times N_c$] (N_c étant le nombre de cellules à installer) qui représente le trafic inter-cellules. Cette matrice est déduite des routages des objets passant d'une machine à une autre (ces objets sont les produits en cours de fabrication et souvent les outils utilisés par les machines) et de la composition des cellules.

- Les contraintes qui conditionnent le positionnement relatif entre certaines cellules et le positionnement absolu de certaines cellules dans l'atelier.

Le problème consiste à installer les cellules sur le sol de l'atelier décrit ci-dessus de manière à **minimiser la somme des produits (flux x distances) inter-cellulaires** en tenant compte des contraintes physiques (non chevauchement entre les cellules et les obstacles ainsi qu'entre les cellules).

Formulation du problème :

Le critère à minimiser est :

$$\text{Min} \sum_{i=1}^{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} \text{Trafcel} (C_i \rightarrow C_j) \times \text{Dist} (C_i \rightarrow C_j)$$

$i = 1, j = 1 (j \neq i)$

où

- N_c est le nombre de cellules à installer dans l'atelier,
- $C_i, i = 1, 2, \dots, N_c$ est une cellule,

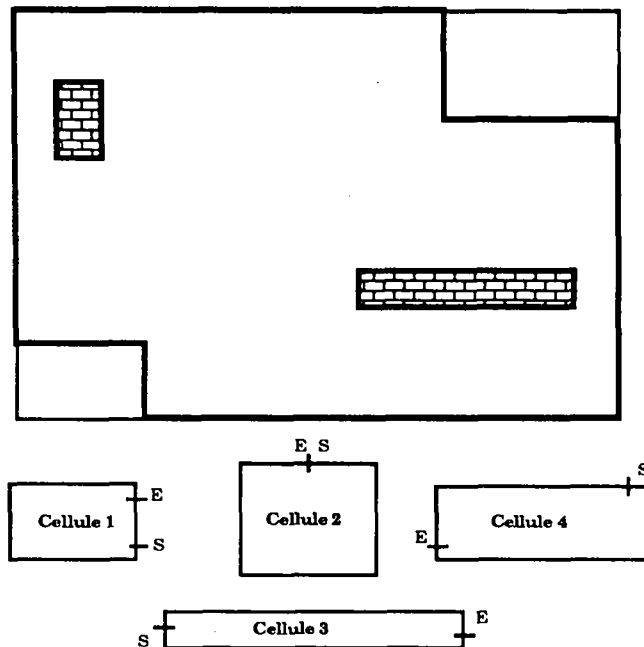


fig.8 Exemple de problème d'agencement
(l'atelier vide et les cellules à installer)

- **Trafcel** ($C_i \rightarrow C_j$) représente le trafic entre la sortie de la cellule i et l'entrée de la cellule j . Il est donné par la formule suivante :

$$\text{Trafcel } (C_i \rightarrow C_j) = \sum_{k=1}^N \beta_k \times \mu_{k,i,j}$$

- β_k est un poids associé aux produits de type k . Il représente le taux de production des pièces de ce type,
- $\mu_{k,i,j}$ est le nombre de passages des produits du type k de la cellule i à la cellule j ,
- N est le nombre de types de produits dans le système.

- **Dist** ($C_i \rightarrow C_j$) est la distance minimale réellement parcourue par le transporteur entre la sortie de la cellule i et l'entrée de la cellule j .

Cette fonction objectif est soumise à des **contraintes** qui se réduisent à deux types de base: les contraintes fortes et les contraintes molles :

Contraintes fortes :

Ce sont des contraintes dont le respect est impératif tout au long du processus de résolution du problème. Il faut donc :

- a - assurer le non chevauchement entre les entités se trouvant dans l'atelier (zones interdites, cellules, limites de l'atelier),
- b - assurer l'accessibilité des cellules (garder un espace libre en face des entrées et des sorties de chaque cellule).

Contraintes molles :

Ce sont des contraintes qui ne sont pas impératives ; leur réalisation est souhaitée à des degrés divers.

Elles se réduisent aux deux formulations suivantes :

- c - assurer les positionnements relatifs de certaines cellules,
- d - assurer le positionnement de certaines cellules dans des endroits bien précis de l'atelier.

Ce problème est fortement combinatoire. Cela est dû au grand nombre de configurations possibles de l'atelier. En effet, le moindre changement dans la position ou l'orientation d'une cellule quelconque engendre une modification de la valeur du critère. Le problème à traiter est un problème d'optimisation combinatoire.

Modélisation de l'environnement :

Afin de discrétiser l'espace des configurations, on recouvre l'atelier avec une grille dont la maille élémentaire est un carré de dimensions $ul \times ul$. En supposant que les dimensions de tous les objets se trouvant dans l'atelier, (y compris les dimensions de l'atelier lui même) et même la distance qu'il faut conserver entre les objets, sont des nombres rationnels, ul sera leur **pgcd** (plus grand commun diviseur). L'atelier est un rectangle à l'intérieur duquel figurent des zones interdites. La grille sera alors un rectangle de dimensions $M \times N$, où N est le nombre d'unités de longueur par colonne et M est le nombre d'unités de longueur par ligne. Les cellules sont elles aussi entourées par le plus petit rectangle pouvant les contenir, qui est recouvert par un nombre exact de carrés élémentaires. La figure 9 illustre ce qui précède.

A cette grille on associe une matrice, notée **Matel** [$M \times N$] (voir figure 10) telle que :

$$\text{Matel}(i,j) = \begin{cases} 1 & \text{si la maille correspondante se trouve} \\ & \text{sur une ressource (type b) ou sur une} \\ & \text{zone interdite (type a),} \\ 0 & \text{si la maille correspondante se trouve} \\ & \text{sur une zone libre (type c).} \end{cases}$$

Résolution du problème :

La méthode du **Recuit Simulé**, utilisée ici, est une méthode itérative qui part d'une solution (ou configuration) initiale.

Contrairement à d'autres méthodes applicables dans ce genre de problèmes, notamment les méthodes d'optimisation locales ou les méthodes par prospection aléatoire dans l'espace des configurations, la méthode du recuit simulé ne nécessite pas une prospection de tout l'espace des configurations, et ne refuse pas toutes les configurations qui n'améliorent pas la valeur du critère. Moyennant un paramètre de contrôle **T**, analogue à la température dans le recuit physique et variable par paliers, certaines configurations n'améliorant pas la valeur du critère sont acceptées avec une certaine probabilité **p**.

Cette condition d'acceptation a été proposée par Metropolis en 1953 [Met 53]. Elle s'énonce comme suit :

Partant d'une configuration donnée, on fait subir au système une perturbation ; si cette perturbation a pour effet de diminuer la fonction objectif (ou énergie) du système, la nouvelle configuration est acceptée ; si elle provoque, au contraire, une détérioration ΔE de la fonction objectif, elle peut être acceptée tout de même, avec une probabilité p

$$p = \exp(-\Delta E / T).$$

Dans la pratique cette condition est réalisée de la manière suivante:

- On tire au hasard un nombre réel **r** compris entre 0 et 1,
- Si **r** \leq **p**, on **accepte la configuration** dégradant de ΔE
- Sinon **la configuration n'est pas acceptée.**

La procédure du recuit simulé appliquée à l'agencement des cellules dans un atelier de fabrication est conforme à l'algorithme suivant.

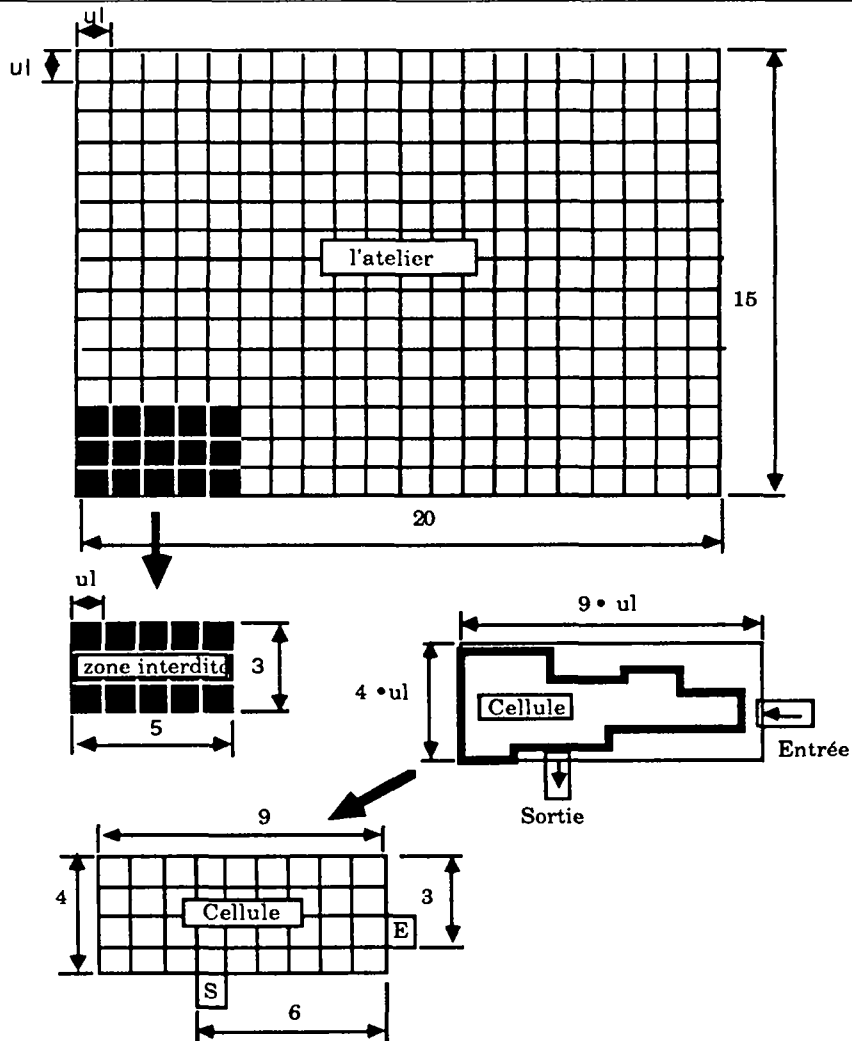
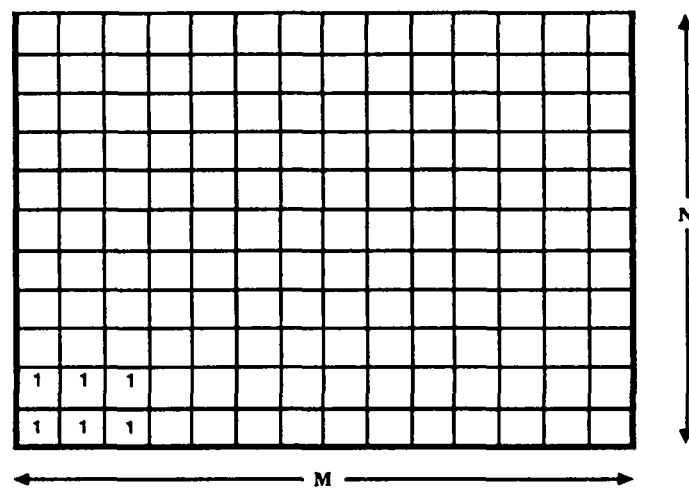


fig. 9 Recouvrement de l'atelier et des cellules par des grilles et dimensionnement de ces dernières



Les éléments de la matrice qui ne sont pas marqués à 1 sont nuls

fig. 10 La grille et la matrice Matel associée

1. Acquisition et traitement des données.
2. **Construction d'une configuration initiale.**
3. Choix des paramètres de contrôle du **Recuit Simulé.**
4. Tant que (la température finale n'est pas atteinte), faire :
 - 4.1. Tant que (l'équilibre sur ce palier de température n'est pas atteint "règle de Metropolis"), faire :
 - 4.1.1. **Choisir aléatoirement une perturbation et la réaliser.**
 - 4.1.2. **Déterminer les plus courts chemins.**
 - 4.1.3. **Calculer la valeur du critère.**
 - Fin tant que.
- Fin tant que.
5. Résultat et fin.

Les principales composantes de cet algorithme, après la détermination de la configuration initiale, sont le passage d'une configuration de l'atelier à une configuration voisine et la détermination du chemin le plus court entre la sortie d'une cellule et l'entrée d'une autre. Nous donnons, dans ce qui suit, un court exposé de ces trois composantes.

Construction d'une configuration initiale :

Cette construction se fait d'une manière itérative et interactive avec l'utilisateur. Après acquisition des données (dimensions de l'atelier, des zones interdites et des cellules à installer), on effectue une vérification de faisabilité. C'est à dire que l'on vérifie si l'atelier tel qu'il est donné peut recevoir toutes les cellules. Cela s'exprime de la manière suivante :

$$S_{\text{atel}} - \sum_{z=1}^{N_z} S_{\text{zon_int}}(z) - \sum_{c=1}^{N_c} S_{\text{cell.}}(c) > 0$$

- où :
- S_{atel} = (longueur de l'atelier) x (largeur de l'atelier) est la surface de l'atelier sans zones interdites ni cellules,
 - N_z est le nombre de zones interdites dans l'atelier,

- N_c est le nombre de cellules à installer dans l'atelier,
- $S_{z_{on_int}}(z)$ est la surface de la zone interdite z ,

$$S_{z_{on_int}}(z) = \text{longueur}_{z_{on_int.}}(z) \times \text{largueur}_{z_{on_int.}}(z)$$

$$z \in \{1, 2, \dots, N_z\}$$

- $S_{cell}(c)$ est la surface de la cellule c ,

$$S_{cell.}(c) = \text{longueur}_{cell.}(c) \times \text{largueur}_{cell.}(c)$$

$$c \in \{1, 2, \dots, N_c\}$$

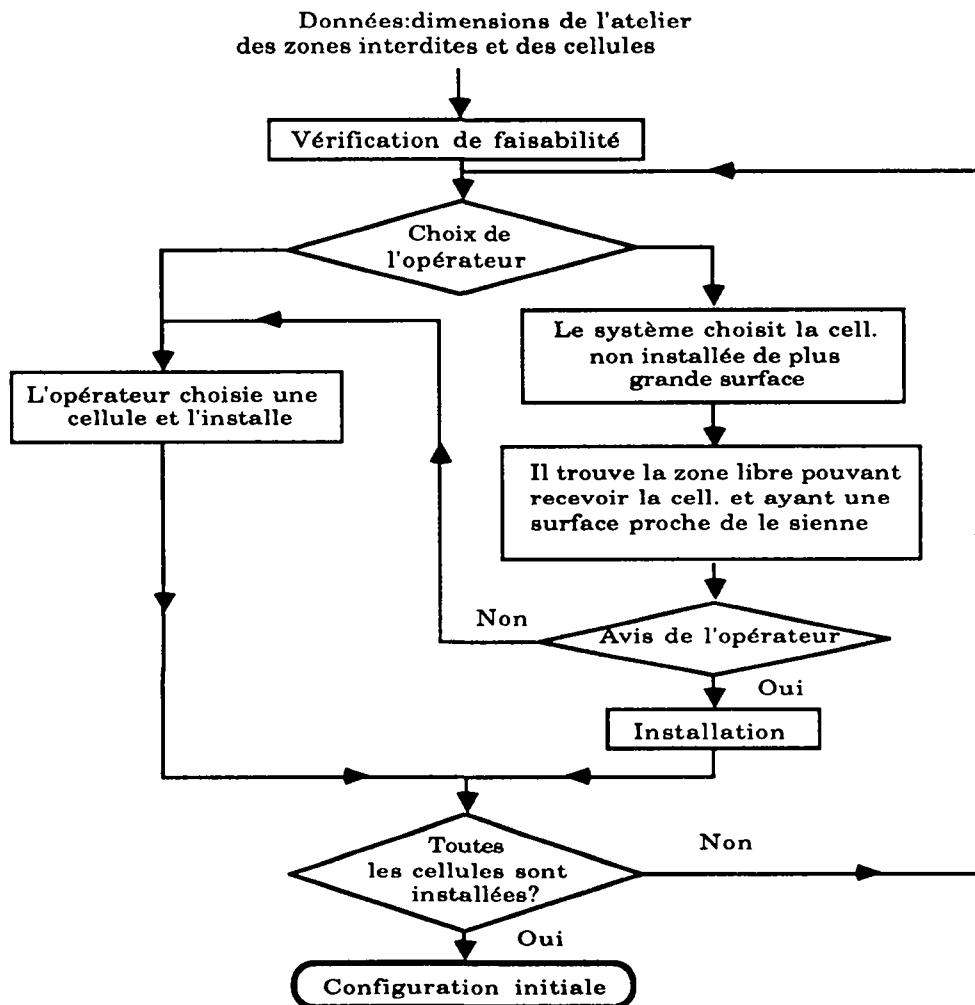


fig. 11 Construction d'une configuration initiale

La suite de la procédure est itérative et le nombre d'itérations est égal au nombre de cellules à installer. A chaque itération, le système (calculateur) permet

à l'utilisateur d'installer lui-même une cellule de son choix ou de laisser cette charge à l'ordinateur. Dans ce dernier cas, le système choisit parmi les cellules restantes celle qui a la plus grande surface, ensuite il trouve une zone libre pouvant la recevoir et ayant une surface très proche de la sienne. La procédure étant interactive, le système n'adopte pas immédiatement ce choix. Il demande l'avis de l'utilisateur. Si l'utilisateur accepte, le système conserve ce choix et passe à une autre itération; sinon il passe la main à l'utilisateur pour qu'il le fasse lui-même. Lorsque toutes les cellules sont installées, on aboutit à la configuration initiale recherchée.

L'organigramme de la figure 12 présente les points importants de ce processus de construction de la configuration initiale.

Passage d'une configuration à une configuration voisine :

L'évolution du processus de recherche de la solution optimale est inévitablement discontinu et le nombre d'états (ou configurations) qu'on pourra générer sera limité. Néanmoins, l'aspect aléatoire du passage d'une configuration à une autre subsiste.

Nous disposons d'un certain nombre de transformations élémentaires permettant le passage d'une configuration à une autre, et cela en choisissant aléatoirement l'une d'elles. Ces transformations sont (voir figure 13) :

1. Permutation de deux cellules (fig. 13.a),
2. Mutation d'une cellule vers une zone libre de l'atelier (fig. 13.b),
3. Translation locale d'une cellule dans son entourage (fig. 13.c),
4. Rotation locale d'une cellule dans son entourage (fig. 13.d).

Pour réaliser ces transformations élémentaires, nous avons besoin de deux procédures qui sont la détermination des zones libres de l'atelier et la détermination de l'entourage libre d'une cellule donnée. La première a été utilisée lors de la construction d'une configuration initiale et est utilisée ici lors de la mutation d'une cellule vers une zone libre de l'atelier. La seconde est utilisée lors de la permutation de deux cellules, lors de la translation locale et lors de la rotation d'une cellule. Ces deux points sont traités dans l'annexe I.

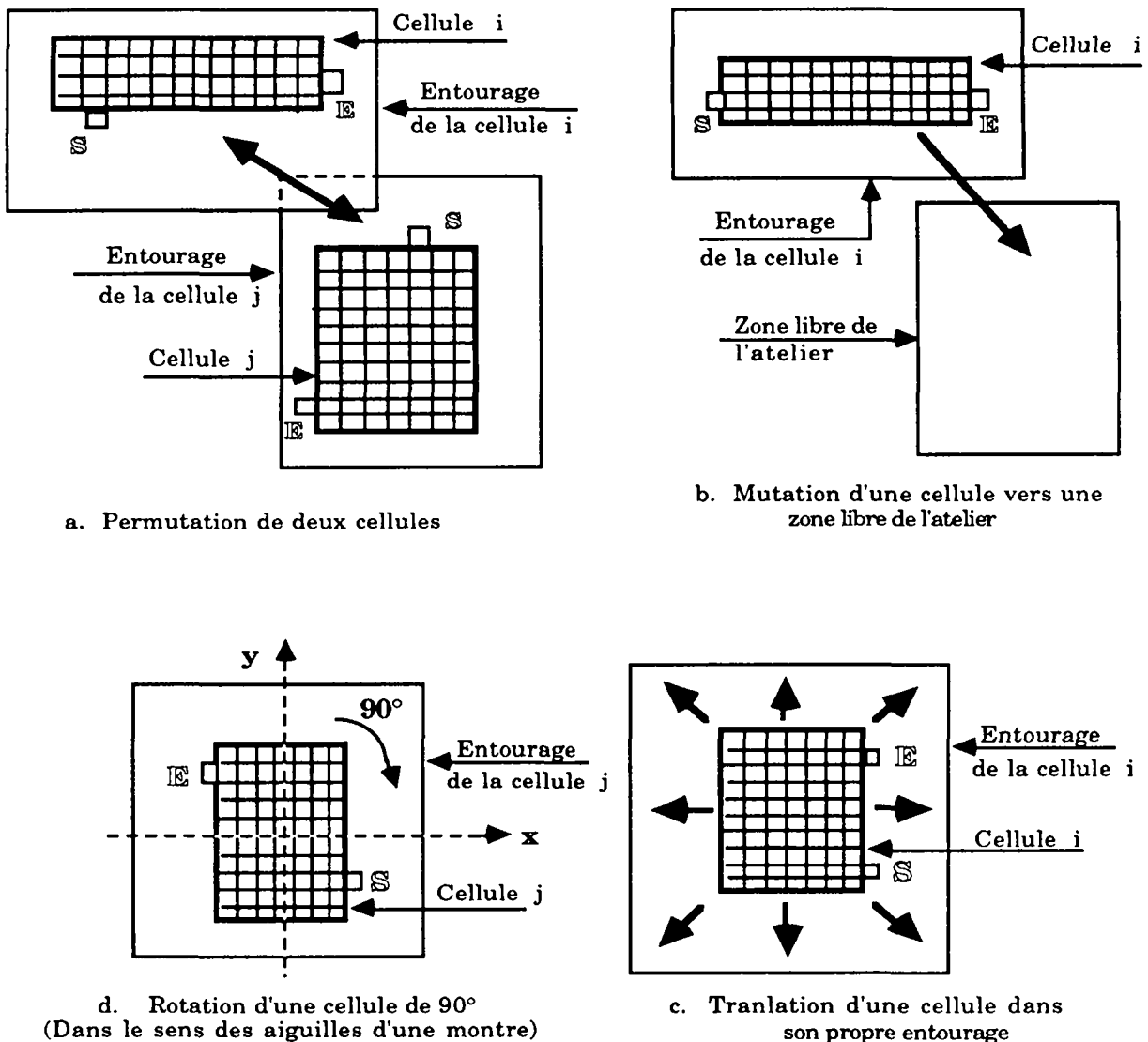


fig.12 Transformations élémentaires

Détermination des chemins inter-cellules à distance minimale :

a - Présentation du problème :

Soit un atelier de fabrication où N_c cellules sont disposées suivant une certaine configuration. Chacune des cellules dispose d'une entrée et d'une sortie. L'atelier peut aussi contenir des zones interdites (voir figure 14).

Il faut trouver, pour chaque couple de cellules (i, j) élément de $\{1, 2, \dots, N_c\}^2$ avec $i \neq j$, le chemin le plus court reliant la sortie de la cellule i à l'entrée de la cellule j , et le chemin reliant la sortie de la cellule j à l'entrée de la cellule i , qui évitent tous les obstacles (cellules et zones interdites) se trouvant dans l'atelier.

b - Résolution du problème :

La résolution de ce problème se fait en deux étapes. La première étape consiste à modéliser l'atelier, comme l'indique la figure 15. Cela nous permet, d'une part de mettre en évidence les zones où le transporteur peut se déplacer et , d'autre part de discrétiser l'espace géométrique d'évolution du transporteur.

Ce n'est que dans la deuxième étape que le problème proprement dit sera résolu. Après modélisation, le problème se pose comme suit :

Trouver une séquence **S** de blocs **B_i**, **i = 1, 2, ..., n**, correspondant au chemin le plus court joignant la sortie d'une ressource à l'entrée d'une autre, tels que :

- **B_i** est de couleur **0**, pour tout **i** (on ne se d'place que dans les zones libres)
- **B₁** contient la sortie de la cellule de départ,
- quels que soient **i, j** éléments de **{1, 2, ..., n}** **i ≠ j**, **B_i ≠ B_j**, (on ne repasse jamais deux fois sur le même bloc),
- pour tout **i** élément de **{2, 3, ..., n}**, **B_{i-1}** est adjacent à **B_i**,
- **B_n** contient l'entrée de la cellule d'arrivée.

Les déplacements du transporteur lors de ses passages d'un bloc à un autre sont identiques à ceux d'une **tour dans un jeu d'échecs**. La sommation des distances élémentaires parcourues lors du passage d'un bloc à un autre nous donne la distance totale parcourue cherchée.

Nous utilisons pour cela la **méthode "Branch and Bound"** (B&B). Si **N_c** est le nombre de ressources installées dans l'atelier, nous aurons à trouver **N_c x (N_c - 1)** chemins. Pour chaque couple (sortie de la cellule **i**, entrée de la cellule **j**) il peut y avoir plusieurs chemins possibles et il s'agit de trouver le plus court. La méthode du B&B, qui est une méthode itérative examinant toutes les possibilités et écartant prématurément toutes celles qui mènent à de mauvaises solution, nous permettra d'extraire ce plus court chemin. Elle se base sur la connaissance de deux paramètres appelés **borne supérieure** et **borne inférieure**. Elle est decrite dans [Pro 90] chapitre 5.

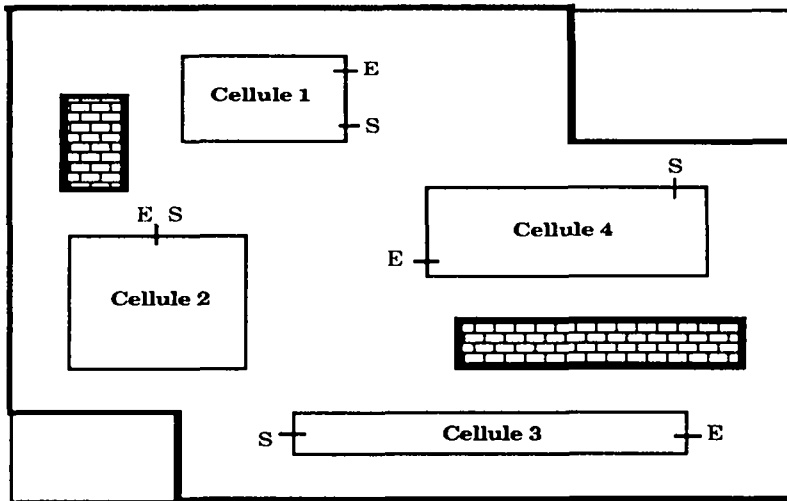


fig. 14 Configuration d'un atelier de fabrication

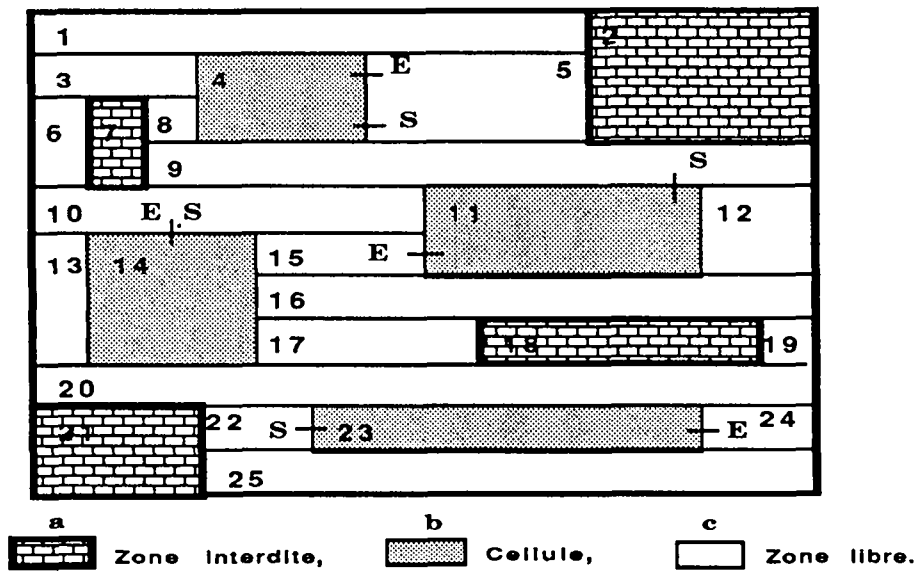


fig. 15 Modèle géométrique de l'atelier

4. CONCLUSION

L'agencement des ressources dans un atelier de fabrication est un problème complexe. Il dépend étroitement de la nature des produits et de la taille du système de fabrication. Dans ce travail, nous avons visé principalement les systèmes de production cellulaires pour lesquels nous avons présenté une approche en trois phases, adoptée par le projet **S.A.G.E.P.**. Ces trois phases sont :

- la phase de composition des cellules,
- la phase d'aménagement interne des cellules,
- la phase d'installation des cellules sur le sol de l'atelier.

La troisième phase constitue le thème principal.

La résolution du problème posé dans la troisième phase est basée sur une modélisation géométrique de l'environnement comme support de la solution et sur la technique du **Recuit Simulé** comme méthode de résolution. Cette technique d'optimisation procède par amélioration.

A la différence de la plupart des approches actuelles, celle-ci présente les avantages suivants :

- elle utilise la distance minimale réelle **Dist** ($C_i \rightarrow C_j$) entre la sortie d'une ressource et l'entrée d'une autre,
- elle utilise une matrice des flux inter-ressources **Trafcel** ($C_i \rightarrow C_j$) non symétrique,
- les transformations élémentaires, permettant de passer d'une configuration à une configuration voisine, recouvrent la plus grande partie de l'espace d'états du problème,
- elle accepte tous les types de ressources (cellules, postes de travail, machines, zones de stockage, ...) quelles que soient leurs dimensions, pourvu que ces ressources aient une entrée et une sortie (ces dernières peuvent être confondues),
- elle accepte, et considère comme produit, tout ce qui est transportable dans l'atelier en lui associant un routage,
- elle n'impose pas d'emplacement précis vers lequel les ressources seront affectées, sauf pour celles qui sont soumises à une forte contrainte de positionnement dans l'atelier,

- elle accepte n'importe quel critère et en particulier ceux qui font intervenir les flux de produits entre les ressources et les distances inter-ressources,
- elle accepte toute nouvelle contrainte.

Cependant, certaines améliorations restent à faire :

- trouver des méthodes ou des heuristiques de détermination des paramètres de contrôle du recuit simulé,
- trouver tous les entourages d'une cellule donnée, utiles lors des transformations élémentaires,
- permettre des orientations obliques des ressources dans l'atelier.

ANNEXE

I. Les utilitaires :

I.1. Détermination des zones libres de l'atelier :

Remarques préliminaires :

- Toutes les formes (atelier, zones interdites, cellules) que nous traitons sont des formes rectangulaires.

- Durant cette étape nous ne faisons pas de distinction entre zones interdites et cellules, car toutes les deux sont considérées comme des obstacles. Le nombre de ces obstacles sera : $N_o = N_c + N_z$;

où : N_c est le nombre de cellules installées,

N_z est le nombre de zones interdites.

a - Présentation du problème :

Etant donné un atelier sous une configuration en construction ou finie, représentée par la grille et sa matrice **Matel** [$M \times N$] associée. On doit trouver tous les blocs libres rectangulaires de l'atelier, dans les directions verticale et horizontale. La figure I.1 donne un exemple.

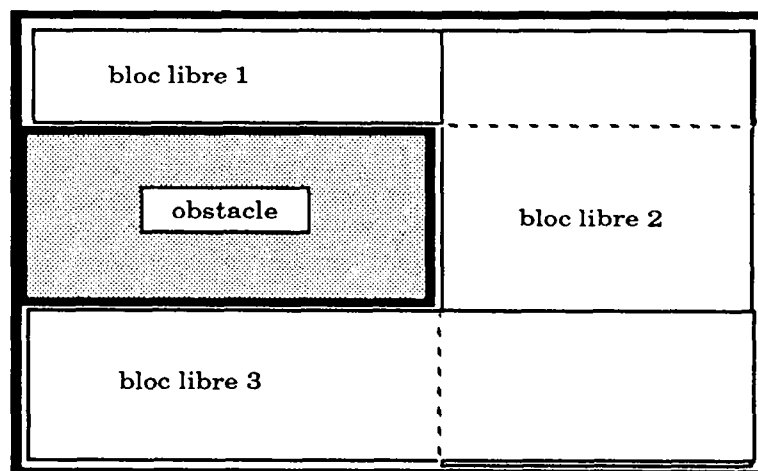


fig. I.1 Exemple d'espaces libres à déterminer

b - Résolution du problème :

La résolution de ce problème se fait en deux phases, la première phase consiste à déterminer un sommet de chacun des rectangles et la seconde phase consiste à déduire le reste des rectangles partant des sommets précédemment trouvés :

Première phase, Détermination d'un sommet de chacun des rectangles :

Ces sommets, situés sur la maille du haut à gauche des blocs libres rectangulaires recherchés (voir figure I.2).

L'algorithme de détermination de ces points sur la grille qui recouvre l'atelier est le suivant :

Pour $o = 1$ à N_o ,

Vérifier s'il s'agit d'un cas a, b ou c,

* si cas a :

- prospection horizontale.

* sinon, si cas b :

- prospection verticale.

* sinon, si cas c :

- prospection horizontale,

- prospection verticale.

* sinon :

- cet obstacle est dans le coin du bas à droite,
il n'est pas pris en compte.

Fin de boucle.

Algorithme de la procédure de prospection horizontale :

1. On considère un point de départ de coordonnées (x_d, y_d) ,

2. Pour $i = x_d$ à 0;

2.1. Vérifier si la maille de coordonnées $(i-1, y_d)$ appartient à un obstacle;

2.2.1. Si oui, * on vérifie si le point (i, y_d) a été déjà pris comme sommet;

si oui, on ne le conserve pas et on

obstacle, on passe à un autre point de départ.
Fin de la boucle 2.

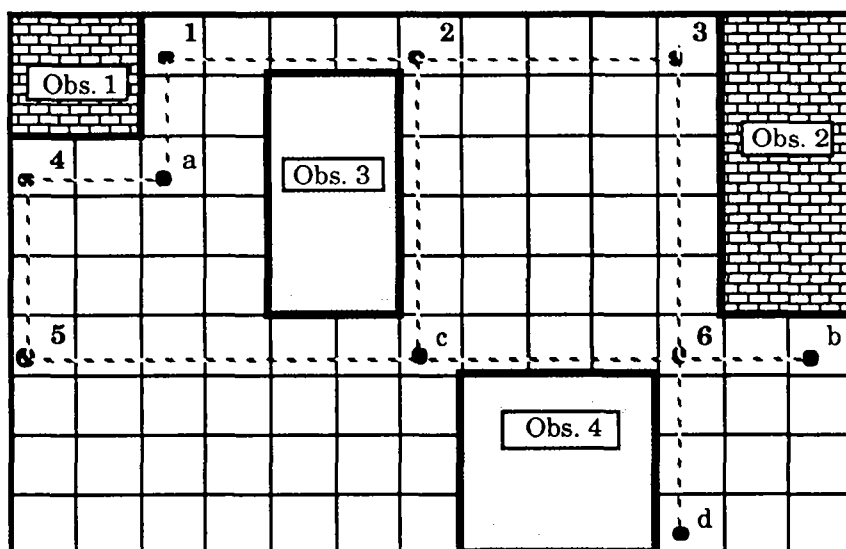


fig. I.2 Détermination des sommets des rectangles libres

Deuxième étape, Détermination des blocs libres ,

Cette deuxième phase consiste à déduire tous les blocs rectangulaires libres, à partir des points trouvés pendant la phase précédente. Chacun de ces points peut engendrer plus d'un bloc. Par exemple, dans la figure I.3, le point 5 engendre les deux blocs 6 et 7.

En considérant ces points dont le nombre est noté N_{sommet} deux situations sont possibles :

- cas A: le sommet de départ ne se trouve pas sur la dernière ligne de la grille,
- cas B: le sommet de départ se trouve sur la dernière ligne de la grille,

L'algorithme suivant décrit la manière de déterminer de ces blocs.

Pour $s = 1$ à N_{sommet}

vérifier s'il s'agit du cas a ou b,

- * si cas a :
 - procédure A,
- * sinon si cas b :
 - procédure B,

Fin de la boucle.

On rappelle que :

- **M** est le nombre de colonnes et **N** est le nombre de lignes de la grille.
- Par obstacle on entend zone interdite, ressource mais aussi les limites de l'atelier.

Algorithme de la procédure A (suivre sur la figure I.3) :

- 1 . Le sommet considéré a pour coordonnées (A, B) avec $B = 0$.
- 2 . On fixe la limite initiale sur l'axe x, $\text{limix} = M$.
- 3 . Pour $j = B$ à N ;
 - 3.1 . Pour $i = A$ à limix ;
 - Si à cette abscisse, la limite latérale gauche d'un obstacle est atteinte pour la première fois, c'est à dire que le point $(i+1, j)$ appartient à cet obstacle.
 - cette limite est conservée, si ce bloc est accepté, comme l'abscisse de son côté droit,
 - on modifie alors la limite sur l'axe x, si $i < \text{limix}$: $\text{limix} = i + 1$.
 - Si à cette ordonnée, la limite inférieure d'un obstacle est atteinte pour la première fois, c'est à dire que le point $(i, j+1)$ appartient à cet obstacle :
 - si, la limite latérale droite de ce bloc est atteinte et que ce bloc est acceptable¹, on le conserve.
 - s'il n'est pas acceptable¹ on ne le conserve pas.
- Si le point atteint est (A, j) et que $(A, j+1)$ appartient à un obstacle, on arrête et on passe

à un autre sommet.

Fin de la boucle 3.1.

Fin de la boucle 3.

Algorithme de la procédure B (à suivre avec la figure I.4) :

- 1 . Le sommet considéré a pour coordonnées (A, B) avec $B = N - 1$.
- 2 . Pour $i = A$ à M ;
 Si la limite latérale gauche d'un obstacle est atteinte
 (c'est à dire que le point de coordonnées $(i, N-1)$
 appartient à cet obstacle), on conserve ce bloc,

Fin de la boucle 2.

Test d'acceptation d'un bloc :

A chaque fois qu'un bloc est généré, on vérifie s'il est acceptable ou non.

Un bloc est acceptable si chacun de ses côtés est adjacent à un ou plusieurs obstacles ou à un côté de l'atelier. Dans la figure I.3 le bloc libre 7 est adjacent aux obstacles 3 et 4 et aux côtés gauche et bas de l'atelier.

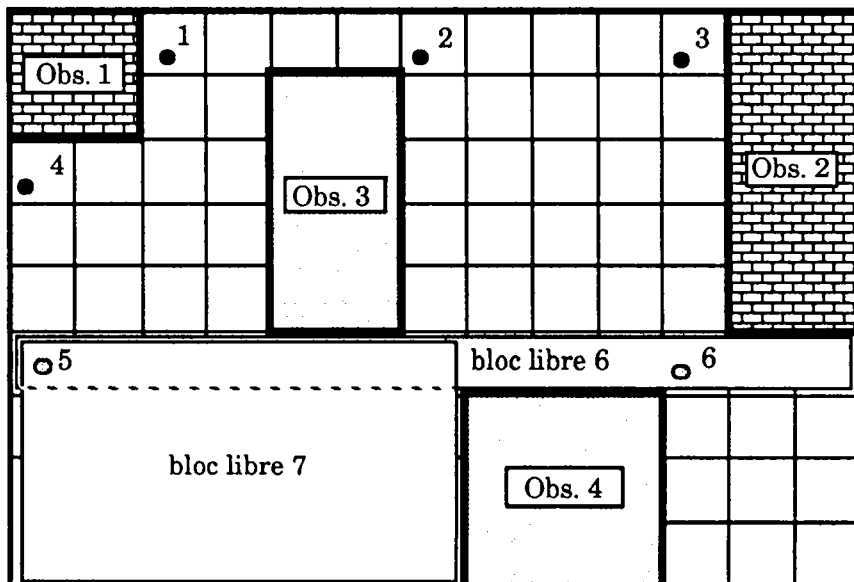


fig. I.3 Détermination des blocs rectangulaires libres (cas a)

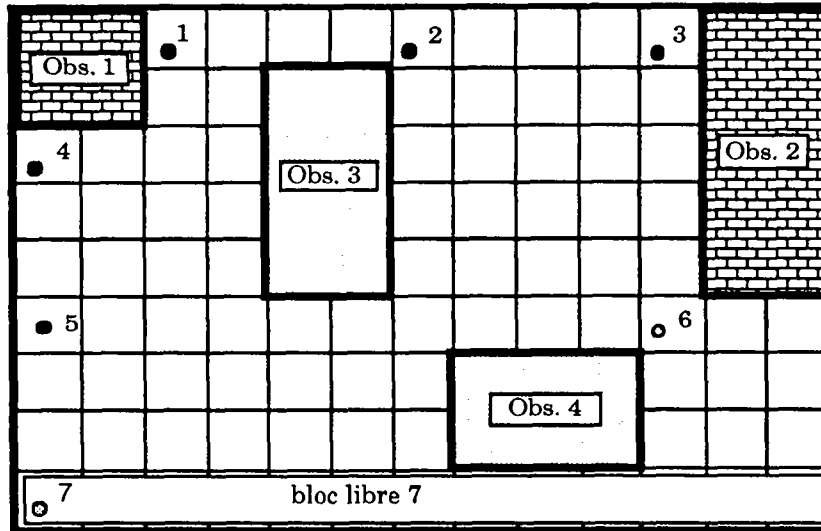


fig. I.4 Détermination des blocs rectangulaires libres (cas b)

I.2. Détermination de l'entourage libre d'une cellule donnée :

Cette opération est nécessaire à chaque fois que l'on veut changer la position (par translation) ou la disposition (par rotation) d'une cellule donnée. Il est bien clair que toute cellule peut admettre plus d'un seul entourage libre. Cependant, la méthode que nous proposons ne donne qu'un seul de ces entourages, au moment où il serait plus intéressant d'avoir tous les entourages possibles et pouvoir ainsi choisir celui qui conviendrait le mieux pour la transformation élémentaire demandée. Ce point restera donc ouvert.

Le processus permettant d'obtenir un entourage libre d'une cellule donnée est le suivant (à suivre avec la figure I.5) :

Comme le montre la figure ci-dessus le rectangle limitant l'entourage libre d'une cellule C_i donnée est défini par quatre rectangles élémentaires (numérotés de 1 à 4). Chacun de ces rectangles nous donnera probablement une, deux ou aucune limite de l'entourage recherché.

- le n° 1 donnera la limite du côté haut (Lh_1) et / ou celle du côté droit (Ld_1),
- le n° 2 donnera la limite du côté droit (Ld_2) et / ou celle du côté bas (Lb_1),
- le n° 3 donnera la limite du côté bas (Lb_2) et / ou celle du côté gauche (Lg_1),
- le n° 4 donnera la limite du côté gauche (Lg_2) et / ou celle du côté haut (Lh_2).

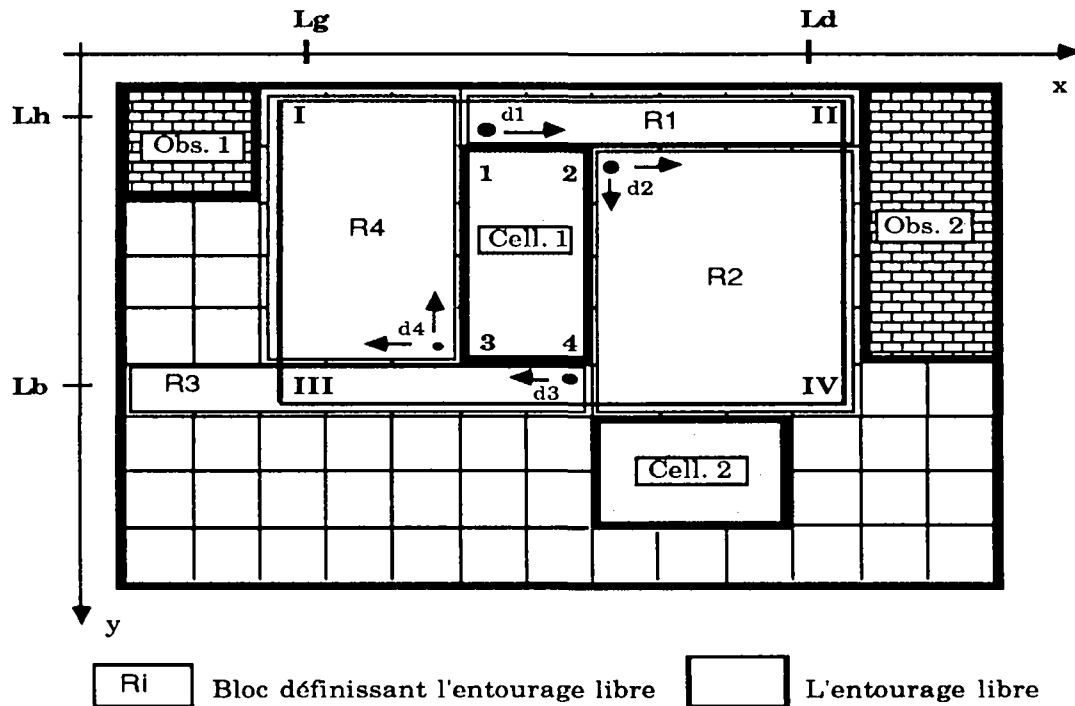


fig. I.5 Détermination de l'entourage libre d'une cellule

- Alors,
- limite du haut : $Lh = \min (Lh_1, Lh_2)$,
 - limite de droite : $Ld = \max (Ld_1, Ld_2)$,
 - limite du bas : $Lb = \max (Lb_1, Lb_2)$,
 - limite de gauche : $Lg = \min (Lg_1, Lg_2)$,

Les coordonnées des sommets du rectangle limitant l'entourage de la cellule C_i sont :

- sommet I : (Lg, Lh) ,
- sommet II : (Ld, Lh) ,
- sommet III : (Lg, Lb) ,
- sommet IV : (Ld, Lb) .

La détermination de chacun de ces rectangles est une prospection dans la grille qui prend son départ sur un des sommets de la cellule considérée. Cette prospection se fait pour chaque sommet dans deux directions bien précises du plan, comme l'indique la figure I.5.

II. Exemple d'application :

Considérons un atelier de fabrication cellulaire pour lequel on voudrait trouver un agencement optimal des ressources (cellules). Les données de cet atelier sont les suivantes :

DONNEES LOGIQUES :

a. Les produits :

Cet atelier est destiné à fabriquer 8 types de produits. Ces produits suivent respectivement les routages suivants : (**M_i** désigne la machine d'indice **i**)

- Type 1:** M3, M1, M2, M3.
- Type 2:** M5, M13, M10, M2.
- Type 3:** M12, M6, M7, M1.
- Type 4:** M7, M11, M4, M7, M6, M2.
- Type 5:** M1, M7, M3, M9.
- Type 6:** M5, M13, M2.
- Type 7:** M4, M10, M13.
- Type 8:** M6, M2, M9.

b. Les cellules :

Les 13 machines de l'atelier sont réparties en 4 cellules. Ces cellules ont la composition suivante :

- Cellule 1 :** M1, M3.
- Cellule 2 :** M2, M6, M7, M9.
- Cellule 3 :** M4, M5, M8, M12.
- Cellule 4 :** M10, M11, M13.

DONNEES GEOMETRIQUES :

Soit " **ul** " l'unité de longueur.

Le passage de l'aspect réel des constituants physiques de l'atelier (l'atelier avec ses zones interdites et les cellules) au modèle géométrique est donné dans la figure II.1.

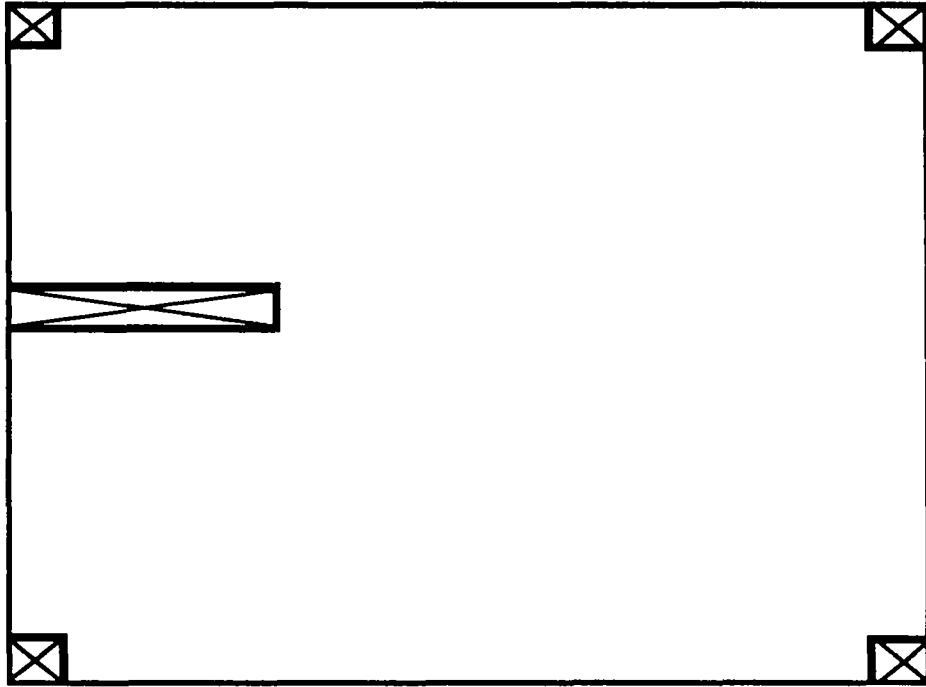


fig. II.1-a L'atelier réel

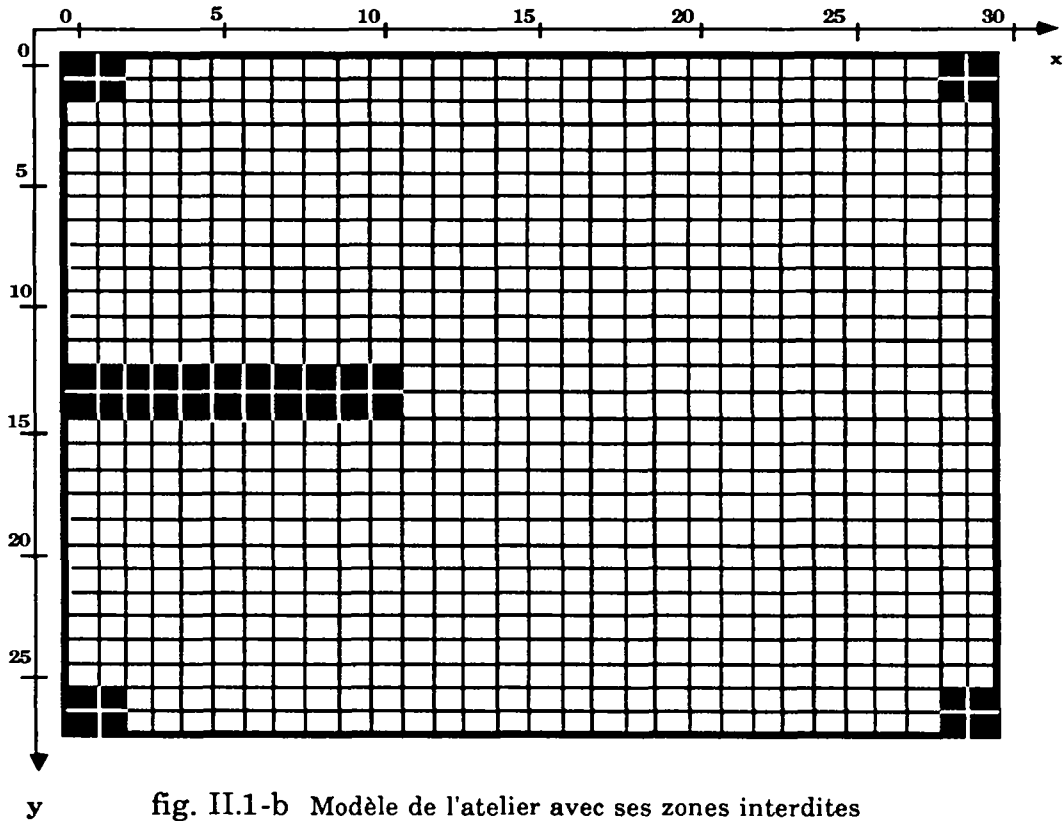


fig. II.1-b Modèle de l'atelier avec ses zones interdites

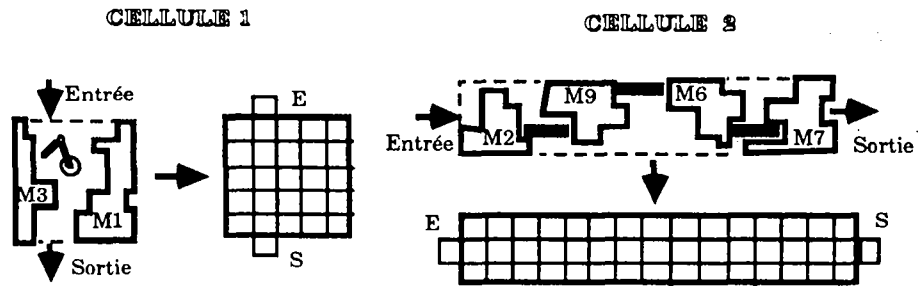


fig.II.1-c Passage d'une cellule réelle à son modèle (cellules 1 et 2)

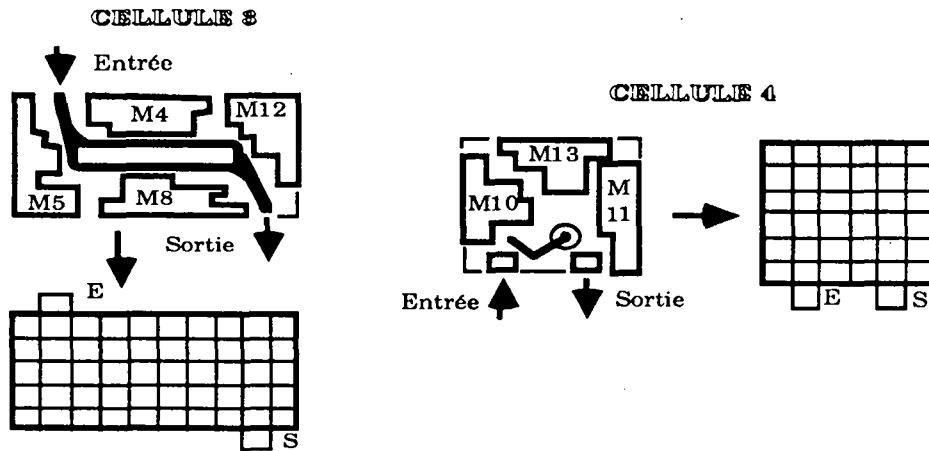


fig.II.1-d Passage d'une cellule réelle à son modèle (cellules 3 et 4)

a. Dimensions de l'atelier :

Relativement à un système d'axes orthonormés (voir figure II.1-b), les dimensions de l'atelier sont de **30 ul** suivant l'axe **X** et de **28 ul** suivant l'axe **Y**.

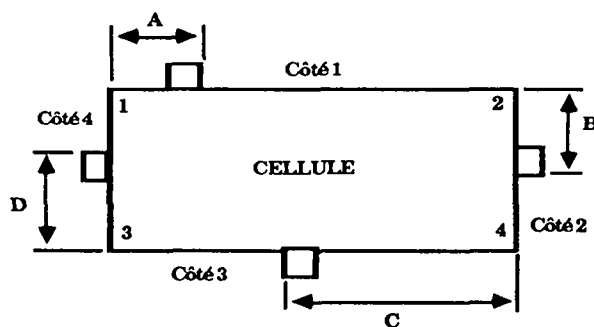
b. Les zones interdites :

L'atelier proposé comporte **5 zones interdites** dont les coordonnées des sommets sont (relativement au même repère) :

- Zone 1:** (0,0), (1,0), (0,1), (1,1).
- Zone 2:** (28,0), (29,0), (28,1), (29,1).
- Zone 3:** (0,12), (11,12), (0,13), (11,13).
- Zone 4:** (0,26), (1,26), (0,27), (1,27).
- Zone 5:** (28,26), (29,26), (28,27), (29,27).

c. Les cellules :

Les côtés parallèles d'une cellule ont la même dimension et les positions de l'entrée et de la sortie sont données conformément à la règle décrite dans la figure II.2.



Si l'entrée/sortie se trouve sur la côté 1, sa position est donnée par rapport au sommet 1 (A).

Si l'entrée/sortie se trouve sur la côté 2, sa position est donnée par rapport au sommet 2 (B).

Si l'entrée/sortie se trouve sur la côté 3, sa position est donnée par rapport au sommet 4 (C).

Si l'entrée/sortie se trouve sur la côté 4, sa position est donnée par rapport au sommet 3 (D).

fig. II.2 Positionnement des entrées/sorties

Cellule 1 : Côté 1 : 5 ul.
 Côté 2 : 5 ul.
 Entrée : sur le côté 1 à 2 ul de sa première extrémité.
 Sortie : sur le côté 3 à 4 ul de sa première extrémité.

Cellule 2 : Côté 1 : 15 ul.
 Côté 2 : 3 ul.
 Entrée : sur le côté 4 à 2 ul de sa première extrémité.
 Sortie : sur le côté 2 à 2 ul de sa première extrémité.

Cellule 3 : Côté 1 : 10 ul.
 Côté 2 : 5 ul.
 Entrée : sur le côté 1 à 2 ul de sa première extrémité.
 Sortie : sur le côté 3 à 2 ul de sa première extrémité.

Cellule 4 :
 Côté 1 : **6 ul.**
 Côté 2 : **6 ul.**
 Entrée : sur le **côté 3 à 5 ul** de sa première extrémité.
 Sortie : sur le **côté 3 à 2 ul** de sa première extrémité.

d. La distance minimale entre les objets se trouvant dans l'atelier :

Cette distance est de **2 ul.**

LES CONTRAINTES :

La cellule **C4** est soumise à une forte contrainte de positionnement dans l'atelier. Elle garde la même position et la même orientation dans l'atelier lors du processus du recuit simulé. Elle sera placée comme suit :

Sommet 1 : $x = 14, y = 2.$

Sommet 2 : $x = 19, y = 2.$

Sommet 3 : $x = 14, y = 7.$

Sommet 4 : $x = 19, y = 7.$


Son **entrée** est en : $x = 15, y = 8.$

Sa **sortie** est en : $x = 18, y = 8.$

PROCESSUS DE RESOLUTION :

a. Calcul de la matrice du trafic inter-cellules :

A partir des données logiques (routages, composition des cellules), on calcule la matrice du trafic inter-cellules suivante :

	C1	C2	C3	C4
C1	0	2	0	0
C2	2	0	0	2
C3	0	2	0	3
C4	0	3	1	0

c. Processus du recuit simulé :

c.1. Les paramètres de contrôle du recuit simulé :

Température initiale	: 100.00
Température finale	: 1.0000
Raison géométrique de diminution de la température	: 0.9000
Nombre admissible de refus	: 5
Nombre admissible d'acceptations	: 5

c.2. Déroulement du processus :

Nous donnons dans ce qui suit quelques configurations intermédiaires du début (hautes températures), du milieu (températures moyennes) et de la fin du processus (basses températures).

A - AU DEBUT DU PROCESSUS (HAUTES TEMPERATURES) :

Le déplacement de la cellule C2 est possible et est réalisé.
Le coût du trafic sous cette configuration est : 293.000000

```

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
0 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1 1
1 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1 1
2 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
3 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
4 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
5 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
6 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
7 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
8 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
9 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
10 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
11 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
12 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
13 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
14 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
15 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
16 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
17 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
18 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
19 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
20 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
21 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
22 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
23 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
24 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
25 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
26 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
27 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
    
```

r = 0.269971
la température est de 100.000000
Cette configuration est acceptée.

Le déplacement de la cellule C1 est possible et est réalisé.
Le coût du trafic sous cette configuration est : 281.000000

```

0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29
0 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1 1
1 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . 1 1
2 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
3 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
4 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
5 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
6 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
7 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
8 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
9 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
10 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
11 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
12 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
13 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1
14 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
15 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
16 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
17 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
18 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
19 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
20 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
21 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
22 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
23 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
24 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
25 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
26 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
27 1 1 . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . . .
    
```

r = 0.404983
la température est de 100.000000
Cette configuration est acceptée.

c.3 Résultat final :

LA GRILLE

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27		
0	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1	
1	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	1	1
2	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
3	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
4	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
5	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
6	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
7	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
8	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
9	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
10	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
11	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
14	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
15	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
16	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
17	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
18	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
19	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
20	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
21	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
22	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
23	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
24	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
25	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
26	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
27	1	1	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

LES CELLULES

La cellule 1 se trouve en :

Le sommet 1 : X = 4 Y = 16
 Le sommet 2 : X = 8 Y = 16
 Le sommet 3 : X = 4 Y = 20
 Le sommet 4 : X = 8 Y = 20
 Son entrée est en : X = 7 Y = 21
 Sa sortie est en : X = 7 Y = 15

La cellule 2 se trouve en :

Le sommet 1 : X = 14 Y = 10
 Le sommet 2 : X = 16 Y = 10
 Le sommet 3 : X = 14 Y = 24
 Le sommet 4 : X = 16 Y = 24
 Son entrée est en : X = 15 Y = 9
 Sa sortie est en : X = 15 Y = 25

La cellule 3 se trouve en :

Le sommet 1 : X = 2 Y = 4
 Le sommet 2 : X = 11 Y = 4
 Le sommet 3 : X = 2 Y = 8
 Le sommet 4 : X = 11 Y = 8
 Son entrée est en : X = 3 Y = 3
 Sa sortie est en : X = 10 Y = 9

La cellule 4 se trouve en :

Le sommet 1 : X = 14 Y = 2
 Le sommet 2 : X = 19 Y = 2
 Le sommet 3 : X = 14 Y = 7
 Le sommet 4 : X = 19 Y = 7
 Son entrée est en : X = 15 Y = 8
 Sa sortie est en : X = 18 Y = 8

LE COUT DU TRAFIC DE LA CONFIGURATION INITIALE EST : 238.000000 ,
 LE COUT DU TRAFIC DE CETTE CONFIGURATION EST : 154.000000 ,
 LA DIMINUTION DU COUT DU TRAFIC EST DE 35.294118 POURCENT.

BIBLIOGRAPHIE

- [Anc 90] D. Anciaux
"Etude d'agencement spatial dans un atelier de production selon le concepte de technologie de groupe"
Thèse de doctorat de l'université de Metz; Option: Production automatisée, 1990.
- [Bez 90] P. Beziat
"Conception d'un système d'implantation d'atelier de production : PLOOT"
Thèse de doctorat de l'université des sciences et techniques de Longuedoc 1990.
- [Cha 87] P. Chamoni & G. Wäscher
"MICROLAY : An interactive computer program for factory layout planning on microcomputer"
European Journal of Operational Research 31 pp 185-193 1987.
- [Ffp 86] Sondage
"Fabrication Flexible"
Machine production (Hors série), Octobre-Novembre 1986.
- [Har 90] G. Harhalakis, J. M. Proth & X. L. Xie
"Manufacturing cell design using simulated annealing: an industrial application"
Journal of Intelligent Manufacturing Vol. 1, n° 3, pp 185-191, 1990.
- [Has 86] M.D. Hassan, G.L. Hogg & D.R. Smith
"SHAPE : A construction algorithm for area placement evaluation"
Journal of Production Research, Vol. 2, n° 5, pp 1283-1295, 1986.
- [Hil 91] J. Hilger, G. Harhalakis & J. M. Proth
"Manufacturing cells and part families: Generalization of GT method"
Information and Decision Technologies Vol. 17 pp 51-61 1991.
- [Iwg 52] I.W. Grant
"Factory planning and plant layout"
(livre) Prentice-hall, Inc. Englewood Cliffs, New Jersey 1952.
- [Kus 86] (edi.) A. Kusiak
"Modelling and design of flexible manufacturing systems"
(livre) Manufacturing research and technology 3 1986.
- [Maz 90] R. L. Maziasz & J.P. Hayes
"Layout optimisation of state CMOS functional Cells"
IEEE Transactions on computer-aided design Vol.9 n° 7 1990.
- [Met 53] N. Metropolis, A&M. Rosenbluth & A&E. Taller
"Equation of state calculation by fast computing machine"
Journal chem.phys. 21 pp 1087-1092, 1953.
- [Mrd 55] M.D. Richard
"Practical Plan layout"
(livre) Mc Graw-Hill Book company 1955.
- [Nag 90] R. Nagi, G. Harhalakis & J.M. Proth
"Multiple routings and capacity considerations in group technology applications"
International journal of production research Vol. 28 n° 12 pp 2243-2257 1990.

[Pro 90] J. M. Proth & H. P. Hillion
"Mathematical tools in production management"
Plenum publishing corporation New york U.S.A 1990.

[Ray 70] T.E. El-Rayad & R.H. Hollier
"A review of plant design technics"
International journal of production research Vol. 8 n° 3 pp 263-278 1970.

[Sec 90] C. Sechen
"Cuip-Planning, Placement, and global routing of macro-cell integrated circuits using simulated annealing"
International journal of computer aided VLSI design 2, pp. 127-159, 1990.

[Sou 91] A. Souilah
"Agencement des Ressources dans un Atelier de Fabrication"
Thèse de magistère présentée au Centre de Développement des Technologies avancées du Haut Commissariat à la Recherche, ALGERIE, Mai 1991.

ISSN 0249 - 6399