

Titre: Conception d'implantation à épine dorsale : couplage et
Title: ordonnancement de département

Auteurs: Diane Riopel, & André Langevin
Authors:

Date: 1991

Type: Rapport / Report

Référence: Riopel, D., & Langevin, A. (1991). Conception d'implantation à épine dorsale : couplage et ordonnancement de département. (Rapport technique n° EPM-RT-91-18). <https://publications.polymtl.ca/9592/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/9592/>
PolyPublie URL:

Version: Version officielle de l'éditeur / Published version

Conditions d'utilisation: Tous droits réservés / All rights reserved
Terms of Use:

Document publié chez l'éditeur officiel

Document issued by the official publisher

Institution: École Polytechnique de Montréal

Numéro de rapport: EPM-RT-91-18
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:

06 JAN. 1992

**CONCEPTION D'IMPLANTATION À ÉPINE DORSALE:
couplage et ordonnancement de départements**

par

André LANGEVIN

et

Diane RIOPEL

EPM/RT-91/18

gratuit

CONCEPTION D'IMPLANTATION À ÉPINE DORSALE:
couplage et ordonnancement de départements

par

André LANGEVIN
Département de mathématiques appliquées

Diane RIOPEL
Département de génie industriel

École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succ. A
Montréal, Québec
H3C 3A7

Rapport technique

Novembre 1991

Remerciements

Nous désirons souligner le travail de Mesdemoiselles Céline Bluteau et Gaël Tanneau de l'École Polytechnique Féminine de Paris. Lors de leur stage d'études à l'été 91 au département de génie industriel, elles ont participé activement à la partie expérimentale de ce projet.

Table des matières

	page
Remerciements	2
Table des matières	3
Table des tableaux	5
Table des figures	6
Résumé	7
1- Introduction	8
2- Description du problème	10
3- Méthode de design	12
4- Couplage et ordonnancement des départements à une porte	14
4.1 Méthode	14
4.2 Expérimentation	14
4.2.1 Exemple généré	14
4.2.2 Exemple de Nugent et al. (1968)	16
4.3 Vérification de la performance de l'heuristique	19
5- Couplage et ordonnancement des départements à une porte d'entrée et une porte de sortie	22
5.1 Méthode	22
5.2 Expérimentation	23
5.2.1 Exemple de Tompkins et White (1984)	23
5.2.2 Exemple de Nugent et al. (1968)	24
5.2.3 Exemple de Montreuil (1991)	26
6- Conclusion	29
7- Bibliographie	30
Annexe 1 Heuristique à une porte appliquée à l'exemple généré	31
Annexe 2 Heuristique à une porte appliquée à l'exemple de Nugent et al. (1968)	36

Table des matières (suite)

	page
Annexe 3 Heuristique à une porte appliquée à l'exemple de Montreuil et Ratliff (1989)	41
Annexe 4 Heuristique à deux portes appliquée à un exemple de Tompkins et White (1984)	44
Annexe 5 Heuristique à deux portes appliquée à l'exemple de Nugent et al. (1968)	48
Annexe 6 Heuristique à deux portes appliquée à l'exemple de Montreuil (1991)	61

Table des tableaux

	page
Tableau 1: Fréquences de déplacement de l'exemple générée	15
Tableau 2: Fréquences de déplacement de l'exemple de Nugent et al. (1968)	17
Tableau 3: Fréquences cumulées de l'exemple de Nugent et al. (1968)	18
Tableau 4: Fréquences de déplacement de l'exemple de Montreuil et Ratliff (1989)	21
Tableau 5: Fréquences de déplacement d'un exemple de Tompkins et White (1984)	23
Tableau 6: Fréquences de déplacement de l'exemple de Montreuil (1991)	27

Table des figures

	page
Figure 1: Méthode de design d'implantation à épine dorsale .	13
Figure 2: Solution proposée pour l'exemple généré	15
Figure 3: Solution proposée pour l'exemple de Nugent et al. (1968)	16
Figure 4: Implantation proposée par Montreuil et Ratliff (1989)	19
Figure 5: Couplage et ordonnancement équivalents	19
Figure 6: Solution proposée pour l'exemple de Montreuil et Ratliff (1989)	20
Figure 7: Solution proposée pour l'exemple de Tompkins et White (1984)	24
Figure 8: Solution proposée pour l'exemple de Nugent et al. (1968)	25
Figure 9: Solution proposée pour l'exemple de Montreuil (1991)	28

Résumé

Le problème de design d'implantation générale consiste à déterminer un emplacement pratique et efficace des différents départements et cellules de travail dans une usine ou un bureau, de façon à minimiser le déplacement du matériel et du personnel tout en affectant l'espace suffisant de travail à chaque cellule ou département. Les méthodes informatisées courantes utilisent le tableau des relations de proximité souhaitées ou le tableau des flots entre les départements, mais elles ne tiennent pas compte des voies de circulation.

Une forme d'implantation dite "à épine dorsale" a été proposée ces dernières années. Cette forme d'implantation consiste à utiliser un ou des corridors comme squelette de design et à placer de chaque côté les différentes cellules de production.

Nous proposons une méthode de design d'implantation à épine dorsale qui minimise le déplacement total. Cette méthode se compose de trois étapes et ce rapport présente de façon plus spécifique la première qui couple et ordonne les départements le long de l'épine dorsale.

1. Introduction

Une implantation à épine dorsale est une forme de design d'implantation qui consiste à utiliser un couloir comme squelette de conception et à placer de chaque côté les différents départements. Le concept d'implantation à épine dorsale a été présenté la première fois en 1980 par James A. Tompkins. Ce concept voulait matérialiser deux qualités nécessaires aux implantations: la modularité et la flexibilité (Tompkins et Spain 1983). M. Tompkins (1989) les définit comme deux facettes importantes de l'adaptabilité des entreprises.

Le problème de design d'implantation générale consiste à déterminer un emplacement pratique et efficace des différents départements ou cellules de production dans une usine ou un service de façon à minimiser le déplacement total des produits et du personnel tout en affectant l'espace suffisant de travail à chaque cellule ou département. Dans ce genre d'implantation, le couloir central sert à la fois de voie de circulation aux produits et au personnel ainsi que d'aire d'entreposage temporaire des produits en cours de fabrication. Tompkins a proposé ce concept sans en fournir de méthode de construction. Les logiciels commercialisés comme CORELAP, ALDEP et PLANET ne proposent pas d'implantation de cette forme. Parmi les heuristiques, l'approche d'aménagement arbre (Montreuil et Ratliff 1989) s'adapte à l'utilisation du concept épine dorsale. Les travaux de A. Houshyar et L.F. McGinnis (1990)

portent sur l'ordonnancement (la localisation) des cellules de travail sur un seul côté de l'épine dorsale. Leurs travaux n'ont pas été généralisés pour un agencement des deux côtés du couloir d'alimentation.

Nous proposons ci-après une heuristique de résolution qui utilise comme critère d'évaluation les distances totales parcourues, distances réelles de poste d'entrée/sortie à poste d'entrée/-sortie des cellules de travail sur le couloir central, critère qui a été proposé par Riopel et Langevin (1991). Ce rapport porte, de façon spécifique, sur la première étape de l'heuristique pour les cas des départements possédant une seule porte d'entrée/sortie ou deux portes, une d'entrée et une de sortie.

2. Description du problème

Le problème que nous abordons est celui du design d'une implantation générale i.e. la détermination de l'emplacement des différents départements ou cellules de travail dans une usine. Considérant un type de design à "épine dorsale", le problème consiste donc à placer l'ensemble des départements ou cellules de chaque côté d'un corridor central. L'objectif est de trouver un agencement de ces départements de façon à minimiser la somme totale des déplacements:

$$\text{Min } \sum_{ij} d_{ij} f_{ij}$$

où d_{ij} est la distance de porte à porte (par le couloir) du département i au département j et où f_{ij} est la fréquence des déplacements entre les deux départements. Cependant, on recherche une solution qui donne une forme régulière (rectangulaire) pour le périmètre de l'implantation. On considère que chaque département est rectangulaire et que ses dimensions peuvent varier dans certaines limites.

Les méthodes informatisées actuelles (CRAFT, COFAD, etc.) utilisent les distances centroïde à centroïde, et ne tiennent pas compte des voies de circulation dans l'usine. Avant de les utiliser, il faut ajouter un certain pourcentage de surface à chaque département pour tenir compte des voies de circulation.

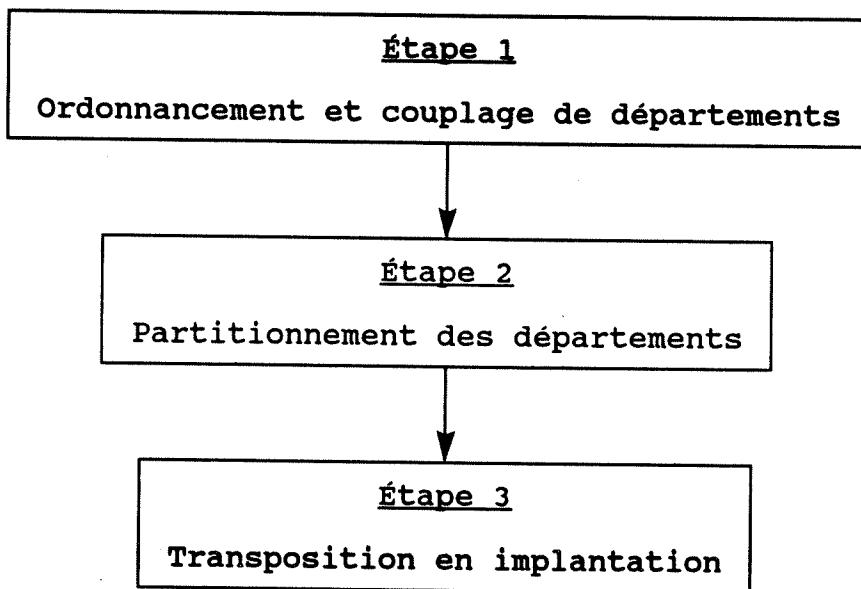
Riopel et Langevin (1990) ont observé que ce pourcentage pouvait considérablement varier d'une implantation à l'autre. De plus, les distances centroïde à centroïde peuvent ne pas constituer une bonne approximation des distances réelles par les couloirs. Enfin, ces méthodes assemblent les départements dans un agglomérat où les voies de circulation ne sont pas indiquées et tel que le périmètre de l'ensemble est souvent de forme tout à fait irrégulière. Ces designs d'implantations ne constituent alors qu'un premier jet qu'il faut considérablement retravailler pour obtenir une solution appropriée.

La méthode proposée ici vise à combler ces lacunes. L'obtention de forme régulière permettra, entre autres, la planification des espaces dans les tours à bureaux.

3. Méthode de design

La méthode est constituée de 3 étapes. Voir Figure 1. La première étape vise à former des couples de départements qui pourront se retrouver l'un en face de l'autre dans l'agencement et à ordonner ces couples le long de l'épine dorsale. À cette étape, on obtient une séquence ordonnée de paires mais sans en préciser pour chacune de quel côté de l'épine chaque département qui la compose sera placé. C'est l'objectif de la deuxième étape. Le nombre d'agencements possibles est de $2^{n/2-1}$ pour n départements. Parmi tous ces agencements, on recherche celui qui minimise les manutentions tout en obtenant une forme régulière pour l'implantation. La troisième étape transpose l'ébauche de solution en une solution finale d'implantation générale, c'est-à-dire arrêter la forme de chacun des départements selon leur flexibilité de forme respective et de déterminer les dimensions de l'usine pour obtenir une forme régulière avec un minimum de pertes d'espaces. L'impact sur la forme de l'implantation est pris en compte à l'étape 2 et 3 de ce processus. De plus, l'expérience et le jugement du planificateur sont mis à contribution pour aider à obtenir une solution appropriée.

Figure 1: Méthode de design d'implantation à épine dorsale



4. Couplage et ordonnancement des départements à une porte

4.1 Méthode

Si l'on considère que les distances intercellulaires les plus courtes sont pour des cellules en face l'une de l'autre sur l'épine dorsale, il s'agit de privilégier les paires de cellules aux fréquences de déplacements les plus grandes. Cette hypothèse est vraie pour des départements aux superficies égales et de forme relativement carrée. L'heuristique consiste à ordonner par ordre décroissant les fréquences de déplacements. Pour chaque valeur de ces fréquences, les nouveaux départements sont identifiés et placés de chaque côté de l'épine dorsale de façon à minimiser les distances parcourues pour cette valeur de fréquence. Cette analyse est répétée jusqu'à ce que tous les départements soient placés.

4.2 Expérimentation

4.2.1 Exemple générée

Cette méthode a été appliquée à l'exemple suivant, un atelier composé de 14 départements. Les fréquences de déplacement sont fournies au tableau 1. Il a fallu 10 itérations pour proposer un agencement. Ces 10 itérations ont utilisé 43 fréquences sur les 44 du tableau 1. Le détail des itérations est fourni à l'annexe 1. La solution proposée apparaît à la figure 2.

Département	Département													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1 Réception - Expédition	-	200				10			20					5
2 Entrepôt		-		15	50	10	15		5			50		5
3 Outilage			-		100		15					15		5
4 Débitage				-	30	10	10		5				1	5
5 Fraisage					-	10		20	10	10	50	25	2	10
6 Soudage						-			10			15		5
7 Tournage							-					25	10	2
8 Alésage								-				10		2
9 Perçage									-			5		
10 Rectification										-		5		2
11 Lavage											-	95		
12 Métrologie												-		5
13 Maintenance												-		
14 Services du personnel													-	

Tableau 1: Fréquences de déplacement de l'exemple généré

10	4	3	1	11	7	6
13	8	5	2	12	9	14

Figure 2: Solution proposée pour l'exemple généré

4.2.2 Exemple de Nugent et al. (1968)

Cet exemple est très particulier, des fréquences de déplacement sont présentes entre tous les départements et dans les deux sens de circulation. Cet exemple théorique est souvent utilisé dans la littérature pour éprouver des nouvelles méthodes. Les données brutes apparaissent au tableau 2. Il fournit les fréquences de déplacements entre 30 départements.

Pour appliquer l'heuristique, il a fallu premièrement additionner les fréquences de-à aux fréquences à-de. Les fréquences cumulées apparaissent au tableau 3. Les 435 fréquences cumulées varient de 18 à 1. Il a fallu 9 itérations pour placer les 30 départements. À chacune d'elles, il fallait placer entre 2 et 5 départements ce qui a amené à examiner plusieurs ordonnancements équivalents (exemple itération 8, 6 ordonnancements équivalents ont été conçus). Une seule solution est retenue et elle est représentée à la figure 3.

15	23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8	4	21
3	17	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9	14	20

Figure 3: Solution proposée pour l'exemple de Nugent et al. (1968)

Département	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	30	Total
1	1	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	7	3	4	5	6	7	8	4	5	6	7	8	9	135
2	3	1	1	2	3	4	2	1	2	3	4	5	3	2	3	4	5	6	4	3	4	5	6	7	5	4	5	6	7	8	117
3	2	4	1	1	2	3	3	2	1	2	3	4	4	3	2	3	4	5	5	4	3	4	5	6	6	5	4	5	6	7	108
4	0	0	3	1	1	2	4	3	2	1	2	3	5	4	3	2	3	4	6	5	4	3	4	5	7	6	5	4	5	6	102
5	0	10	4	0	1	5	4	3	2	1	2	6	5	4	3	2	3	7	6	5	4	3	4	8	7	6	5	4	5	119	
6	2	4	0	0	5	6	5	4	3	2	1	7	6	5	4	3	2	8	7	6	5	4	3	9	8	7	6	5	4	131	
7	10	0	5	0	2	1	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	7	3	4	5	6	7	8	114	
8	5	0	5	2	0	2	10	1	1	2	3	4	2	1	2	3	4	5	3	2	3	4	5	6	4	3	4	5	6	7	103
9	0	2	5	2	0	2	10	1	1	2	3	3	2	1	2	3	4	4	4	3	2	3	4	5	5	4	3	4	5	6	91
10	5	2	1	0	0	1	5	3	10	1	2	4	3	2	1	2	3	5	4	3	2	3	4	6	5	4	3	4	5	93	
11	2	1	4	6	0	4	10	5	2	5	1	5	4	3	2	1	2	6	5	4	3	2	3	7	6	5	4	3	4	109	
12	5	0	1	0	2	10	10	0	1	5	0	6	5	4	3	2	1	7	6	5	4	3	2	8	7	6	5	4	3	115	
13	0	5	0	2	0	10	6	0	5	6	0	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	2	3	4	5	6	7	102	
14	0	0	4	5	0	2	0	0	2	0	1	5	2	1	2	3	4	2	1	2	3	4	5	3	2	3	4	5	6	71	
15	2	0	0	2	0	5	0	2	0	1	2	2	0	2	1	2	3	3	2	1	2	3	4	4	3	2	3	4	5	60	
16	0	0	4	5	0	5	10	4	3	5	1	0	4	1	4	1	2	4	3	2	1	2	3	5	4	3	2	3	4	85	
17	5	0	0	1	2	0	2	5	0	5	0	0	2	0	5	0	1	5	4	3	2	1	2	6	5	4	3	2	3	68	
18	6	2	6	1	1	5	1	2	2	0	2	0	2	5	1	3	2	6	5	4	3	2	1	7	6	5	4	3	2	89	
19	3	0	3	1	0	0	10	10	0	5	0	0	1	3	0	0	2	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	6	79	
20	0	1	2	1	0	0	1	6	0	2	0	2	0	10	1	2	0	1	0	1	2	3	4	2	1	2	3	4	5	56	
21	1	6	5	2	2	0	5	0	4	3	0	0	6	0	0	2	0	2	5	5	1	2	3	3	2	1	2	3	4	69	
22	10	1	5	2	0	10	5	5	0	5	6	4	2	0	5	0	0	10	5	2	4	1	2	4	3	2	1	2	3	99	
23	0	0	2	4	5	0	2	5	5	0	6	5	1	4	0	2	6	10	1	1	0	5	1	5	4	3	2	1	2	82	
24	10	1	1	0	1	0	3	2	2	5	0	10	5	2	2	0	5	4	0	3	1	0	0	6	5	4	3	2	1	78	
25	2	2	0	2	0	0	5	5	0	2	4	1	5	0	0	5	3	0	5	1	0	4	4	5	1	2	3	4	5	70	
26	1	2	0	0	2	4	0	0	5	10	5	0	0	0	0	0	5	0	2	5	0	4	4	5	1	1	2	3	4	65	
27	1	5	3	2	1	0	2	5	2	10	3	0	0	4	5	5	0	5	1	6	0	5	1	0	0	0	1	2	3	72	
28	1	1	1	2	0	10	0	5	2	1	2	0	1	2	1	2	0	0	2	5	5	0	0	1	10	0	0	1	2	57	
29	0	10	0	5	2	1	1	0	5	5	2	0	5	5	1	5	5	0	10	5	0	2	2	0	1	0	0	2	1	75	
30	1	5	2	5	1	1	3	2	2	2	10	1	5	5	0	10	1	0	10	3	0	5	2	0	0	0	10	2	2	90	

Tableau 2: Fréquences de déplacement de l'exemple de Nugent et al. (1968)

Département	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	30	Total	
1	4	4	3	4	7	11	7	3	9	7	11	2	3	6	5	11	13	6	4	6	16	7	18	6	6	7	8	8	10	212		
2		5	2	13	8	2	1	4	5	5	5	8	2	3	4	5	8	4	4	10	6	6	8	7	6	10	7	17	13	178		
3		4	6	3	8	7	6	3	7	5	4	7	2	7	4	11	8	6	8	9	7	7	6	5	7	6	6	9		168		
4			1	2	4	5	4	1	8	3	7	9	5	7	4	5	7	6	6	5	8	5	9	6	7	6	10	11		151		
5				6	7	4	3	2	1	4	6	5	4	3	4	4	7	6	7	4	8	5	8	9	7	5	6	6		131		
6					7	7	6	4	6	11	17	8	10	9	3	7	8	7	6	15	4	3	9	12	7	16	6	5		193		
7						11	12	8	14	15	7	2	3	14	7	7	12	4	9	10	8	10	8	4	7	6	8	11		197		
8							2	5	8	4	2	1	4	7	9	7	13	8	3	9	10	8	9	3	9	10	6	9			146	
9								11	4	4	8	4	1	5	3	6	4	3	6	3	9	7	5	9	5	6	10	8			121	
10									6	7	10	3	3	6	7	3	10	6	6	7	3	9	8	15	14	4	9	7			143	
11										1	5	5	5	3	1	4	6	5	4	9	8	3	11	11	8	6	5	14				114
12											11	10	6	3	2	1	7	8	5	8	8	12	9	7	6	5	4	4			116	
13												3	2	7	6	7	2	2	9	6	6	11	7	3	4	6	11	12			104	
14													3	3	3	9	5	11	2	3	8	7	3	2	7	6	10	11			93	
15														5	7	4	3	3	1	7	3	6	4	3	7	4	5	5			67	
16															1	5	4	5	4	1	4	3	10	4	8	4	8	14			75	
17																3	7	4	3	2	7	7	9	10	4	3	7	4			70	
18																	11	6	6	13	12	5	7	6	10	4	3	2			85	
19																		1	7	8	5	5	6	4	4	6	15	16			77	
20																		6	4	4	7	3	6	8	8	9	8				63	
21																			5	2	4	3	2	1	7	3	4				31	
22																			6	2	8	7	7	1	4	8					43	
23																				1	9	8	4	2	3	4					31	
24																				11	10	4	4	2	1					32		
25																					2	2	13	5	5					27		
26																						1	2	3	4					10		
27																							1	2	13					16		
28																								3	4					7		
29																									3					3		
30																																
Total																															2704	

Tableau 3: Fréquences cumulées de l'exemple de Nugent et al. (1968)

4.3 Vérification de la performance de cette méthode

Pour vérifier la performance de cette méthode de conception d'implantation générale à épine dorsale, nous avons voulu la confronter à l'approche d'aménagement arbre de Montreuil et Ratliff (1989) qu'ils adaptent à l'utilisation du concept épine dorsale. Il apparaît au tableau 3 les données de l'exemple de Montreuil et Ratliff (1989) et à la figure 4 leur solution pour une implantation à épine dorsale.

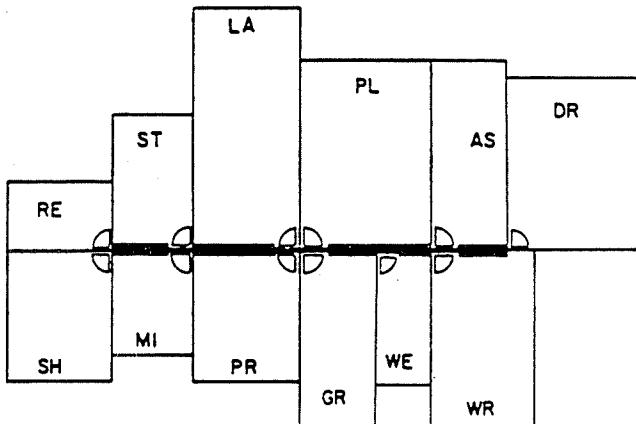


Figure 4: Implantation proposée par Montreuil et Ratliff (1989)

L'implantation proposée fournit le couplage et l'ordonnancement des départements suivants:

RE	ST	LA	PL	AS	DR
SH	MI	PR	GR	WE	WR

Figure 5: Couplage et ordonnancement équivalents

Appliquons l'heuristique à ce même exemple et nous pourrons comparer les deux solutions. Pour voir le détail de l'application de l'heuristique consulter l'annexe 3. Un ordonnancement des 12 départements est créé en 8 itérations qui ont utilisé 16 des 25 fréquences.

La solution de l'heuristique apparaît à la figure 6.

DR	AS	GR	PL	MI	RE
WE	WR	SH	LA	PR	ST

Figure 6: Solution proposée pour l'exemple de Montreuil et Ratliff (1989)

Pour comparer les deux solutions, nous convenons des distances suivantes:

- départements face à face = 1
- départements côte à côte = 3
- départements en diagonale = 3
- départements d'un même côté séparés par un département = 5
- départements en diagonale séparés par un département = 5
- etc...

Pour la solution proposée par la démarche d'aménagement en arbre, les distances totales parcourues s'élèvent à 2 070, quant à la solution élaborée à l'aide de l'heuristique présentée ici, les distances totales parcourues se chiffrent à 1 750. La solution de l'heuristique est de 18% supérieure.

Département	Code	Circulation entre											
		RE	MI	PR	LA	DR	WE	PL	GR	AS	WR	SH	ST
Réception	RE	-	30										30
Fraisage	MI		-	40	10			10					
Formage	PR			-	35	5							20
Tournage	LA				-	20	20	45					30
Perçage	DR					-		5	20	10			
Soudage	WE						-	5	20	15	10		
Plaçage	PL							-	45	10	20		
Rectification	GR								-	25		60	
Assemblage	AS									-	50		
Entreposage	WR										-		
Expédition	SH										-		
Magasins	ST												-

Tableau 4: Fréquences de déplacement de l'exemple de Montreuil et Ratliff (1989)

5. Couplage et ordonnancement des départements à une porte d'entrée et une porte de sortie

5.1 Méthode

L'heuristique pour le couplage et l'ordonnancement des départements comportant chacun au maximum une porte d'entrée et une porte de sortie s'inspire de l'heuristique précédent. L'hypothèse de base est la même:

- les distances interdépartementales sont plus courtes pour les départements face-à-face.

Ainsi les distances porte à porte sont plus courtes pour les portes vis-à-vis. Ces constatations sont toujours vraies pour des départements aux superficies égales et de forme relativement identiques. Elles sont vraies aussi pour les départements de même largeur sur l'épine dorsale. Dans cette étape de la méthode de design, on néglige les superficies et les dimensions réelles des départements.

L'heuristique consiste en premier à ordonner par ordre décroissant les fréquences de déplacement. Pour chaque valeur de ces fréquences, les nouveaux départements sont identifiés et placés de chaque côté de l'épine dorsale de façon à minimiser les distances parcourues pour cette valeur de fréquence comme dans l'heuristique à porte unique.

Les départements une fois placés, il s'agit de localiser à

l'intérieur de chacun d'eux les nouvelles portes d'entrée ou de sortie à fixer. À chacune des valeurs de fréquences, des portes peuvent être localisées de façon définitive ou non.

Cette analyse, en deux temps, est répétée jusqu'à ce que tous les départements soient placés et que toutes les portes utilisées soient localisées. Les valeurs de fréquences non utilisées dans le processus d'ordonnancement et de couplage peuvent servir à départager des ordonnancements équivalents.

5.2 Expérimentation

5.2.1 Exemple de Tompkins et White (1984)

Cet exemple correspond à un atelier composé de 8 départements. Les fréquences de déplacement sont fournies dans le tableau 5.

Départements								
	A	B	C	D	E	F	G	H
A		30	20			3		
B				3	2	5	10	
C				15	1	10	4	
D	5						25	
E	7	1					20	
F	1	3	5				15	
G								30
H								

Tableau 5: Fréquences de déplacement

Il a fallu 11 itérations pour proposer une solution. Toutes les 21 fréquences ont été utilisées. Treize (13) portes sur 15 sont fixées, seules la porte de sortie de G et la porte d'entrée de H sont non fixées mais liées.

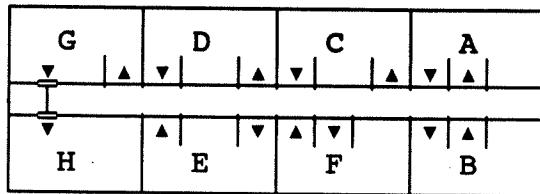


Figure 7: Solution proposée pour l'exemple de Tompkins et White (1984)

5.2.2 Exemple de Nugent et al. (1968)

Cet exemple de 30 départements et de 60 portes est difficile à résoudre car les 870 fréquences sont très peu étendues, les valeurs varient de 10 à 1 (voir Tableau 2). De plus, lors de l'ordonnancement par ordre décroissant des fréquences, dès la fréquence 5 tous les départements et toutes les portes sont apparus.

À la première itération, 29 paires de départements sont à satisfaire dont 25 différents départements. L'élaboration d'un ordonnancement a demandé une approche heuristique basée sur les fréquences d'apparition, toutes les solutions ne pouvant être évaluées. Les départements ont été placés en premier. Quatre (4) ordonnancements ont été retenus pour le placement des portes.

L'évaluation des distances parcourues a permis de limiter la poursuite de l'étude à 2 ordonnancements.

La deuxième itération est beaucoup plus facile à réaliser, aucun nouveau département n'est apparu, seules trois nouvelles portes sont à placer mais sans différencier les 2 ordonnancements.

À la troisième itération, il n'y a pas de nouveaux départements, seulement 4 nouvelles portes. Les 2 ordonnancements ne peuvent toujours pas être départagés.

À l'itération 4, parmi les paires de portes à considérer, on note l'apparition de 2 nouveaux départements et de 7 nouvelles portes. Il a été possible de générer 4 ordonnancements.

L'itération 5 permet d'introduire 2 départements et de localiser 8 autres portes. La dernière itération place le département restant. La solution proposée apparaît à la figure 8.

21	3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	4	14
15	5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28	17	20

Figure 8: Solution proposée pour l'exemple de Nugent et al. (1968)

5.2.3 Exemple de Montreuil (1991)

L'exemple de Montreuil comporte 39 départements mais le tableau de fréquences lie entre-eux que 26 départements, 24 portes d'entrée et 25 portes de sortie.

Le problème a été assez facile à résoudre en 40 itérations, les fréquences étant très étalées (voir le Tableau 6). Le maximum de paires de portes à traiter simultanément est de 10 mais seulement à l'itération 39 où un seul département est à intégrer ainsi que 5 portes. Le détail des itérations est fourni à l'annexe 6. La solution proposée est présentée ci-dessous à la figure 9.

Tableau 6: Fréquences de déplacement de l'exemple de Montreuil (1991)

t		g	o		A	r	c		t	v	j	d	b		E																				
H	A	B	A	V	D	V	A	I	A	V	V	A	s	V	A	W	V	A	e	V	A	p	V	A	x	V	A	V	u	A	V	F	A	V	a

Figure 9: Solution proposée pour l'exemple de Montreuil (1991)

6. Conclusion

L'objectif de ce rapport technique était de présenter la méthode de design d'une implantation à épine dorsale et d'expliciter la première étape, c'est-à-dire le couplage et de l'ordonnancement des départements. Deux variantes ont été présentées: une pour les départements à une porte centrale et une pour les départements à deux portes localisables sur toute la largeur de ceux-ci sur le couloir (l'épine). Les tests effectués démontrent que l'approche heuristique est intéressante parce qu'elle peut s'appliquer à des problèmes de grande taille et qu'en tout temps, le concepteur peut intervenir dans le processus de design.

7. Bibliographie

Houshyar, A. et L.F. McGinnis, 1990, "A heuristic for assigning facilities to locations to minimize WIP travel distance in a linear facility," International Journal of Production Research, Vol. 28, No. 8, p.1485-1498.

Montreuil, B. et H.D. Ratliff, 1989, "Utilizing Cut Trees as Design Skeletons for Facility Layout", IIE Transactions, June, p.136-143.

Montreuil, B., 1991, "A modeling framework for integrating layout design and flow network design", Progress in Material Handling and Logistics, John A. White et Ira. W. Pence (editors), vol. 2, Springer-Verlag, p. 96-115.

Nugent, C.E., Vollmann T.E., Ruml, J., 1968, "An experimental comparison fo techniques for the assignment of facilities to locations", Operations Research, vol. 16, no. 1, p. 150-173.

Riopel, D. et A. Langevin, 1990, "Évaluation d'implantations générales par l'optimisation de la localisation des postes d'entrées/ sorties sur des allées", Rapport du GERAD, 20p.

Riopel, D. et A. Langevin, 1991, "Optimizing the location of material transfer stations within layout analysis", International Journal of Production Economics, à paraître.

Tompkins, J.A., 1980, "Modularity and Flexibility: Dealing With Future Shock In Facilities Design," Industrial Engineering, September, p.78-81.

Tompkins, J.A. et J.D. Spain, 1983, "Utilization of Spine Concept Maximizes Modularity in Facilities Planning," Industrial Engineering, March, p.34-42.

Tompkins, J.A. et J.A. White, 1984, Facilities Planning, John Wiley & Sons, New York.

Tompkins, J.A., 1989, Winning manufacturing. The How-to book of successful manufacturing, Ind.Eng. & Management Press.

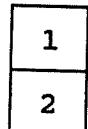
Annexe 1: Heuristique à une porte appliquée à l'exemple générée

Itération 1

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
200	1	1 - 2	aucun

Analyse: La paire 1-2 est retenue.

Ordonnancement:

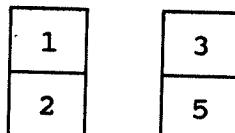


Itération 2

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
100	1	3 - 5	aucun

Analyse: La paire 3-5 est retenue, disjointe de l'ordonnancement en 1.

Ordonnancement:

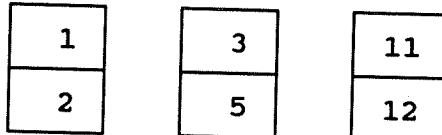


Itération 3

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
95	1	11 - 12	aucun

Analyse: La paire 11-12 est retenue, disjointe de l'ordonnancement en 2.

Ordonnancement:



Itération 4

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
50	3	2 - 5 2 - 12 5 - 11	les deux les deux les deux

Analyse: Deux ordonnancements sont possibles et les distances parcourues sont identiques. Les deux ordonnancements sont retenus.

Ordonnancements:

1	3	11
2	5	12

et

3	1	11
5	2	12

Itération 5

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
30	1	4 - 5	5

Analyse: Il y a 4 possibilités de placement du département 4, un seul ordonnancement minimise les distances parcourues.

Ordonnancement:

4	3	1	11
	5	2	12

Itération 6

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
25	2	5 - 12 7 - 11	les deux 11

Analyse: Un seul ordonnancement minimise les distances parcourues.

Ordonnancement:

4	3	1	11	7
	5	2	12	

Itération 7

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
20	2	1 - 9 5 - 8	1 5

Analyse: Pour minimiser les distances parcourues, il y a un seul ordonnancement possible.

Ordonnancement:

4	3	1	11	7
8	5	2	12	9

Itération 8

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
15	5	2 - 4 2 - 7 3 - 7 3 - 12 6 - 12	les deux les deux les deux les deux 12

Analyse: Le département 6 à côté de la paire 7-9 permet de minimiser les distances parcourues.

Ordonnancement:

4	3	1	11	7	6
8	5	2	12	9	

Itération 9

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
10	12	1 - 6 2 - 6 4 - 6 4 - 7 5 - 6 5 - 9 5 - 10 5 - 14 6 - 9 7 - 12 7 - 14 8 - 11	les deux les deux les deux les deux les deux les deux les deux 5 5 les deux les deux 7 les deux

Analyse: Le département 10 doit être placé le plus près de 5 et le département 14 minimise les distances parcourues s'il est placé face à 6 que face à 10.

Ordonnancement:

10	4	3	1	11	7	6
	8	5	2	12	9	14

Itération 10

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
5	11	1 - 14 2 - 9 2 - 14 3 - 14 4 - 9 4 - 14 6 - 14 8 - 14 9 - 11 10 - 11 12 - 14	les deux les deux

Analyse: Aucun nouveau département n'est à placer.

Ordonnancement: Identique à celui de l'itération 9.

Itération 11

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
2	4	5 - 13 7 - 13 8 - 13 10 - 13	5 7 8 10

Analyse: Le dernier département à placer (le 13) minimise les distances parcourues s'il est face à 10.

Ordonnancement:

10	4	3	1	11	7	6
13	8	5	2	12	9	14

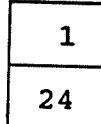
Annexe 2: Heuristique à une porte appliquée à l'exemple de Nugent et al. (1968)

Itération 1

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
18	1	1 - 24	aucun

Analyse: La paire 1-24 est retenue.

Ordonnancement:

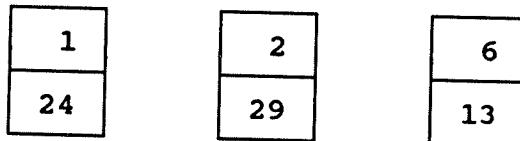


Itération 2

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
17	2	2 - 29 6 - 13	aucun aucun

Analyse: Les paires 2-29 et 6-13 sont retenues, disjointes entre elles et de l'ordonnancement en 1.

Ordonnancement:

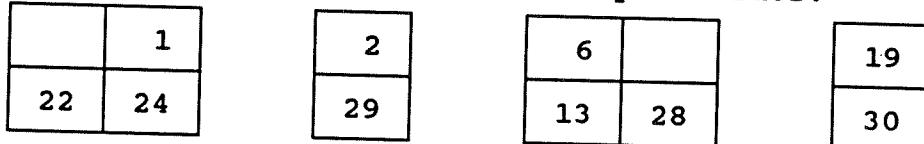


Itération 3

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
16	3	1 - 22 6 - 28 19 - 30	1 6 aucun

Analyse: La paire 19-30 est retenue et disjointe. Un seul ordonnancement minimise les distances parcourues.

Ordonnancement:



Itération 4

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
15	4	6 - 22 7 - 12 10 - 26 19 - 29	les 2 aucun aucun les 2

Analyse: Les paires 7-12 et 10-26 sont retenues et disjointes. Pour les autres départements, deux ordonnancements sont possibles et les distances parcourues sont identiques. Les deux ordonnancements sont retenus.

Ordonnancements:

10	7	2 19	1 28 6
26	12	29 30	24 22 13

et	10	7	2 19	1 6
	26	12	29 30	24 22 13 28

Itération 5

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
14	5	7 - 11 7 - 16 10 - 27 11 - 30 16 - 30	7 7 10 30 30

Analyse: Un seul ordonnancement possible pour l'addition des trois nouveaux départements 11, 16 et 27. Mais les deux ordonnancements en 4 ne peuvent pas être départagés. Finalement, il reste deux ordonnancements.

Ordonnancements:

2 19 11 7	10 27	1 28 6
29 30 16 12	26	24 22 13

et	2 19 11 7	10 27	1 6
	29 30 16 12	26	24 22 13 28

Itération 6

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
13	7	1 - 18 2 - 5 2 - 30 8 - 19 18 - 22 25 - 28 27 - 30	1 2 les 2 19 22 28 les 2

Analyse: Un seul ordonnancement minimise les distances parcourues.
 Ordonnancement:

1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8
24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	

Itération 7

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
12	6	6 - 26 7 - 9 7 - 19 12 - 24 13 - 30 18 - 23	les 2 7 les 2 les 2 les 2 18

Analyse: Un seul ordonnancement minimise les distances parcourues en regroupant les deux blocs jusqu'alors disjoints.
 Ordonnancement:

23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8
	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9

Itération 8

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
11	18	1 - 7 1 - 12 1 - 17 3 - 18 4 - 30 6 - 12 7 - 8 7 - 30 9 - 10 11 - 25 11 - 26 12 - 13 13 - 24 13 - 29 14 - 20 14 - 30 18 - 19 24 - 25	les 2 les 2 1 18 30 les 2 les 2 les 2 les 2 les 2 les 2 les 2 les 2 les 2 les 2 14 les 2 les 2 les 2

Analyse: Il y a deux possibilités de placement des départements 3 et 17. Il y a aussi trois possibilités de placement des départements 4, 14 et 20. Donc, nous avons six ordonnancements où les distances parcourues sont identiques.

Ordonnancements:

	23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8	4	
3	17	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9	14	20

	23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8	4	14
3	17	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9		20

	23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8	14	4
3	17	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9	20	

	23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8	4	
17	3	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9	14	20

	23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8	4	14
17	3	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9		20

	23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8	14	4
17	3	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9	20	

Itération 9

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
10	18	1 - 30 2 - 21 2 - 27 4 - 29 6 - 15 7 - 22 7 - 24 8 - 23 8 - 28 9 - 29 10 - 13 10 - 19 12 - 14 14 - 29 16 - 25 17 - 26 18 - 27 24 - 26	les 2 2 les 2 les 2 6 les 2 les 2

Analyse: Le couple 17-26 nous permet d'éliminer les trois premiers ordonnancements en 8. Un seul ordonnancement répond aux nouvelles conditions et permet de minimiser les distances parcourues.

Ordonnancement:

15	23	1	22	6	28	10	5	2	19	11	7	8	4	21
3	17	24	18	13	25	26	27	29	30	16	12	9	14	20

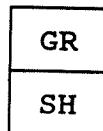
Annexe 3: Heuristique à une porte appliquée à l'exemple de Montreuil et Ratliff (1989).

Itération 1

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
60	1	GR-SH	aucun

Analyse: La paire GR-SH est retenue

Ordonnancement:

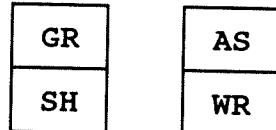


Itération 2

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
50	1	AS-WR	aucun

Analyse: La paire AS-WR est retenue, disjointe de l'ordonnancement en 1

Ordonnancement:

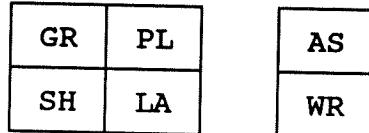


Itération 3

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
45	2	LA - PL PL - GR	aucun

Analyse: Le département PL devra être placé à côté de la paire GR-SH et le département LA constitue une paire avec PL.

Ordonnancement:

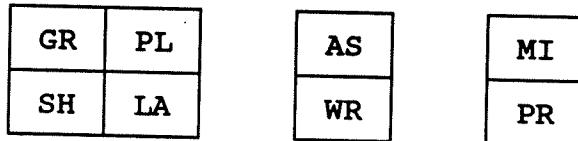


Itération 4

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
40	1	MI - PR	aucun

Analyse: Cette nouvelle paire est disjointe des ordonnancements précédents.

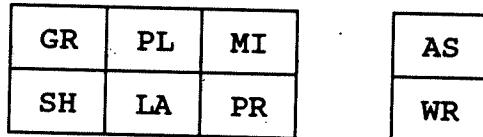
Ordonnancement:

**Itération 5**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
35	1	PR - LA	les deux

Analyse: Cette fréquence permet de lier la paire disjointe MI-PR au bloc de 4 départements.

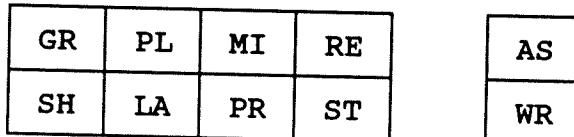
Ordonnancement:

**Itération 6**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
30	3	RE - MI RE - ST LA - ST	MI aucun LA

Analyse: Ces 3 paires apportent 2 nouveaux départements. RE doit être placé à côté de MI et RE-ST forment une paire.

Ordonnancement:



Itération 7

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
25	1	GR - AS	les deux

Analyse: Aucun nouveau département n'est à placer mais cette paire permet de lier la paire AS-WR au bloc principal de l'implantation.

Ordonnancement:

AS	GR	PL	MI	RE
WR	SH	LA	PR	ST

Itération 8

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires	Départements déjà retenus
20	6	PR - ST LA - DR LA - WE DR - GR WE - GR PL - WR	les deux LA LA GR GR les deux

Analyse: Pour minimiser les distances on doit placer DR à côté de AS et WE forme la paire. Tous les départements se trouvent ainsi placés.

Ordonnancement:

DR	AS	GR	PL	MI	RE
WE	WR	SH	LA	PR	ST

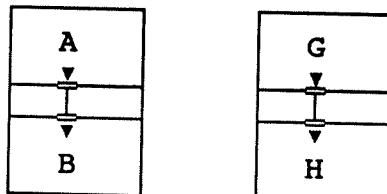
Annexe 4: Heuristique à deux portes appliquée à un exemple de Tompkins et White (1984)

Itération 1

	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
30	2	A(s) G(s)	B(e) H(e)	aucun aucun	aucune aucune

Analyse: Les paires A-B et G-H sont retenues et indépendantes. Les quatre portes ne peuvent pas être fixées.

Ordonnancement:

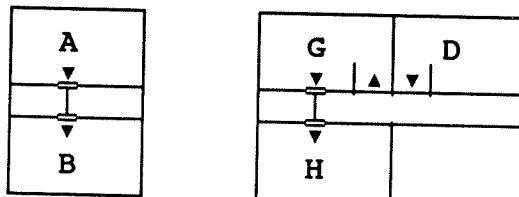


Itération 2

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
25	1	D(s)	G(e)	G	aucune

Analyse: Le département D apparaît, couplé à G. Il sera donc accolé à la paire G-H. Les portes D(s) et G(e) pourront être fixées.

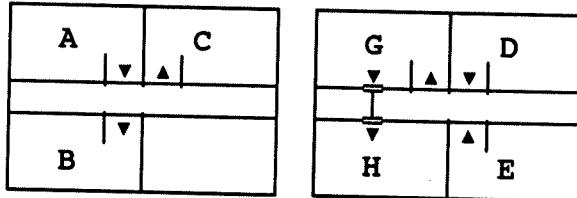
Ordonnancement:



Itération 3

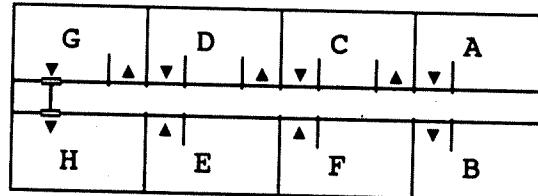
Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
20	2	A(s) E(s)	C(e) G(e)	A G	A(s) G(e)

Analyse: Du point de vue des départements, il y a deux possibilités de placer E. Mais comme la porte G(e) est déjà fixée un seul ordonnancement minimise les distances: E placé sous D. L'apparition du département C va permettre de fixer les portes A(s) et B(e).

Ordonnancement:**Itération 4**

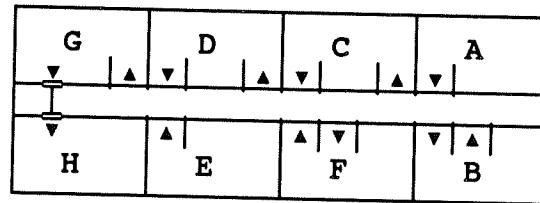
Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
15	2	C(s) F(s)	D(e) G(e)	les deux G	aucune G(e)

Analyse: Plusieurs ordonnancements du point de vue des départements sont possibles. Mais comme il y a huit départements il faut quatre départements de part et d'autre du couloir. De plus les portes ont une influence sur le choix de l'ordonnancement. En tenant compte de tous ces paramètres un seul ordonnancement minimise les distances parcourues.

Ordonnancement:**Itération 5**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
10	2	C(s) B(s)	F(e) G(e)	les deux les deux	C(s) G(e)

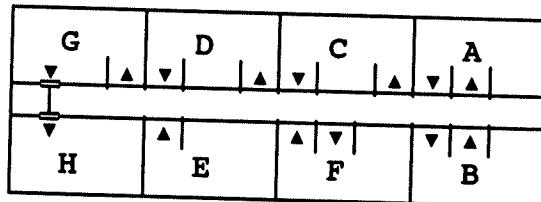
Analyse: Seules les portes F(e) et B(s) sont à placer.
Ordonnancement:

**Itération 6**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
7	1	E(s)	A(e)	les deux	E(s)

Analyse: Seule la porte A(e) est à placer. Une seule position minimise les distances.

Ordonnancement:



Itération 7

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
5	3	B(s) C(s) F(s)	F(e) D(e) C(e)	les deux les deux les deux	les deux les deux les deux

Analyse: Aucune nouvelle porte.

Ordonnancement: Identique à l'ordonnancement en 6.

Itération 8

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
4	1	C(s)	G(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucune nouvelle porte.

Ordonnancement: Identique à l'ordonnancement en 6.

Itération 9

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
3	3	A(s) B(s) F(s)	F(e) D(e) B(e)	les deux les deux les deux	les deux les deux les deux

Analyse: Aucune nouvelle porte.

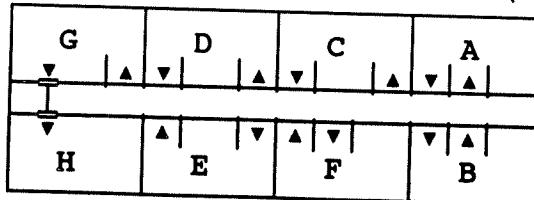
Ordonnancement: Identique à l'ordonnancement en 6.

Itération 10

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
2	1	B(s)	E(e)	les deux	B(s)

Analyse: La porte E(e) apparaît couplée à B(s).

Ordonnancement:



Itération 11

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
1	3	C(s) E(s) F(s)	E(e) B(e) A(e)	les deux les deux les deux	les deux les deux les deux les deux

Analyse: Aucune nouvelle porte. De plus Les portes G(s) et H(e) n'apparaissent pas, elles ne peuvent donc toujours pas être fixées.

Ordonnancement: Identique à l'ordonnancement en 10.

Annexe 5: Heuristique à deux portes appliquée à l'exemple de Nugent et al. (1968)

Itération 1

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
10	29	5(s)	2(e)	aucun	aucune
		7(s)	1(e)	aucun	aucune
		8(s)	7(e)	aucun	aucune
		9(s)	7(e)	aucun	aucune
		10(s)	9(e)	aucun	aucune
		11(s)	7(e)	aucun	aucune
		12(s)	6(e)	aucun	aucune
		12(s)	7(e)	aucun	aucune
		13(s)	6(e)	aucun	aucune
		16(s)	7(e)	aucun	aucune
		19(s)	7(e)	aucun	aucune
		19(s)	8(e)	aucun	aucune
		20(s)	14(e)	aucun	aucune
		22(s)	1(e)	aucun	aucune
		22(s)	6(e)	aucun	aucune
		22(s)	18(e)	aucun	aucune
		23(s)	18(e)	aucun	aucune
		24(s)	1(e)	aucun	aucune
		24(s)	12(e)	aucun	aucune
		26(s)	10(e)	aucun	aucune
		27(s)	10(e)	aucun	aucune
		28(s)	6(e)	aucun	aucune
		28(s)	25(e)	aucun	aucune
		29(s)	2(e)	aucun	aucune
		29(s)	19(e)	aucun	aucune
		30(s)	11(e)	aucun	aucune
		30(s)	16(e)	aucun	aucune
		30(s)	19(e)	aucun	aucune
		30(s)	27(e)	aucun	aucune

Analyse: Dans cette première itération 29 paires de départements apparaissent, dont 25 départements différents. Avant de se préoccuper des portes, nous allons utiliser la méthode de design 1 pour placer les départements.

On constate qu'une seule paire est disjointe: 14-20.

Le département qui a le plus de relations est le département 7 qui apparaît sept fois.

Parmi les sept départements qui sont en relation avec 7 une paire est liée: 8-19..

Aux extrémités de ce bloc de huit départements on va placer ceux qui ont le plus de relations avec l'extérieur. On a alors quatre ordonnancements possibles.

19	7	9	1
8	11	16	12

(1)

19	11	7	1
8	16	9	12

(2)

19	9	7	1
8	16	11	12

(3)

19	16	9	1
8	7	11	12

(4)

Les départements 6, 19, 30 apparaissent quatre fois. Parmi ces trois départements on va se préoccuper de 19 car il n'y a plus que deux relations à prendre en compte: 19-29 et 30-19. À la gauche des quatre ordonnancements on va placer la paire

29
30

Les départements 1 et 12 ne sont en relation qu'avec 24. Le département 24 va se mettre à leur droite, à côté de 1.

Pour le moment on néglige le département 6 qui n'a qu'un lien avec le noyau central.

Le département 27 est le seul à avoir une relation avec 30, on va donc le placer. 27 est en relation avec 10. Donc 10 va se placer. De plus, il y a aussi la relation 10-9.

En étudiant les couples 30-11 30-16 10-9 27-30 10-27 on constate qu'il ne nous reste que deux configurations possibles.

10	29	19	11	7	1	24
27	30	8	16	9	12	

(1)

10	29	19	9	7	1	24
27	30	8	16	11	12	

(2)

Pour conclure avec 10, on va placer le département 26 à gauche. Il reste toujours les deux configurations. Sous 26, on place le département 2 car il y a la relation 29-2. À gauche de 2, on place 5 car il y a la relation 5-2. On a alors les deux ordonnancements suivants.

	26	10	29	19	11	7	1	24
5	2	27	30	8	16	9	12	

(1)

	26	10	29	19	9	7	1	24
5	2	27	30	8	16	11	12	

(2)

Le département 22 a une relation avec 1. Le département 6 a plus de relations avec l'extérieur, il doit donc être plus central. On a alors deux configurations possibles:

1	24	13	18	25
12	22	6	23	28

(1')

1	24	13	25	23
12	22	6	28	18

(2')

Au total, on a quatre ordonnancements sur lesquels on va placer les portes.

	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25
5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28

| 14 |
| 20 |

(1)

	26	10	29	19	11	7	1	24	13	25	23
5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	28	18

| 14 |
| 20 |

(2)

	26	10	29	19	9	7	1	24	13	18	25
5	2	27	30	8	16	11	12	22	6	23	28

| 14 |
| 20 |

(3)

	26	10	29	19	9	7	1	24	13	25	23
5	2	27	30	8	16	11	12	22	6	28	18

| 14 |
| 20 |

(4)

Raisonnement pour la mise en place des portes: application sur le premier ordonnancement

On place les portes qui se trouvent face à face sans les fixer. Il s'agit des portes:

- 9(s)-7(e)
- 13(s)-6(e)
- 19(s)-8(e)
- 20(s)-14(e)
- 23(s)-18(e)
- 27(s)-10(e)
- 28(s)-25(e)

On place les portes des départements qui n'apparaissent qu'une fois.

- 5(s) sera à droite, 2(e) avec qui elle est couplée ne peut pas être fixée car elle est aussi couplée à 29(s) et le département 29 est à droite du département 2.

- 26(s) sera à droite, 10(e) va pouvoir se fixer car cette porte n'est liée qu'à 26(s) et 27(s).

On place les portes qui n'apparaissent qu'une fois.

- 7(s) devrait être à droite mais comme 7(e) n'est pas encore fixée il faut attendre.

- 8(s) devrait être à droite mais comme 8(e) n'est pas encore fixée il faut attendre.

- même chose pour 10(s), 9(e).

- 11(s) sera à droite

- 16(s) sera à droite

- 12(e) sera à droite

- 11(e) sera à gauche

- 27(e) sera à droite

- 16(e) sera à gauche

On se préoccupe maintenant des portes restantes.

- 1(e) est en relation avec 7(s), 22(s), 24(s) deux de ces départements sont à droite de 1 et un à gauche. 1(e) sera donc à droite.

- 7(e) est en relation avec 8(s), 9(s), 11(s), 12(s), 16(s), 19(s). Il y a plus de départements à gauche du département 7, la porte sera donc à gauche. Maintenant on peut placer la porte 7(s) à droite. Il en découle 9(e) à gauche contre 9(s).

- 6(e) est en relation avec 12(s), 13(s), 22(s), 28(s). Il y a plus de départements à gauche du département 6, la porte sera donc à gauche.

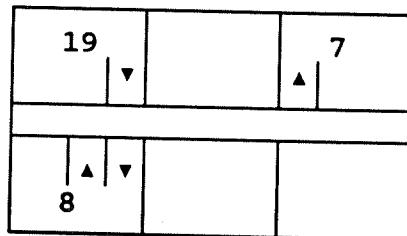
- 12(s) ne peut pas être fixée car elle est en relation avec 7(e) à sa gauche et 6(e) à sa droite.

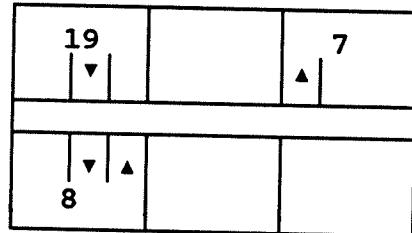
- 19(s): deux configurations sont strictement équivalentes pour les relations

8(s)-7(e)

19(s)-7(e)

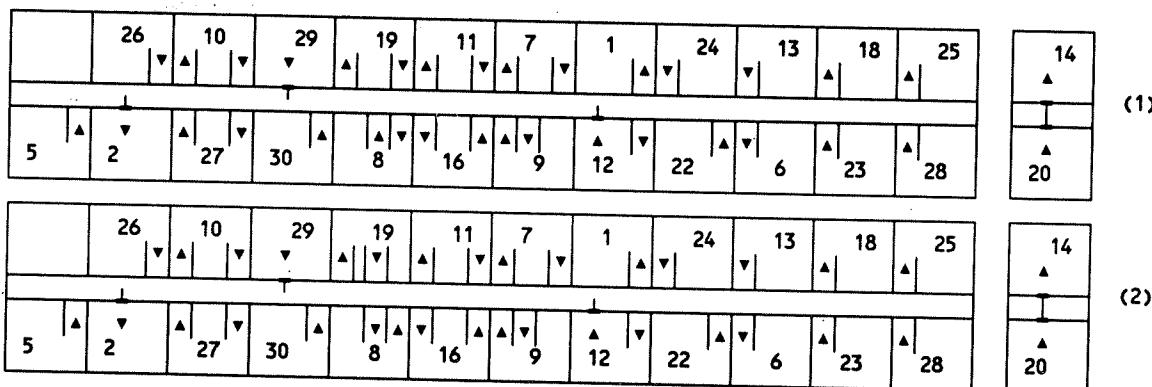
19(s)-8(e)



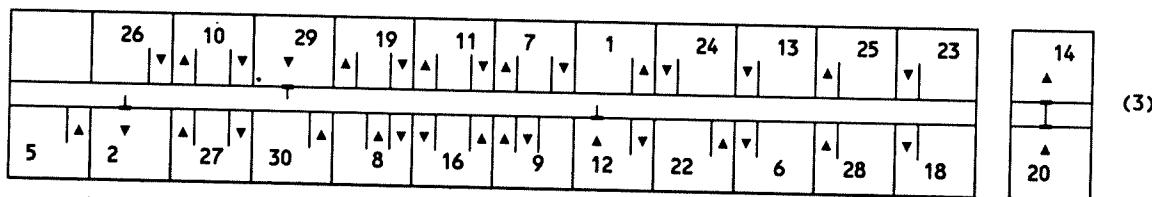


- 22(s) est en relation avec 1(e), 6(e), 18(e). Deux départements sont à droite et un à gauche, la porte sera donc à droite. On peut ensuite placer 18(e) à gauche.
 - 24(s) est en relation avec 1(e) et 12(e) qui sont toutes les deux à gauche de 24. La porte 24(s) sera donc à gauche.
 - 28 a le département 6 à sa gauche et le département 25 en face. La porte 28(s) sera donc à gauche.
 - 29(s) ne peut pas être fixée, sa position dépend de 2(e) et de 19(e).
 - 19(e) est en relation avec 29(s) et 30(s) qui se trouvent toutes les deux à gauche de 19. Donc 19(e) sera à gauche.
 - 30(s) est en relation avec 11(e), 16(e), 19(e), 27(e). Trois de ces quatre départements sont à droite de 30, la porte 30(s) sera à droite.

Finalelement on a les deux ordonnancements suivants pour la première configuration des départements.



En suivant ce même raisonnement pour les trois autres ordonnancements des départements on trouve les six ordonnancements suivants pour les portes.



	26	10	29	19	11	7	1	24	13	25	23		(4)
	5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	28	18	
	26	10	29	19	9	7	1	24	13	18	25		(5)
	5	2	27	30	8	16	11	12	22	6	23	28	
	26	10	29	19	9	7	1	24	13	18	25		(6)
	5	2	27	30	8	16	11	12	22	6	23	28	
	26	10	29	19	9	7	1	24	13	25	23		(7)
	5	2	27	30	8	16	11	12	22	6	28	18	
	26	10	29	19	9	7	1	24	13	25	23		(8)
	5	2	27	30	8	16	11	12	22	6	28	18	

En considérant qu'un département a une longueur de 1, une porte a une largeur de 1/4 et le couloir une largeur de 1, on calcule les distances parcourues pour les vingt-neuf relations dans les huit ordonnancements. On s'aperçoit que seulement deux ordonnancements minimisent les distances totales parcourues.

Ordonnancements:

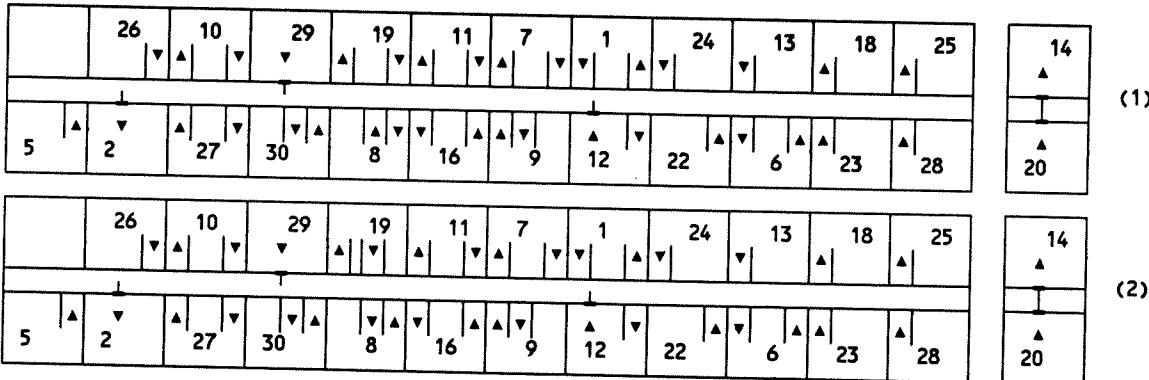
	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25		(1)
	5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28	
	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25		(2)
	5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28	

Itération 2

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
9	2	1(s) 6(s)	30(e) 25(e)	les deux les deux	aucune 25(e)

Analyse: Les trois nouvelles portes se placent sans différencier les deux ordonnancements.

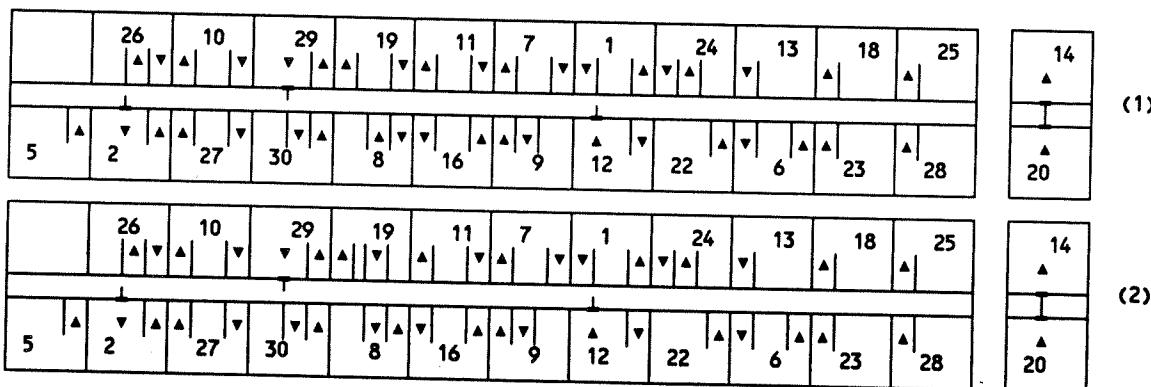
Ordonnancements:

**Itération 3**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
8	8	1(s) 1(s) 2(s) 5(s) 6(s) 6(s) 7(s) 12(s)	24(e) 29(e) 30(e) 25(e) 19(e) 26(e) 30(e) 25(e)	les deux les deux les deux les deux les deux les deux les deux les deux	1(s) 1(s) 30(e) les deux les deux 6(s) les deux les deux

Analyse: Il n'y a pas de nouveaux départements, seules de nouvelles portes apparaissent. Les deux ordonnancements ne peuvent toujours pas être départagés.

Ordonnancements:



Itération 4

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
7	20	1(s)	18(e)	les deux	les deux
		1(s)	23(e)	les deux	1(s)
		1(s)	28(e)	les deux	1(s)
		2(s)	24(e)	les deux	les deux
		2(s)	29(e)	les deux	les deux
		3(s)	30(e)	30	30(e)
		4(s)	25(e)	25	25(e)
		5(s)	19(e)	les deux	les deux
		5(s)	26(e)	les deux	les deux
		6(s)	13(e)	les deux	6(s)
		6(s)	20(e)	les deux	6(s)
		6(s)	27(e)	les deux	les deux
		7(s)	24(e)	les deux	les deux
		7(s)	29(e)	les deux	les deux
		7(s)	30(e)	les deux	les deux
		11(s)	25(e)	les deux	les deux
		12(s)	19(e)	les deux	les deux
		12(s)	26(e)	les deux	les deux
		13(s)	30(e)	les deux	les deux
		18(s)	25(e)	les deux	25(e)

Analyse: Les départements 3 et 4 apparaissent couplés respectivement à 30 et à 25. Le département 3 va se placer à gauche, au dessus de 5. Le département 4 ira à droite, mais plusieurs positions sont possibles car il faut aussi tenir compte de la paire 6(s)-20(e). Finalement on garde quatre ordonnancements.

Ordonnancements:

3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	4	14
5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28		20

(1)

3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	14	4
5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28		20

(2)

3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	4	14
5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28		20

(3)

(4)

Itération 5

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
6	51	1(s)	12(e)	les deux	les deux
		1(s)	17(e)	1	1(s)
		1(s)	22(e)	les deux	1(s)
		1(s)	27(e)	les deux	les deux
		2(s)	18(e)	les deux	les deux
		2(s)	23(e)	les deux	les deux
		2(s)	28(e)	les deux	les deux
		3(s)	24(e)	les deux	les deux
		3(s)	25(e)	les deux	les deux
		3(s)	29(e)	les deux	les deux
		4(s)	19(e)	les deux	les deux
		4(s)	26(e)	les deux	les deux
		4(s)	30(e)	les deux	les deux
		5(s)	13(e)	les deux	les deux
		5(s)	20(e)	les deux	les deux
		5(s)	27(e)	les deux	les deux
		6(s)	7(e)	les deux	les deux
		6(s)	14(e)	les deux	les deux
		6(s)	21(e)	6	6(s)
		6(s)	28(e)	les deux	les deux
		7(s)	18(e)	les deux	les deux
		7(s)	23(e)	les deux	les deux
		7(s)	28(e)	les deux	les deux
		8(s)	24(e)	les deux	les deux
		8(s)	29(e)	les deux	les deux
		9(s)	30(e)	les deux	les deux
		10(s)	25(e)	les deux	les deux
		11(s)	4(e)	les deux	11(s)
		11(s)	19(e)	les deux	les deux
		11(s)	26(e)	les deux	les deux
		12(s)	13(e)	les deux	les deux
		12(s)	20(e)	les deux	les deux
		12(s)	27(e)	les deux	les deux
		13(s)	7(e)	les deux	les deux
		13(s)	10(e)	les deux	les deux
		13(s)	24(e)	les deux	les deux
		13(s)	29(e)	les deux	les deux
		14(s)	30(e)	les deux	30(e)
		17(s)	25(e)	25	25(e)
		18(s)	1(e)	les deux	les deux
		18(s)	19(e)	les deux	les deux
		18(s)	26(e)	les deux	les deux
		19(s)	30(e)	les deux	les deux
		20(s)	8(e)	les deux	les deux
		21(s)	2(e)	2	2(e)
		21(s)	13(e)	13	13(e)
		22(s)	11(e)	les deux	les deux
		23(s)	11(e)	les deux	les deux
		23(s)	17(e)	23	23(s)
		24(s)	25(e)	les deux	les deux
		27(s)	20(e)	les deux	les deux

Analyse: Les départements 17 et 21 apparaissent. 21 est couplé à 2, à 6 et à 13, il sera donc à gauche. 17 est couplé à 1, à 23 et à 25, il sera donc à droite. Plusieurs possibilités s'offrent à lui. Mais après le calcul des distances totales parcourues, une seule position de 17 est retenue. Finalement il reste deux ordonnancements possibles.

Ordonnancements:

21	3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	4	14
5	1	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28	17	20
21	3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	4	14
5	1	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28	17	20

(1)

21	3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	4	14
5	1	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28	17	20
21	3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	4	14
5	1	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28	17	20

(2)

Itération 6

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
5	143	1(s)	6(e)	les deux	les deux
		1(s)	11(e)	les deux	les deux
		1(s)	16(e)	les deux	les deux
		1(s)	21(e)	les deux	les deux
		1(s)	26(e)	les deux	les deux
		2(s)	12(e)	les deux	les deux
		2(s)	17(e)	les deux	les deux
		2(s)	22(e)	les deux	les deux
		2(s)	25(e)	les deux	les deux
		2(s)	27(e)	les deux	les deux
		3(s)	18(e)	les deux	les deux
		3(s)	19(e)	les deux	les deux
		3(s)	23(e)	les deux	les deux
		3(s)	26(e)	les deux	les deux
		3(s)	28(e)	les deux	les deux
		4(s)	13(e)	les deux	les deux
		4(s)	20(e)	les deux	les deux
		4(s)	24(e)	les deux	les deux
		4(s)	27(e)	les deux	les deux
		4(s)	29(e)	les deux	les deux
		5(s)	7(e)	les deux	les deux
		5(s)	14(e)	les deux	les deux
		5(s)	21(e)	les deux	les deux
		5(s)	28(e)	les deux	les deux
		5(s)	30(e)	les deux	les deux
		6(s)	5(e)	les deux	les deux
		6(s)	8(e)	les deux	6(s)
		6(s)	15(e)	6	6(s)
		6(s)	22(e)	les deux	les deux
		6(s)	29(e)	les deux	les deux
		7(s)	3(e)	les deux	7(s)
		7(s)	12(e)	les deux	les deux
		7(s)	17(e)	les deux	les deux
		7(s)	22(e)	les deux	les deux
		7(s)	27(e)	les deux	les deux
		8(s)	1(e)	les deux	les deux
		8(s)	3(e)	les deux	8(s)
		8(s)	18(e)	les deux	les deux
		8(s)	23(e)	les deux	les deux
		8(s)	28(e)	les deux	les deux
		9(s)	3(e)	les deux	9(s)
		9(s)	24(e)	les deux	les deux
		9(s)	25(e)	les deux	les deux
		9(s)	29(e)	les deux	les deux
		10(s)	1(e)	les deux	les deux
		10(s)	7(e)	les deux	les deux
		10(s)	19(e)	les deux	les deux
		10(s)	26(e)	les deux	les deux
		10(s)	30(e)	les deux	les deux
		11(s)	8(e)	les deux	les deux
		11(s)	10(e)	les deux	les deux
		11(s)	13(e)	les deux	les deux
		11(s)	20(e)	les deux	les deux
		11(s)	27(e)	les deux	les deux
		12(s)	1(e)	les deux	les deux
		12(s)	10(e)	les deux	les deux
		12(s)	14(e)	les deux	les deux
		12(s)	21(e)	les deux	les deux
		12(s)	28(e)	les deux	les deux
		13(s)	2(e)	les deux	les deux
		13(s)	9(e)	les deux	les deux
		13(s)	12(e)	les deux	les deux

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
5	143	13(s)	18(e)	les deux	les deux
		13(s)	23(e)	les deux	les deux
		13(s)	28(e)	les deux	les deux
		14(s)	4(e)	les deux	les deux
		14(s)	12(e)	les deux	les deux
		14(s)	24(e)	les deux	les deux
		14(s)	29(e)	les deux	les deux
		15(s)	6(e)	6	6(e)
		15(s)	30(e)	30	30(e)
		16(s)	4(e)	les deux	les deux
		16(s)	6(e)	les deux	les deux
		16(s)	10(e)	les deux	les deux
		16(s)	25(e)	les deux	les deux
		17(s)	1(e)	les deux	les deux
		17(s)	8(e)	les deux	les deux
		17(s)	10(e)	les deux	les deux
		17(s)	15(e)	17	17(s)
		17(s)	19(e)	les deux	les deux
		17(s)	26(e)	les deux	les deux
		18(s)	6(e)	les deux	les deux
		18(s)	14(e)	les deux	les deux
		18(s)	20(e)	les deux	les deux
		18(s)	27(e)	les deux	les deux
		19(s)	10(e)	les deux	les deux
		19(s)	18(e)	les deux	les deux
		19(s)	24(e)	les deux	les deux
		19(s)	29(e)	les deux	les deux
		20(s)	30(e)	les deux	les deux
		21(s)	3(e)	les deux	les deux
		21(s)	7(e)	les deux	21(s)
		21(s)	19(e)	les deux	les deux
		21(s)	20(e)	les deux	les deux
		22(s)	3(e)	les deux	22(s)
		22(s)	7(e)	les deux	les deux
		22(s)	8(e)	les deux	les deux
		22(s)	10(e)	les deux	les deux
		22(s)	15(e)	22	22(s)
		22(s)	19(e)	les deux	les deux
		23(s)	5(e)	les deux	23(s)
		23(s)	8(e)	les deux	les deux
		23(s)	9(e)	les deux	les deux
		23(s)	12(e)	les deux	les deux
		23(s)	22(e)	les deux	les deux
		23(s)	25(e)	les deux	les deux
		24(s)	10(e)	les deux	les deux
		24(s)	13(e)	les deux	les deux
		24(s)	17(e)	les deux	les deux
		24(s)	26(e)	les deux	les deux
		25(s)	7(e)	les deux	7(e)
		25(s)	8(e)	les deux	8(e)
		25(s)	13(e)	les deux	13(e)
		25(s)	16(e)	les deux	16(e)
		25(s)	19(e)	les deux	19(e)
		25(s)	24(e)	les deux	24(e)
		25(s)	30(e)	les deux	30(e)
		26(s)	9(e)	les deux	les deux
		26(s)	11(e)	les deux	les deux
		26(s)	17(e)	les deux	les deux
		26(s)	20(e)	les deux	les deux
		26(s)	24(e)	les deux	les deux
		27(s)	2(e)	les deux	les deux
		27(s)	8(e)	les deux	les deux
		27(s)	15(e)	27	27(s)
		27(s)	16(e)	les deux	les deux
		27(s)	18(e)	les deux	les deux

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
5	143	27(s)	22(e)	les deux	les deux
		28(s)	8(e)	les deux	les deux
		28(s)	20(e)	les deux	les deux
		28(s)	21(e)	les deux	les deux
		29(s)	4(e)	les deux	les deux
		29(s)	9(e)	les deux	les deux
		29(s)	10(e)	les deux	les deux
		29(s)	13(e)	les deux	les deux
		29(s)	14(e)	les deux	les deux
		29(s)	16(e)	les deux	les deux
		29(s)	17(e)	les deux	les deux
		29(s)	20(e)	les deux	les deux
		30(s)	2(e)	les deux	les deux
		30(s)	4(e)	les deux	les deux
		30(s)	13(e)	les deux	les deux
		30(s)	14(e)	les deux	les deux
		30(s)	22(e)	les deux	les deux

Analyse: Le département 15 est le dernier à apparaître, il ne peut se placer que sous le département 21. Après avoir placé les dernières portes dans les deux ordonnancements de l'itération 5, on calcule les distances totales parcourues et on s'aperçoit qu'un seul ordonnancement minimise ces distances.

Ordonnancement:

21	3	26	10	29	19	11	7	1	24	13	18	25	4		14
15	5	2	27	30	8	16	9	12	22	6	23	28	17		20

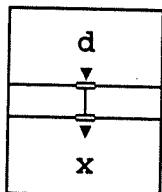
Annexe 6: Heuristique à deux portes appliquée à l'exemple de Montreuil (1991)

Itération 1

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
1357	1	d(s)	x(e)	aucun	aucune

Analyse: La paire d-x est retenue. Les portes d(s) et x(s) ne sont pas fixées mais elles restent liées entre elles.

Ordonnancement:

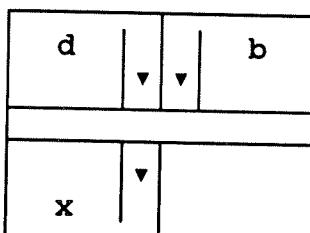


Itération 2

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
1002	1	b(s)	x(e)	x	x(e)

Analyse: Un seul ordonnancement des départements et des portes est possible.

Ordonnancement:

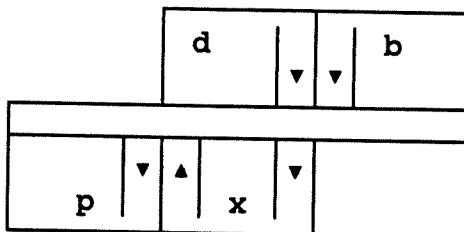


Itération 3

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
962	1	x(s)	p(e)	x	aucune

Analyse: Un seul ordonnancement minimise les distances parcourues entre les différentes portes.

Ordonnancement:

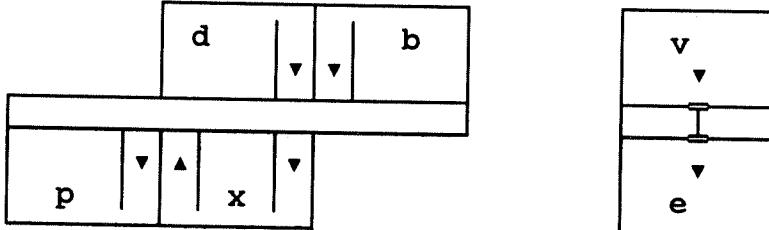


Itération 4

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
926	1	v(s)	e(e)	aucun	aucune

Analyse: La paire e-v est retenue, disjointe de l'ordonnancement en 3. Les portes v(s) et e(e) ne sont pas fixées mais elles restent liées entre elles.

Ordonnancement:

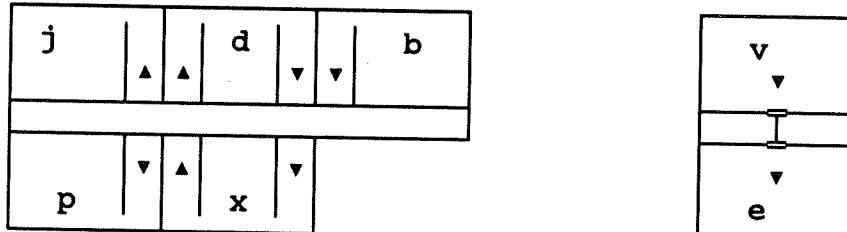


Itération 5

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
747	1	x(s)	j(e)	x	x(s)

Analyse: Seule la porte x(s) est à rajouter. Elle doit être placée à gauche du département x pour minimiser la distance entre elle et la porte j(e).

Ordonnancement:

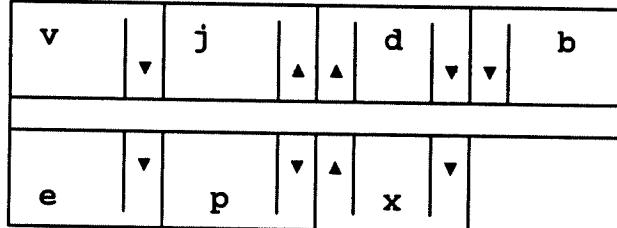


Itération 6

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
575	1	v(s)	d(e)	les deux	v(s)

Analyse: Seule la porte d(e) est à placer. Elle se placera à droite du département d pour minimiser les distances parcourues.

Ordonnancement:

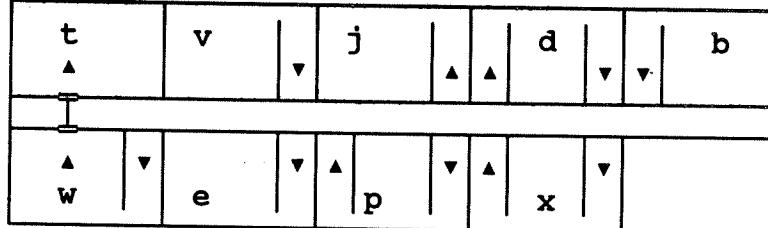


Itération 7

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
520	2	p(s) w(s)	w(e) t(e)	p aucun	aucune aucune

Analyse: Un seul ordonnancement n'est possible pour minimiser les distances parcourues. Les portes t(e) et w(s) ne sont pas fixées mais elles restent liées entre elles.

Ordonnancement:

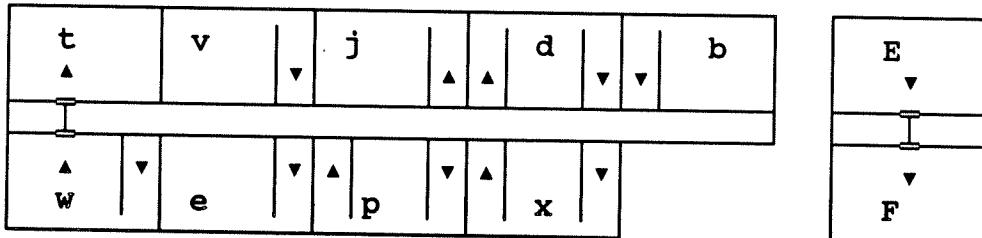


Itération 8

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
390	1	E(s)	F(e)	aucun	aucune

Analyse: La paire E-F est disjointe de l'ordonnancement en 7. Les portes E(s) et F(e) ne sont pas fixées mais elles restent liées entre elles.

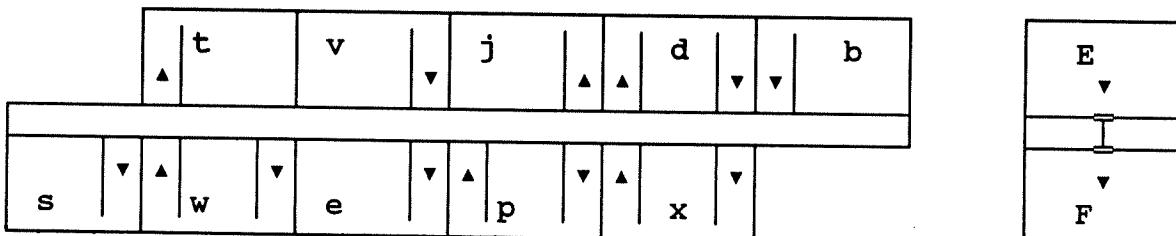
Ordonnancement:



Itération 9

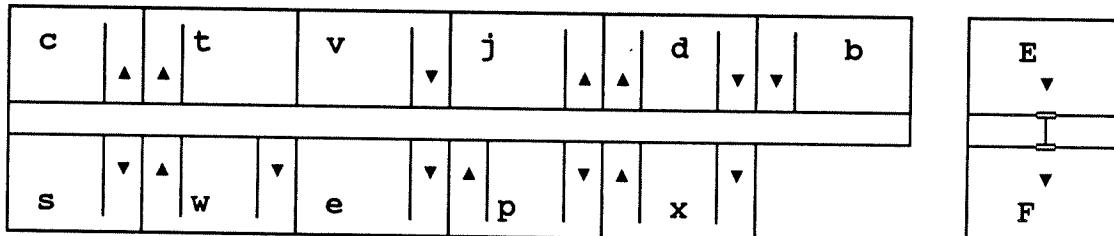
Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
382	1	w(s)	s(e)	w	w(s)

Analyse: Un seul ordonnancement des départements et des portes n'est possible pour minimiser les distances parcourues.
Ordonnancement:

**Itération 10**

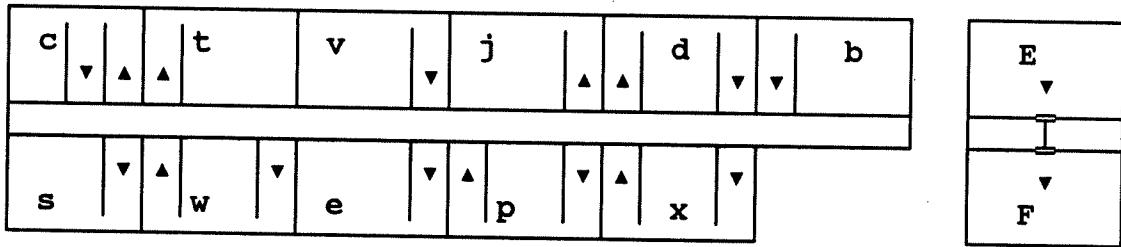
Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
311	1	v(s)	c(e)	v	v(s)

Analyse: Un seul ordonnancement des départements et des portes n'est possible pour minimiser les distances parcourues.
Ordonnancement:

**Itération 11**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
184	1	c(s)	x(e)	les deux	x(e)

Analyse: Seule la porte c(s) est à placer. Pour minimiser les distances, elle sera placée à droite du département c, et à gauche de la porte d'entrée.

Ordonnancement:**Itération 12**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
158	1	w(s)	x(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucun nouveau département n'est à placer.

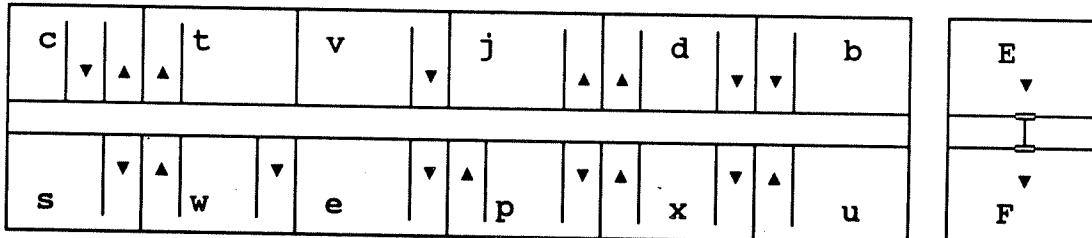
Ordonnancement: Identique à celui de l'itération 11.

Itération 13

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
145	1	u(s)	j(e)	j	j(e)

Analyse: Un seul ordonnancement des départements n'est possible et pour minimiser les distances parcourues, la porte u(s) sera placée à la gauche de son département.

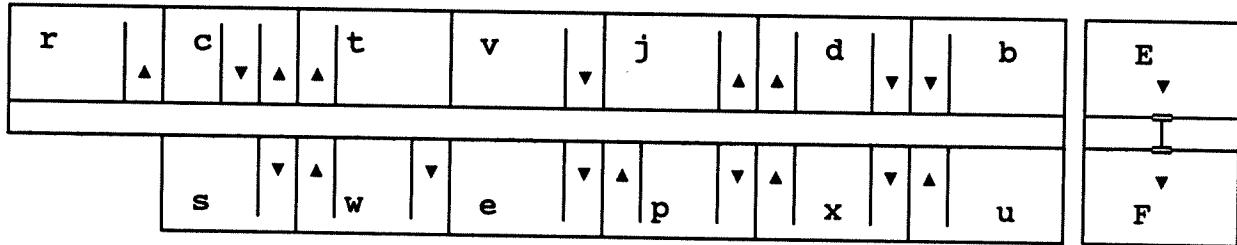
Ordonnancement:

**Itération 14**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
140	1	w(s)	r(e)	w	w(s)

Analyse: Pour minimiser les distances parcourues, il n'y a qu'un seul ordonnancement possible des départements et des portes.

Ordonnancement:



Itération 15

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
130	1	v(s)	w(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucun nouveau département et aucune nouvelle porte ne sont à placer.

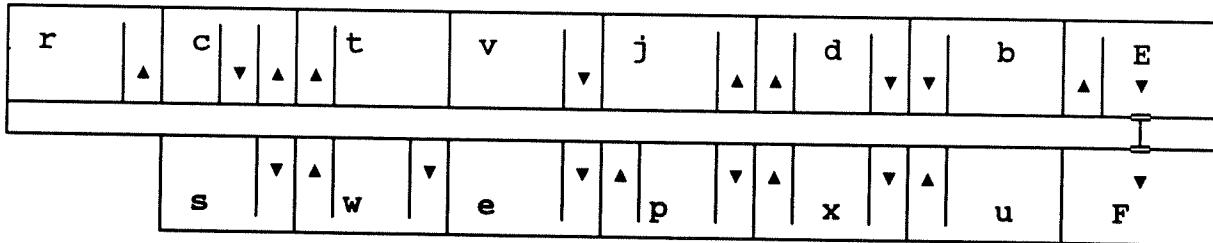
Ordonnancement : Identique à celui de l'itération 14.

Itération 16

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
126	1	x(s)	E(e)	les deux	x(s)

Analyse: La porte E(e) est à placer le plus près possible du département x. Il faut donc raccorder la paire E-F à l'ordonnancement des autres paires.

Ordonnancement:

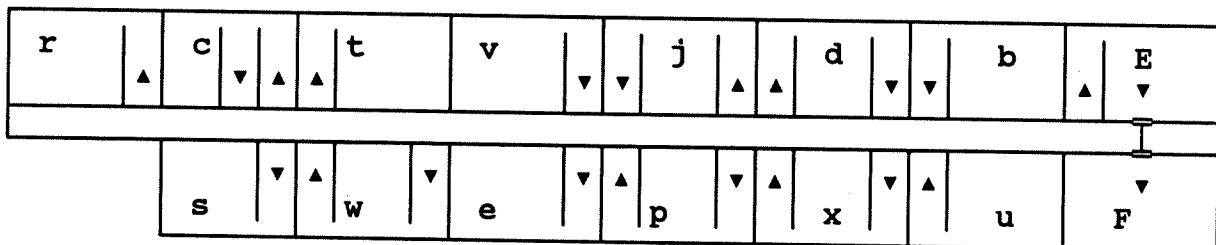


Itération 17

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
120	2	x(s) j(s)	e(e) w(e)	les deux les deux	les deux w(e)

Analyse: La porte j(s) devra se placer à gauche du département j afin de la rapprocher de la porte w(e).

Ordonnancement:

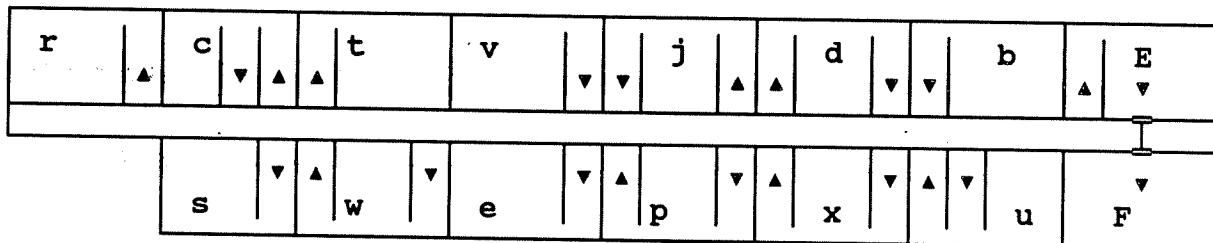


Itération 18

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
116	2	b(s) w(s)	w(e) u(e)	les deux les deux	les deux w(s)

Analyse: Pour minimiser les distances parcourues, il faut placer la porte u(e) sur la droite du département u.

Ordonnancement:

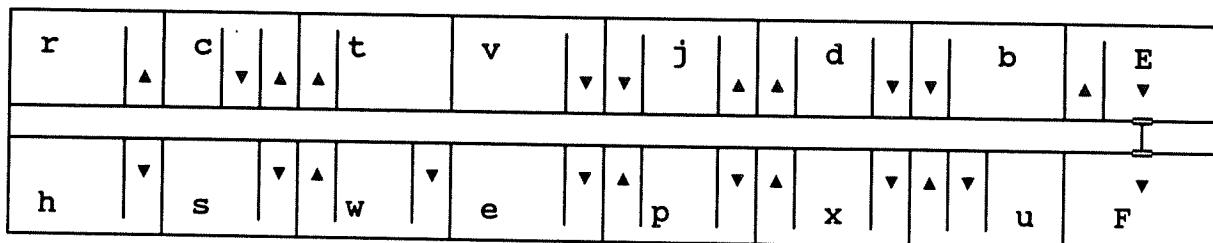


Itération 19

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
107	1.	v(s)	h(e)	v	v(s)

Analyse: Un seul ordonnancement des départements et des portes n'est possible pour minimiser les distances parcourues.

Ordonnancement:

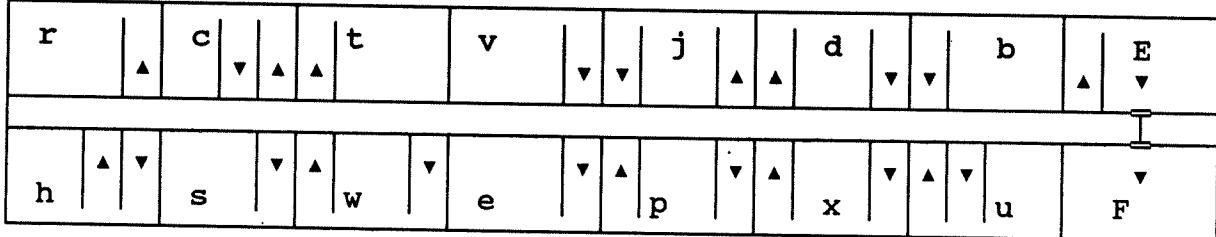


Itération 20

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
106	1	h(s)	w(e)	les deux	w(e)

Analyse: Pour minimiser les distances parcourues, il faut placer la porte h(s) juste à côté de la porte h(e).

Ordonnancement:

**Itération 21**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
78	1	w(s)	p(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucun département ni aucune nouvelle porte ne sont à placer.

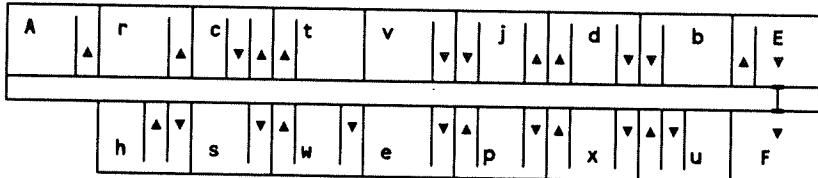
Ordonnancement: Identique à celui de l'itération 20.

Itération 22

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
74	1	w(s)	A(e)	w	w(s)

Analyse: Le département A à côté du département r permet de minimiser les distances parcourues. Sa porte d'entrée doit être placée à sa droite.

Ordonnancement:



Itération 23

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
53	1	x(s)	u(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucun nouveau département n'est à placer.

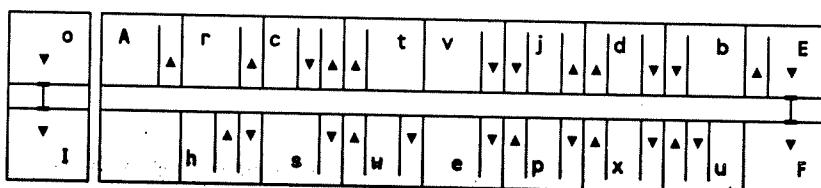
Ordonnancement: Identique à l'itération 22.

Itération 24

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
48	1	o(s)	I(e)	aucun	aucune

Analyse: La paire o-I est disjointe de l'ordonnancement 23.

Ordonnancement:

**Itération 25**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
42	1	x(s)	c(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucun nouveau département ni aucune nouvelle porte ne sont à placer.

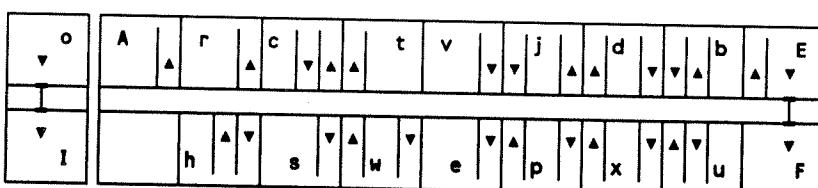
Ordonnancement: Identique à l'ordonnancement 24.

Itération 26

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
40	2	v(s) c(s)	b(e) w(e)	les deux les deux	v(s) les deux

Analyse: L'emplacement de la porte b(e) à côté de la porte b(s) permet de minimiser les distances parcourues.

Ordonnancement:

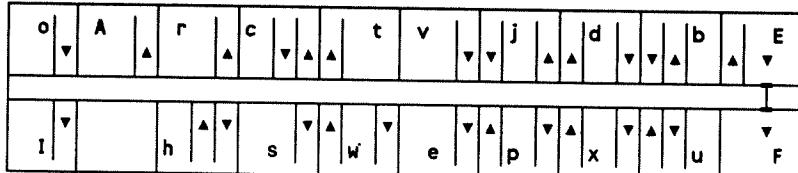


Itération 27

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
36	1	w(s)	I(e)	les deux	les deux

Analyse: Cette relation permet de raccorder la paire o-I aux autres paires ordonnancées.

Ordonnancement:

**Itération 28**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
34	1	x(s)	d(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucun nouveau ordonnancement ni nouvelle porte n'est à placer.

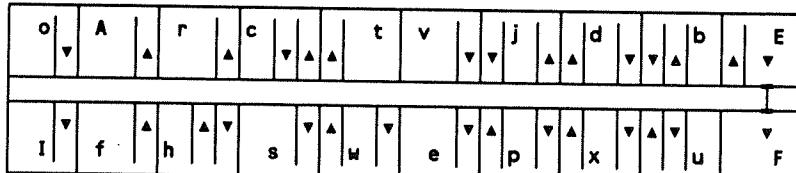
Ordonnancement: Identique à l'ordonnancement de l'itération 27.

Itération 29

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
32	1	f(s)	w(e)	w	w(e)

Analyse: Pour minimiser les distances parcourues nous placerons le département f entre le département I et le département h.
La porte f(s) sera placée à la droite du département f.

Ordonnancement:

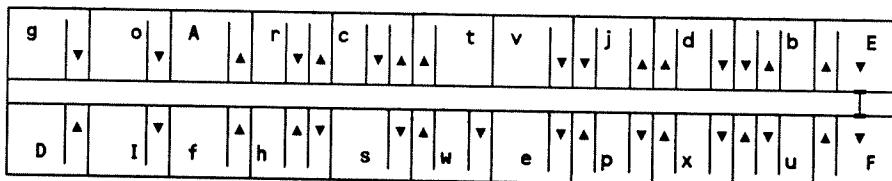


Itération 30

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
30	5	g(s) r(s) w(s) D(s) F(s)	w(e) s(e) c(e) s(e) w(e)	w les deux les deux s les deux	w(e) s(e) les deux s(e) w(e)

Analyse: Un seul ordonnancement des portes et des départements n'est possible pour minimiser les distances parcourues.

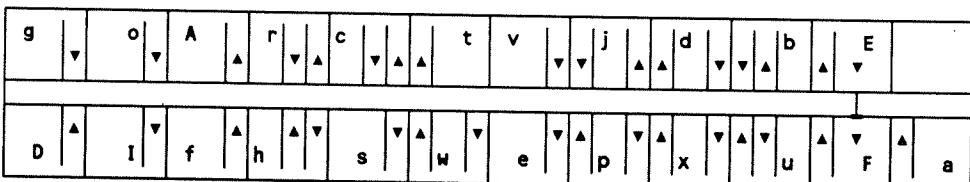
Ordonnancement:

**Itération 31**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
28	1	a(s)	w(e)	w	w(e)

Analyse: Pour minimiser les distances parcourues, il faut placer le département a à droite du département F. Sa porte de sortie sera placée à sa gauche.

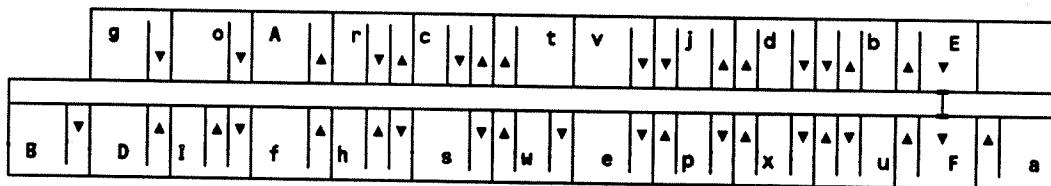
Ordonnancement:

**Itération 32**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
26	2	w(s) I(s)	B(e) t(e)	w les deux	w(s) t(e)

Analyse: Il faut rapprocher le département B du département w. Pour cela, nous le positionnerons à gauche du département D. Pour minimiser les distances parcourues, nous placerons la porte B(e) à la droite du département B. Nous placerons également la porte I(s) à côté de la porte I(e).

Ordonnancement:

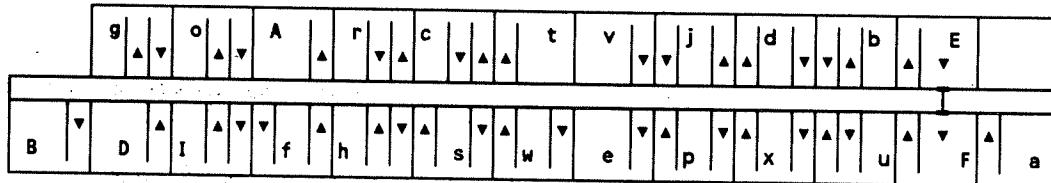


Itération 33

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
20	4	d(s) g(s) r(s) s(s)	g(e) f(e) w(e) o(e)	les deux les deux les deux les deux	d(s) g(s) les deux aucune

Analyse: Pour minimiser les distances parcourues, il n'y a qu'un seul emplacement des portes possible.

Ordonnancement:

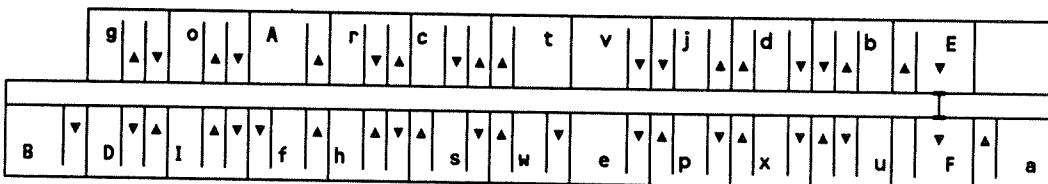


Itération 34

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
13	1	r(s)	D(e)	les deux	r(s)

Analyse: Plaçons la porte D(e) à gauche de la porte D(s) pour minimiser les distances parcourues.

Ordonnancement:



Itération 35

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
12	1	v(s)	f(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucun nouveau département n'est à placer.

Ordonnancement: Identique à l'itération 34.

Itération 36

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
10	1	I(s)	s(e)	les deux	les deux

Analyse: Aucun nouveau département ni aucune nouvelle porte ne sont à placer.

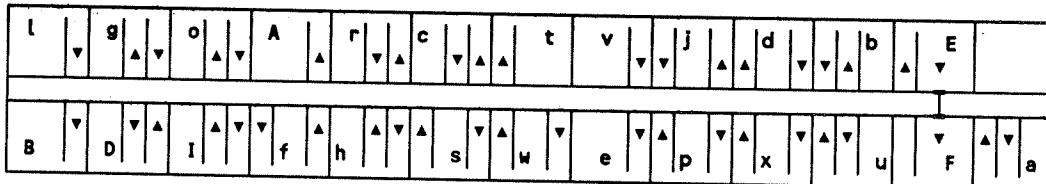
Ordonnancement: Identique à celui de l'itération 35.

Itération 37

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
8	2	l(s) v(s)	D(e) a(e)	D les deux	D(e) v(s)

Analyse: Plaçons le département l à gauche du département g pour le rapprocher du département D. Sa porte de sortie sera placée à sa droite pour minimiser les distances parcourues.

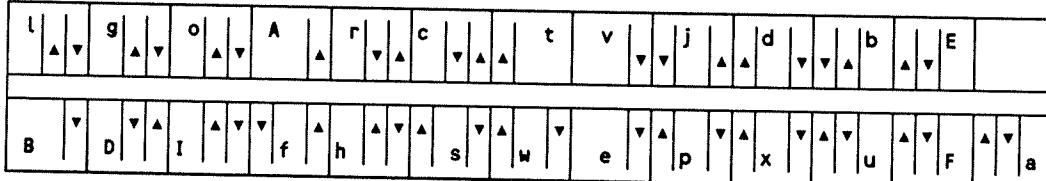
Ordonnancement:

**Itération 38**

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
6	4	d(s) v(s) x(s) E(s)	E(e) g(e) l(e) w(e)	les deux les deux les deux les deux	les deux les deux x(s) les deux

Analyse: Il existe une seule possibilité de placer la porte de sortie du département l. Cette itération permet de fixer les portes E(s) et F(e).

Ordonnancement:

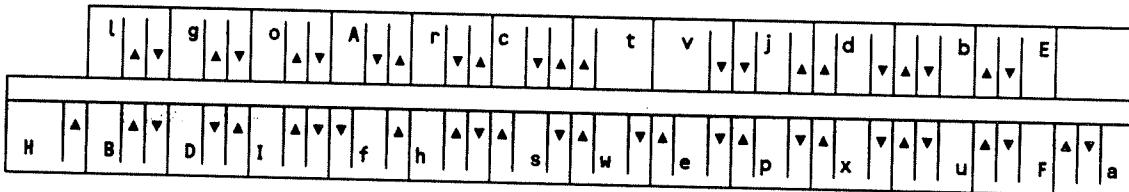


Itération 39

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
4	10	d(s) d(s) e(s) s(s) s(s) w(s) À(s) B(s) D(s) H(s)	w(e) D(e) c(e) w(e) E(e) l(e) x(e) s(e) w(e) B(e)	les deux les deux les deux les deux les deux les deux les deux les deux les deux B	les deux les deux c(e) les deux les deux w(s) x(e) s(e) les deux B(e)

Analyse: Un seul ordonnancement des portes qu'il reste à placer et du département H n'est possible pour minimiser les distances parcourues.

Ordonnancement:

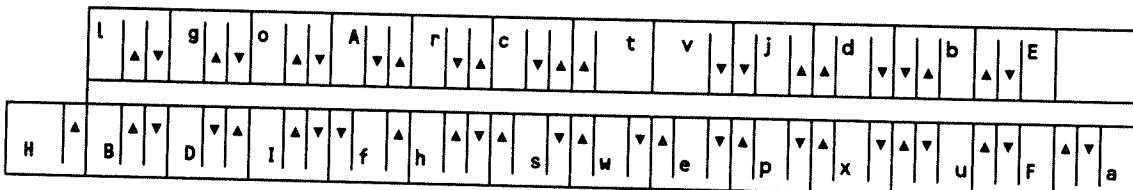


Itération 40

Fréquence de déplacement maximale	Nombre de paires	Liste des paires		Départements déjà retenus	Portes déjà retenues
		Sortie	Entrée		
2	2	d(s) x(s)	l(e) o(e)	les deux les deux	d(s) les deux

Analyse: Pour minimiser les distances parcourues il faut placer la porte d'entrée du département o à sa droite, près de la porte de sortie, afin de la rapprocher de la porte x(s).

Ordonnancement:



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00289720 3