

La Gestion du Design Modulaire.

Henri-Paul Parenteau.

La fabrication en grande série est un réseau qui convertit les inputs en un enchaînement de produits identiques. Le design modulaire introduisant le concept d'interchangeabilité établit un pont entre les exigences de répétition de la fabrication en grande série et la variété de la demande. Les méthodes électroniques sont utiles pour traiter les problèmes d'optimisation.

Le nombre de combinaisons possibles des pièces composantes peut facilement atteindre un chiffre important. Par exemple, une ouverture qui doit être fermée avec des cloisons, peut être remplie soit par un certain nombre de petites pièces, soit par un grand panneau. La comparaison des coûts entre les différentes alternatives n'est pas un problème comparable aux analyses topologiques des parcours les plus courts, puisque l'adoption d'une décision ou d'une autre affecte les paramètres à partir desquels la décision originale a été prise. Par conséquent, les procédures impliquent une récurrence itérative, accompagnée d'étapes conditionnelles. Le point de départ logique consiste à prendre la dimension la plus grande qui a été demandée, puis d'essayer progressivement des plus petites. Certains raccourcis sont possibles, mais en réalité des variations — outre celles des dimensions — entraînent d'autres difficultés.

Introduction: Les Pièces Composantes et la Fabrication en Grande Série.

L'organisation industrielle a fait naître le système de production en grande série. Ce système constitue un réseau de processus continus et automatiques grâce auquel des inputs sous forme de matériaux sont transformés, à la sortie, en un enchaînement de produits identiques. Ce développement a été enrichi par des innovations technologiques, des méthodes de gestion progressives et par l'utilisation précoce des ordinateurs. Le traitement électronique extensif des données ouvre maintenant de nouvelles frontières, de telle sorte que l'homme peut analyser des systèmes plus complexes. Du fait de cette nouvelle ressource de gestion, les systèmes de production peuvent se fixer de nouveaux objectifs, à savoir la production de la variété d'un produit tout en maintenant un niveau d'efficacité identique. Le design modulaire est la clé de l'évolution de la production systématique.

C'est parce que l'industrie de la construction est affectée d'une façon permanente par le besoin de variété qu'elle n'a atteint qu'un certain degré d'industrialisation. Certes, le système de production en grande série ne s'adapte pas immédiatement aux problèmes de la production des différents bâtiments, remplissant diverses fonctions et créant un environnement esthétique, lui-même réalisé par la variété des espaces et des matériaux. Le processus de la construction, comme nous le savons, doit permettre la flexibilité du design; il n'est donc pas surprenant que l'industrie de la construction évolue comme une structure industrielle fragmentée et qu'elle joue un rôle avant-garde, quant à l'introduction du design modulaire pour la production.

Un ensemble de pièces composantes peut être fabriqué individuellement dans une usine afin d'être finalement assemblé sur chantier par un minimum de main-d'oeuvre expérimentée. On espère que ces pièces composantes créeront, grâce à leurs diverses combinaisons, des bâtiments et des environnements variés. Cependant cette fragmentation du processus de construction nécessite une coordination réelle des différentes pièces composantes, y compris la coordination des dimensions et des modules. Quoique ce concept soit clair et bien défini actuellement, la structure qui correspond à son implantation dans l'industrie de la construction doit être encore conçue et réellement mise en application.

L'Auteur, M. Parenteau, prépare actuellement son doctorat à Columbia University dans le domaine de l'architecture et la gestion des systèmes. M. Parenteau possède des diplômes en Génie Civil et Architecture qu'il a reçus à Montréal.

Dans la construction traditionnelle, l'utilisation des pièces composantes n'est faite que pour certains éléments employés un très grand nombre de fois au cours de la construction du bâtiment. Avec les systèmes de construction, l'utilisation répétitive de ces pièces composantes est appliquée à un grand nombre des éléments du bâtiment, et entraîne par conséquent une augmentation de la participation des fabricants et une diminution de l'applicabilité des pièces composantes elles-mêmes. L'adaptation des processus de construction à une nouvelle structure industrielle pourrait rendre les différentes opérations plus efficaces, à condition qu'une organisation adéquate de la production puisse être coordonnée avec les processus d'assemblage. Cet impératif demande qu'on favorise une organisation comme celle des "systèmes ouverts", qui permet une plus grande diversité malgré les limitations économiques sévères qui sont maintenant imposées à l'industrie de la construction.

Le but de cet article est d'explorer l'organisation de la production des pièces composantes dont le design est modulaire. La production de chacun de ces éléments modulaires doit être organisée d'une façon rationnelle, compte tenu du processus de construction tout entier, afin d'obtenir la variété demandée pour le prix le plus avantageux. Si nous considérons la production de chaque pièce composante comme le segment d'un réseau d'opérations, une optimisation locale de ce segment sera probablement obtenue par une sous-optimisation du réseau tout entier. A l'aide d'un cas très simple comme celui d'une cloison modulaire, nous essaierons d'illustrer le conflit qui peut se produire à la jonction de deux segments du réseau. Une procédure de réconciliation est suggérée pour définir la meilleure marche à suivre en tenant compte de la flexibilité du design modulaire. Enfin un exemple sera décrit pour démontrer cette procédure.

En premier lieu essayons de distinguer les caractéristiques du design modulaire qui le différencient du design traditionnel.

La Flexibilité du Design Modulaire.

Dans la production industrielle conventionnelle, un objet est conçu pour la production. Chaque partie de cet objet est uniquement définie en termes technologiques et un système est établi pour assurer la répétition de la production de ces parties et leur assemblage final. Le produit fini ne peut pas être modifié. Une approche alternative au design met en évidence la variété qui peut être obtenue à partir de diverses combinaisons. Par exemple, des pièces composantes modulaires différentes sont conçues spécifiquement, de façon à ce qu'elles puissent être groupées de plusieurs manières pour accroître le nombre de choix de produits finis, grâce à la flexibilité permise par les règles de design, c'est-à-dire la discipline modulaire. Au lieu de concevoir chaque produit l'un après l'autre selon la méthode de production conventionnelle, un ensemble d'unités modulaires et une organisation prévue pour leur production, produiront toute une variété de produits à l'aide de leurs différents assemblages. Le design modulaire s'applique donc à un système et non pas uniquement à un objet.

Un ensemble de pièces composantes modulaires dont les dimensions sont des multiples du module de base, peut entraîner une variété considérable du fait du nombre extraordinaire de combinaisons qui peuvent être obtenues, même à partir d'un très petit nombre de pièces composantes. En effet, un ensemble de N éléments différents — qui peuvent être combinés et apparaître dans chaque combinaison jusqu'à un nombre M de fois — entraîne M^N assemblages différents. Au cas où un élément serait absent, ce chiffre devient $(M + 1)^N - 1$. Avec un ensemble de cinq éléments, qui peuvent apparaître tour à tour 0, 1, 2, 3 fois dans la même combinaison, le nombre maximum de combinaisons possibles, c'est-à-dire de cas différents, sera 1023.

Cette variété est extraordinaire et elle entraîne avec elle une grande complexité dans le domaine de la planification d'un système de production complet. L'exploration de l'ensemble des possibilités qui peuvent être conçues et l'élaboration de la meilleure approche pour résoudre ce système très complexe, demandent une procédure analytique minutieuse, exigeant elle-même le traitement des données par l'ordinateur.

Problèmes de Sous-optimisation.

Prenons comme exemple la production d'unités préfabriquées de cloisons modulaires. Assumons que la flexibilité désirée pour le produit fini peut être réalisée à l'aide de diverses combinaisons linéaires des unités modulaires, et que le système de production est organisé pour obtenir le maximum d'efficacité. Dans l'état actuel de l'industrie de la construction, deux décisions dépendantes sont prises indépendamment à l'égard de ce genre de cloisons modulaires. Tout d'abord le designer de ce système de cloisons veut offrir une certaine variété de formes et de dimensions afin de remplir les diverses exigences imposées par les espaces fonctionnels, même s'il accepte de limiter sa propre créativité en respectant les règles modulaires. D'autre part le fournisseur de pièces composantes préfabriquées veut réduire à un minimum la variété des unités qu'il doit produire tout en satisfaisant la demande du designer. Ainsi, pour offrir un produit relativement flexible, le fabricant répond en produisant des unités normalisées assez petites pour créer une variété de combinaisons lors des assemblages subséquents. La grandeur de cette unité normalisée a tendance naturellement à être celle de son module de base.

Il semble qu'il y ait un conflit entre l'objectif général de la production et ceux d'une optimisation du système de construction tout entier, une fois que le processus d'assemblage sur chantier est pris en considération, puisque les opérations extrêmement répétitives de jointoiment doivent être réalisées pour installer la cloison. Les opérations du fabricant ne représentent donc qu'une partie du réseau de production tout entier et son objectif n'est qu'une optimisation limitée à cette partie. Tout se passe comme si une gestion efficace devait concilier les objectifs du fabricant et les priorités de l'assemblage sur chantier, à l'intérieur d'un contexte plus large, à savoir le processus de construction tout entier.

Un critère de gestion essentiel pour réaliser cet objectif de la façon la plus satisfaisante serait de rechercher quelle devrait être la variété des dimensions des unités modulaires qu'on doit fabriquer pour diminuer l'ensemble du coût de l'assemblage des cloisons en tenant compte des différents coûts de production et d'assemblage sur chantier. Par la suite, il serait possible d'inclure les coûts de transport et tous les autres frais qui pourraient être déterminés.

Cette définition du problème suggère tout d'abord une procédure qu'on appelle "analyse du parcours le plus court dans un graphe"; c'est une méthode de recherche opérationnelle courante. Dans le cas qui nous préoccupe, nous devons donc établir une liste des grandeurs de cloisons qui sont nécessaires. Chaque combinaison possible doit être étudiée pour identifier quel est l'assemblage le plus économique de ces unités. En effet, si nous connaissons le coût de production d'une unité de grandeur $(j \times M) = C_j^P$, et le coût des opérations de jointoiment sur chantier C^C , il est possible de calculer l'ensemble des coûts en commençant par les combinaisons des panneaux de dimensions les plus grandes jusqu'à celles des panneaux du module de base $(1 \times M)$. Il est facile de déterminer la combinaison d'unités qui est la plus économique et qui permettrait de fournir toutes les grandeurs de cloisons exigées. La question qui se pose alors est la suivante; quelle est la valeur minimale de C_k^A (lorsque C_k^A représente la production totale et les coûts d'assemblage d'une cloison d'une grandeur de K modules) étant donné que $C_k^A = \sum C^P + \sum C^C$?

Supposons que la dimension des cloisons demandées soit $(4 \times M)$; quelle sera donc la meilleure combinaison de panneaux? Les combinaisons possibles sont indiquées sur la figure 1.

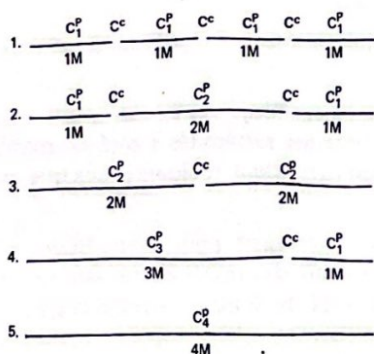


Figure 1. Combinaisons de pièces composantes remplissant une espace de 4 M.

$$\min. \text{ de: } \begin{cases} 3 \times C^C + 4 \times C_1^P \\ 2 \times C^C + 2 \times C_1^P + 1 \times C_2^P \\ 1 \times C^C + 2 \times C_2^P \\ 1 \times C^C + 1 \times C_1^P + 1 \times C_3^P \\ 1 \times C_4^P \end{cases}$$

Cette procédure peut sembler un peu longue, mais en réalité elle est absolument directe et sans complications.

En général, chaque cas demandera une série de grandeurs différentes de cloisons, qui pourront être obtenues en faisant un relevé des cloisons nécessaires pour le programme de construction. Ce relevé fournira également la liste des dimensions nécessaires et l'importance de la demande respective de chacune d'elles. Les services d'évaluation fourniront les estimatifs des coûts de production pour chaque genre de panneaux et les coûts de leur jointolement sur chantier. Cette étude des coûts pourrait avoir l'apparence que nous proposons (figure 2).

Dimensions	Fréquence	CP en \$	CC en \$
—1M—	4000	:	:
—2M—	600	:	:
—3M—	320	:	:
—4M—	600	:	:
—5M—	300	:	:
—6M—	300	:	:

Figure 2. Enumération typique de la demande et des coûts. (CP = coûts de production, CC = coûts d'assemblage).

Ces informations mises à la disposition d'un responsable du système, doivent être considérées, afin d'inclure les objectifs du fabricant de façon à ce que le système soit considéré comme un tout.

En réalité, ce problème de gestion diffère de la simple procédure du "parcours le plus court" pour deux raisons. Tout d'abord nous devons examiner la longue liste des dimensions des cloisons — ce qui augmente énormément l'importance des calculs. Deuxièmement les meilleurs arrangements pour chaque grandeur de cloison sont dépendants les uns des autres. A chaque fois qu'une combinaison d'unités particulières est choisie pour réaliser quelconque grandeur de cloison, la fréquence de la demande pour des panneaux ayant ces dimensions particulières variera du même coup. Il est évident qu'une variation de la fréquence de la demande d'une unité particulière affecte son coût de production CP. L'analyse "du parcours le plus court" doit être modifiée pour résoudre cet ensemble de combinaisons d'unités modulaires. Cependant il est approprié d'explorer les facteurs des différents coûts d'une façon plus minutieuse avant de poursuivre la question des combinaisons.

Les Coûts.

Toutes les comparaisons de coûts faites avant de décider si on va produire un panneau d'une certaine taille ou non, devraient prendre en considération les opérations de production et d'assemblage sur chantier, comme nous l'avons déjà signalé. Ces opérations d'assemblage sur chantier peuvent être considérées comme étant normalisées pour tout le système, et les coûts d'assemblage peuvent être raisonnablement alloués pour chaque opération de jointolement d'une façon uniforme.

Autrement dit, C^C = Coût de jointolement = constante pour tous les joints.

Le nombre de joints nécessaire à l'assemblage des panneaux correspond au nombre d'unités moins un; les joints des extrémités à coté des membres structuraux ne sont pas inclus puisqu'ils existent toujours quelle que soit la combinaison des panneaux.

Le coût de production qui est intéressant pour cette étude, est la proportion du coût qui varie avec le choix des unités combinées. Les coûts variables tels que ceux des matériaux et de la main-d'oeuvre peuvent être plus ou moins considérés comme constants par rapport à l'unité de superficie des panneaux; ils sont alloués selon un barème au pied carré pour faciliter la gestion, quelles que soient les combinaisons éventuelles qui seront faites au cours de l'assemblage sur chantier. La portion des coûts de production affectée par les différentes grandeurs de cloisons nécessaires est

une augmentation de coûts, due à la variété de la production. Puisque le fabricant devra produire le panneau modulaire de base, il encourra des frais supplémentaires pour tout autre panneau de taille différente qu'il ajoutera à sa liste de produits. L'augmentation du coût lui-même est due au fait qu'il doit avoir une machine différente pour chaque grandeur ou bien qu'il doit ajuster une machine afin qu'elle puisse produire toutes les tailles voulues – dans ce cas il doit prévoir du temps pour l'adaptation de la machine. Les coûts d'inventaire peuvent aussi varier. L'ensemble de tous ces coûts représente des déboursements initiaux qui sont amortis progressivement sur chaque panneau, produit par la suite.

Autrement dit, si T_j = l'augmentation de coût prévue pour ajuster la machine afin de produire les unités de type $(j \times M)$, outre les coûts de production du panneau de base, et si d = la fréquence de la demande pour cette unité (j) dans le programme de construction, on a alors:

c_j^P = augmentation du coût de production pour chaque unité du type $(j \times M)$.

$$C_j^P = T_j/d \text{ et } C_j^P = j \times C_1^P + c_j^P$$

C'est grâce à cette relation que T_j et d entrent en considération, lorsque – pour chaque grandeur de cloison – le fabricant doit décider s'il produira une grande unité pour fermer l'ouverture ou bien s'il fabriquera un ensemble de plus petites unités.

Comme nous l'avons vu, si un panneau est utilisé pour remplir l'ouverture (de largeur $k \times M$) on a alors: $C_k^a = C_k^P$; si un nombre n de petits panneaux est choisi pour remplir l'espace, on a alors: $C_k^a = n \times C_1^P + (n - 1) C^C$.

Cependant ce calcul n'est pas aussi facile que cela peut le paraître pour des raisons que nous devons encore explorer.

Définition d'une Méthode de Gestion.

La gestion de la production doit résoudre le problème posé par le choix des panneaux en établissant une liste de la grandeur des panneaux qu'on veut produire. Cette liste pourrait être si limitée qu'elle incluerait seulement les tailles modulaires de base ou même, à l'extrême, pourrait inclure autant de types de panneaux que de cloisons nécessaires pour le programme de construction. Différentes approches sont possibles entre ces deux extrêmes.

Pour chaque taille de cloison, le fabricant compare les coûts de production en usine pour chaque unité choisie, dont la dimension a été adoptée pour remplir l'espace nominal, et les coûts entraînés par un assemblage d'unités plus petites, combinées d'une façon appropriée en tenant compte des coûts de production et d'assemblage. S'il choisit à un moment donné de produire une unité qui s'adapte exactement à la taille de l'ouverture nominale, sa décision sera basée sur l'importance de la demande au moment où il fait ses comparaisons de coûts. Si par la suite il décide de fournir un assemblage de pièces plus petites pour la grandeur de panneau suivante, il peut alors abandonner la production du panneau de la taille qu'il avait prévue auparavant en adoptant des unités plus petites également. Il est clair que de ce fait il doit augmenter l'importance de la demande pour les plus petites pièces dans une proportion qui correspond à sa décision.

Puisqu'il doit répéter son analyse de coûts pour les différentes grandeurs de panneaux, en vérifiant les répercussions de ses décisions à chaque fois qu'il choisit d'assembler des plus petites unités pour satisfaire les dimensions voulues, il modifie par cette même opération les informations à partir desquelles il avait basé ses décisions à l'égard de la production ou de l'assemblage. C'est pourquoi, chaque fois qu'il décide d'assembler de nouveaux panneaux, ses décisions antérieures doivent être remaniées; de même, ses décisions ultérieures doivent tenir compte de la nouvelle situation. Une autre comparaison de coûts ne serait guère profitable à moins qu'une procédure itérative soit définie pour éliminer graduellement les cas les plus coûteux jusqu'à ce qu'une décision finale soit atteinte.

Si nous étudions le problème d'une façon plus minutieuse, nous pourrions

peut être définir une méthode de procédure. Si nous voulons appliquer une méthode de programmation dynamique, il faudrait faire tout d'abord une liste de production initiale, incluant les unités qui satisferont toutes les grandeurs demandées pour fermer les ouvertures, grâce à une seule pièce composante à chaque fois. Cette liste devra indiquer en outre la fréquence de la demande pour chacune de ces pièces. Cette procédure permet de s'assurer qu'aucune pièce ne sera oubliée. Pour comprendre l'enchaînement de cette procédure, il faudrait étudier les conséquences des décisions possibles et leurs répercussions.

Prenons, par exemple, une ouverture de grandeur (12 x M):

- a) A partir des comparaisons des coûts de production et d'assemblage, nous pouvons décider d'assembler des unités plus petites pour remplir l'ouverture de 12 x M. La pièce de grandeur 12M peut être retirée de la liste de production et les quantités demandées d'unités plus petites se trouvent de ce fait proportionnellement augmentées.
- b) Si par contre nous décidons de produire une unité de grandeur 12M, la décision reste valide aussi longtemps que les coûts de production des plus petites unités ne sont pas réduits. Cette éventualité survient, bien entendu, dès que la quantité demandée des plus petites unités se trouve augmentée. Dans ce cas, il faut donc réviser la décision de nouveau.

Nous pouvons constater qu'une décision du type (a) concernant la plus grande taille des pièces composantes de la liste initiale, affecte la fréquence de la demande des pièces composantes de plus petites dimensions d'une façon qui renforce la décision (a). Cette décision (a) — une fois l'alternative (b) écartée — peut être considérée comme définitive et ne peut être améliorée que par des changements de la fréquence de la demande pour des unités encore plus petites. Quant à la décision (b), elle doit être révisée chaque qu'il y a un changement dans les quantités des pièces composantes plus petites, à la suite d'une décision (a) à n'importe quelle phase du système. Cette approche définit les priorités entre les deux types de décisions; la décision d'abandonner une certaine unité de la liste de production est définitive, tandis que la décision qui vise à produire une unité d'une certaine grandeur est indéterminée, aussi longtemps qu'il est possible d'abandonner certaines autres pièces composantes de la liste de production. Par conséquent, la procédure est la suivante: (i) nous devons établir des comparaisons de coûts à partir des plus grandes dimensions nécessaires sur la liste; (ii) nous devons reprendre les décisions (b) antérieures à chaque fois qu'une nouvelle décision (a) est atteinte. Cette analyse est achevée lorsque la plus petite pièce (1M) est finalement étudiée.

Cette procédure est expliquée dans les paragraphes qui suivent; les informations de la Table 1 illustrent cette procédure.

Premier aspect de la liste (toutes les grandeurs sont comprises).

Fréquence (fj)	4000	600	320	600	300	300
Grandeur (jxM)	1M	2M	3M	4M	5M	6M
j =	1,	2,	3,	4,	5,	6.

1. Considérons j = 6:

Si, après avoir fait des comparaisons de coûts de C_6^p et de C_6^a , nous avons décidé de produire une unité de grandeur 6M, la liste de production ne se trouve pas affectée et l'unité de taille 6M reste la plus grande. Nous avons donc une décision du type (b).

2. Considérons j = 5.

Si nous avons décidé de fournir un assemblage d'une unité de 3M et d'une unité de 2M pour satisfaire la grandeur de 5M demandée, l'unité de grandeur 5M se trouve définitivement éliminée de la liste de production; de ce fait, des changements surviennent en ce qui concerne la fréquence de la demande des unités de 3M et de 2M. Nous avons donc une décision du type (a).

3. Reprenons l'exemple j = 6

Aspect 2 de la liste (l'unité 5M a été abandonnée)

Fréquence (fj)	4000	900	620	600	0	300
Grandeur (jxM)	1M	2M	3M	4M	5M	6M

Table 1. Exemple d'optimisation progressive des pièces composantes nécessaires pour un programme particulier d'exigences; les conséquences des décisions successives font l'objet d'une rétroaction qui modifie la liste originale de pièces composantes disponibles.

1^{er}. Aspect de la Liste.

Dimension (j):	1M	2M	3M	4M	5M	6M
Coût équipement T(j):	12000	4000	4000	4000	4000	4000
Fréquence f(j):	4000	600	320	600	300	300
Coût prod./unité C_j^p :	3.0	6.7	12.5	6.7	13.3	13.3

1) $j = 6$: dimension de 6M:

min. de	- produire l'unité de 6M:	C_j^p	=			13.3
	- assembler: (aucune unité de 5M ou 3M)					
	(1x4M) + (2x1M):	C_j^a	=	C_4^p	+ $2C_1^p$	+ $2(C^c)$
			=	6.7	+ $2(3.0)$	+ $2(2.0)$
	(1x4M) + (1x2M):		=	6.7	+ 8.0	+ $1(2.0)$
	(1x2M) + (4x1M):		=	6.7	+ $4(3.0)$	+ $4(2.0)$
	(3x2M):		=	$3(8.0)$	+ $2(2.0)$	= 28.0
	(6x1M):		=	$6(3.0)$	+ $5(2.0)$	= 28.0

Décision: maintenir l'unité de 6M.

2) $j = 5$: dimension de 5M:

min. de	- produire l'unité de 5M	C_j^p	=			13.3
	- assembler: (aucune unité de 3M)					
	(1x4M) + (1x1M):	C_j^a	=	6.7	+ 3.0	+ $1(2.0)$
	(2x2M) + (1x1M):		=	$2(6.7)$	+ 3.0	+ $2(2.0)$
	(1x2M) + (3x1M):		=	6.7	+ $3(3.0)$	+ $3(2.0)$
	(5x1M):		=			= 23.0

Décision: abandonner l'unité de 5M;
assembler (1 x 4M) + (1 x 1M).

2^{ème}. Aspect de la Liste.

Dimension (j):	1M	2M	3M	4M	5M	6M
Coût équipement T(j):	12000	4000	4000	4000		4000
Fréquence f(j):	4300	600	320	900	0	300
Coût prod./unité C_j^p :	2.8	6.7	12.5	4.4	-	13.3

3) $j = 6$: dimension de 6M:

min. de	- produire l'unité de 6M:	C_j^p	=			13.3
	- assembler:					
	(2x1M) + (1x4M):	C_j^a	=	$2(2.8)$	+ 4.4	+ $2(2.0)$
	(3x1M) + (1x3M):		=	$3(2.8)$	+ 12.5	= 29.5
	(4x1M) + (1x2M):		=	$4(2.8)$	+ 6.7	+ $4(2.0)$
	(5x1M):		=	$5(2.8)$	+ $5(2.0)$	= 26.8

Décision: maintenir l'unité de 6M.

4) $j = 5$: abandonnée;

5) $j = 4$: dimension de 4M:

min. de	- produire l'unité de 4M:	C_j^p	=			4.4
	- assembler: (aucune unité de 3M ou 2M)					
	(4x1M):	C_j^a	=	$4(2.8)$	+ $3(2.0)$	= 17.2

Décision: maintenir l'unité de 4M.

6) $j = 3$: dimension de 3M:

min. de	- produire l'unité de 3M:	C_j^p	=			12.5
	- assembler (1x2M) + (1x1M)	C_j^a	=	6.7	+ 2.8	+ $1(2.0)$
	(3x1M)		=	$3(2.8)$	+ $2(2.0)$	= 12.4

Décision: abandonner l'unité de 3M;
assembler (1 x 2M) + (1 x 1M).

3^{ème}. Aspect de la Liste.

Dimension (j):	1M	2M		4M		6M
Coût équipement T(j):	12000	4000		4000		4000
Fréquence f(j):	4620	920	0	900	0	300
Coût prod./unité C_j^p :	2.5	4.3	-	4.4	-	13.3

7) $j = 6$: dimension de 6M

min de.	- produire l'unité de 6M:	C_j^p	=					13.3
	- assembler (1x4M) + (1x2M):	C_j^a	=	6.7	+ 4.3	+ 1(2.0)	=	13.0
	(1x4M) + (2x1M):		=	6.7	+ 2(2.5)	+ 2(2.0)	=	15.7
	(3x2M):		=	3(4.3)		+ 2(2.0)	=	16.9
	(6x1M):		=	6(2.5)		+ 5(2.0)	=	25.0

Décision: abandonner l'unité de 6M;
assembler (1 x 4M) + (1 x 2M).

4^{ème}. Aspect de la Liste.

Dimension (j):	1M	2M	3M	4M	5M	6M
Coût équipement $T(j)$:	12000	4000		4000		
Fréquence $f(j)$:	4620	1220	0	1200	0	0
Coût prod./unité C_j^p :	2.5	3.2	-	3.3	-	-

8) $j = 6$: abandonnée;

9) $j = 5$: abandonnée;

10) $j = 4$: dimension de 4M:

min. de	- produire l'unité de 4M:	C_j^p	=					3.3
	- assembler: (2x2M):	C_j^a	=	2(3.2)	+ 1(2.0)			8.4
	(4x1M):		=	4(2.5)	+ 3(2.0)			16.0
	(1x2M) + (2x1M)		=	3.3	+ 2(2.5)	+ (2.0)		12.3

Décision: maintenir l'unité de 4M.

11) $j = 3$: abandonnée;

12) $j = 2$: dimension de 2M:

min. de	- produire l'unité de 2M:	C_j^p	=					4.3
	- assembler (2x1M)	C_j^a	=	2(2.5)		+ 1(2.0)	=	7.0

Décision: maintenir l'unité de 2M.

13) $j = 1$: cette unité doit être maintenue sur la liste.

Récapitulation: stratégie optimisée:

Coûts de production:

- produire:	1200 x 4M	@	3.3	=				3960
	1220 x 2M	@	3.2	=				4026
	4620 x 1M	@	2.5	=				12000

Coûts d'assemblage:

- assembler:	300 x 6M	:	(1x4M) + (1x2M)	@	2.0	=	300(2.0)	=	600
	300 x 5M	:	(1x4M) + (1x1M)	@	2.0	=	300(2.0)	=	600
	320 x 3M	:	(1x1M) + (1x2M)	@	2.0	=	320(2.0)	=	640

Coûts totaux: 21826

Comparaison avec la stratégie initiale du fabricant:

Coûts de production:

- produire:	1200 x 1M	@	1.0	=				12000
-------------	-----------	---	-----	---	--	--	--	-------

Coûts d'assemblage:

- assembler:	300 x 6M	@	2.0	=	300	x	5(2.0)	=	3000
	300 x 5M	@	2.0	=	300	x	4(2.0)	=	2400
	600 x 4M	@	2.0	=	600	x	3(2.0)	=	3600
	320 x 3M	@	2.0	=	320	x	2(2.0)	=	1280
	600 x 2M	@	2.0	=	600	x	1(2.0)	=	1200

23480

Coûts totaux:

Economie de: \$23 480 - \$21 826 = \$1 654 sur les coûts totaux des cloisons.

La même procédure est répétée, allant progressivement de 6M à 1M et éliminant de la liste de production initiale toutes les grandeurs qui pourraient fort bien être réalisées par des assemblages de plus petites unités. Puisque la meilleure alternative est toujours choisie en fonction du coût le plus bas, la procédure converge graduellement avec la décision la plus économique.

La prochaine étape propose une méthode pratique pour réaliser cette longue procédure.

L'Algorithme Général.

Le problème qui nous préoccupe devient de plus en plus complexe au fur et à mesure que les multiples du module de base augmentent. Les procédures permettant de résoudre ce problème impliquent des calculs répétitifs et ne peuvent être achevées qu'après avoir fait un très grand nombre de cycles. Heureusement cette procédure a une structure telle qu'elle peut être traitée assez facilement par un programme électronique.

Cette procédure est plus ou moins une récurrence itérative, accompagnée d'une étape conditionnelle. Un algorithme dynamique de cette procédure peut être défini de la façon suivante:

$$f_s(l) = \text{Minimum de } \begin{Bmatrix} [C_1^p + f_s(k)] \\ [C_1^a + f'_s(k)] \end{Bmatrix} \text{ pour } j = 1, k, \dots, 1.$$

Si $f_s(l)$ = Coût minimum lorsque la liste a un aspect S et la grandeur $j = l$ est considérée.

C_1^p = Coût de production d'une unité de grandeur (1 x M)

C_1^a = Coût de production pour fournir la grandeur (1 x M) à l'aide d'un assemblage de pièces plus petites.

$f'_s(k)$ = Coût de production minimum lorsque la liste présente l'aspect S' et que la grandeur suivante $j = k$ est considérée.

L'organigramme de ce problème est une simple boucle répétitive, réalisée par l'ordinateur autant de fois qu'il est nécessaire pour ramener l'index "j" au nombre 1. A ce moment alors, l'ordinateur a réalisé son dernier calcul; la liste produite définit la production optimale (figure 3).

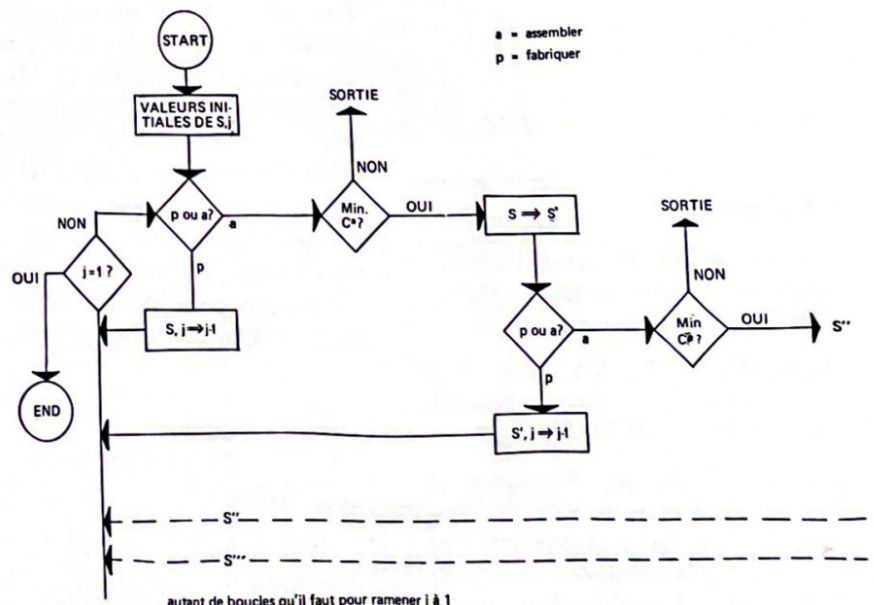


Figure 3. Procédure à récurrences itératives permettant d'optimiser les combinaisons des pièces composantes en fonction des coûts de production et d'assemblage.

Des contraintes rationnelles peuvent également être définies pour réduire l'ensemble des calculs. Par exemple, certains arrangements combinatoires sont clairement inadéquats (1) et certains assemblages peuvent être immédiatement éliminés (2):

(1) Négliger les combinaisons des plus petites unités dont C_j^p est déjà plus grand que C_j^p envisagé.

(2) Noter que chaque combinaison présente un nombre maximum (n) d'unités qui doit être déterminé de la façon suivante:

$$(n - 1) \times C^c < C_j^p \implies n < \frac{C_j^p}{C^c} + 1$$

L'observation de ces règles peut alléger considérablement l'ensemble des calculs. Un diagramme comparable à celui de la figure 2 peut être préparé par des évaluations manuelles, en rejetant toutes les combinaisons qui ne respectent pas ces contraintes. Souvent un simple cas peut être réduit à une analyse qui — quoiqu'assez importante — peut être réalisée sans l'aide de l'ordinateur.

Les Contraintes Pratiques.

Jusqu'à présent, nous avons traité le problème de la gestion associé au design modulaire comme un sujet théorique et nous avons proposé une procédure pour découvrir une solution optimale. Cependant des programmes de construction réellement modulaire présenteront certaines particularités dont on doit tenir compte. Tout d'abord, tous les panneaux d'une même grandeur ne sont pas nécessairement identiques puisque différentes baies et différents appareils devront être incorporés; ce problème affecte les divers arrangements combinatoires. Deuxièmement, les grandeurs des unités peuvent être limitées par des restrictions de transport. Enfin troisièmement des contraintes technologiques (problèmes de stabilité, planification des travaux de chantier) peuvent affecter et limiter les arrangements combinatoires.

Application au Design.

Les exemples que nous avons donnés, montrent la procédure itérative de l'ordinateur. Un programme de construction important entraînerait une plus grande complexité parce que les possibilités combinatoires augmenteraient excessivement, surtout lorsque les dimensions sont plus importantes. L'étude de ces possibilités peut être faite d'une façon systématique par des techniques de division intégrale à l'aide de l'ordinateur. Outre cette difficulté, différents types de panneaux — malgré leurs dimensions identiques — doivent être combinés pour réaliser un bâtiment. Une étude exhaustive de l'analyse et de l'optimisation doit être faite pour chaque programme. Cependant, le traitement électronique est maintenant accepté comme un outil de gestion et il a beaucoup amélioré le contrôle qu'on souhaite avoir sur les systèmes les plus complexes.

Bibliographie.

Emery, F. E., *Systems Thinking*, Harmondworth, Penguin Books, 1968, 498 pages.

Starr, Martin K., *Management of Production*, Harmondworth, Penguin Books, 1970, 398 pages.

Wagner, Harvey M., *Principles of Operations Research with Applications to Managerial Decisions*, Englewood Cliffs, Prentice Hall, 1969, 937 pages.