

ETUDE PAR SIMULATION DE LA SUPPRESSION DE L'IMPACT DES ARRETS LORS DU DEMENAGEMENT D'UNE LIGNE DE PRODUCTION MANUFACTURIERE

Patrick Pujo*

Résumé. - Pour une entreprise, le déménagement de tout ou partie de ses installations de production représente un projet industriel majeur nécessitant l'arrêt de la production et comportant à ce titre un certain nombre de risques économiques. Nous proposons ici une méthodologie de déménagement d'une ligne de production manufacturière permettant de ne jamais cesser de produire. Il s'agit d'anticiper les conséquences d'un arrêt programmé pour en compenser les effets. Le déménagement devient alors quasiment transparent pour la clientèle. Nous poserons tout d'abord les principes fondamentaux de la méthode, puis nous montrerons comment la simulation permet d'en ajuster les paramètres et de choisir la meilleure organisation du déménagement.

Mots-clés : déménagement, ligne de production, simulation, gestion des stocks, pilotage de la production.

1. Introduction

Il existe des entreprises qui hésitent à déménager leur site de production, malgré des locaux exigus et inadaptés par exemple, car il s'agit d'un projet industriel délicat à réaliser, qui peut mener une entreprise à de nombreux déboires. Cela est particulièrement le cas lorsqu'il s'agit d'une PME qui ne dispose que de très peu de solutions lorsqu'elle doit continuer à exploiter le même parc de machines. La solution la plus simple consiste à exploiter le créneau des congés annuels pour effectuer le déménagement. Le cas échéant, il est possible de fermer l'entreprise le temps de l'opération.

* Maître de Conférences à l'Ecole Polytechnique Universitaire de Marseille.

De telles stratégies ne sont pas envisageables lorsqu'une entreprise travaillant à la commande doit son existence à sa présence permanente sur le marché et à sa capacité de réactivité. Ces deux caractéristiques nous ont conduit à élaborer une méthodologie d'organisation du déménagement du système de production sans interrompre le flux des produits transformés. Puis, nous l'avons validée à travers le cas d'un système de production difficile à traiter, du fait du synchronisme de l'enchaînement des tâches : celui d'une ligne de fabrication à la commande de produits manufacturiers en « flow shop ».

Cette problématique, assez banale *a priori*, n'est jamais abordée par la littérature de référence en organisation de la production, tant sur le plan national (Courtois *et al.*, 1989), (Baglin *et al.*, 1996) qu'international (Monks, 1985), (Aquilano *et al.*, 1995), (Heizer *et al.*, 1999).

Même les ouvrages spécialisés dans la conception de systèmes de production, tels que (Muther, 1969), concernant la méthodologie d'aménagements de société SLP, ou (Tompkins *et al.*, 1984), généralisant la problématique et parcourant l'ensemble des solutions technologiques, ne traitent pas de l'organisation d'un déménagement avec de telles contraintes, mais simplement de l'aménagement initial d'une installation industrielle.

Quant aux études spécifiques sur l'aménagement des lignes de production, elles se réduisent généralement à l'optimisation de l'équilibrage des charges entre les différents postes (Moddie, 1981).

C'est donc dans ce contexte que nous proposons ici une solution originale de déménagement progressif des ressources de l'ancien site vers le nouveau, en segmentant l'ensemble de la ligne en différents sous-ensembles et en constituant des stocks-tampons à chaque déménagement élémentaire d'un sous-ensemble.

Après modélisation du problème du déménagement élémentaire d'un poste de la ligne et projection de ces résultats sur le déménagement de la ligne complète, différentes simulations correspondant à diverses stratégies d'organisation du déménagement de l'ensemble de la ligne vont être simulées à partir du cas industriel d'une ligne de fabrication à la demande de circuits imprimés.

2. Déménagement élémentaire d'un élément de la ligne

2.1 Présentation générale de la problématique d'un déménagement élémentaire

Pour aborder une ligne de production complète, il faut auparavant disposer d'un modèle élémentaire de comportement du système de production pendant le déménagement : nous allons décrire quelques éléments théoriques obtenus à partir du cas simple d'un sous-ensemble constitué d'une seule machine.

Comme notre principe de déménagement repose sur une succession de petits déménagements enchaînés, (machine par machine ou par groupes de machines consécutives), nous trouvons dans toutes les étapes du projet la même ligne de production, située à cheval sur

deux sites de production, l'ancien et le nouveau (cf. figure 1). Les deux exceptions concernent le début, où aucune machine n'a encore déménagé, et la fin, où toutes les machines sont toutes en place dans le nouveau site. Dans tous les états intermédiaires stables, c'est-à-dire entre deux déménagements successifs de deux sous-ensembles, la liaison logistique entre les deux sites se fait par l'interface d'un stock de transit et de découplage (ici, le stock S3). Les produits doivent être acheminés de l'ancien site vers le nouveau, ce qui introduit un délai supplémentaire, mais ne remet pas en cause la logique de gestion de ce système de production. C'est seulement lors du déménagement de la machine M2 que le système de production est modifié, du fait de l'absence temporaire de cette machine.

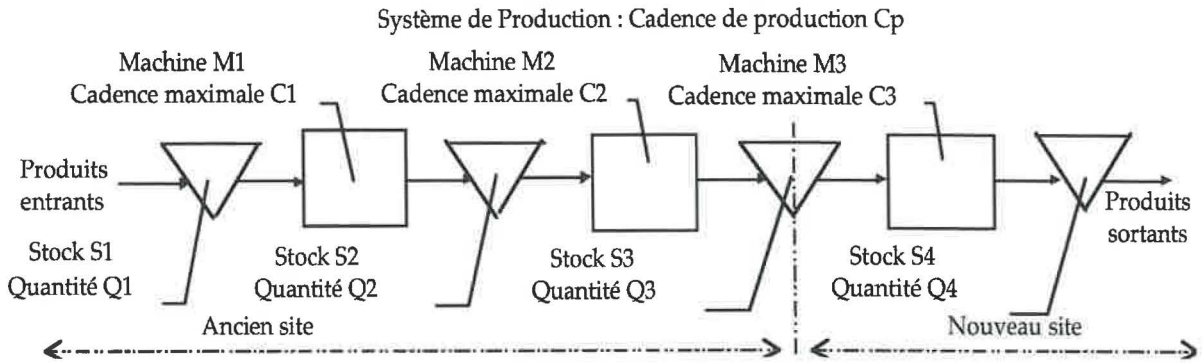


Figure 1 : Modèle d'une ligne de production

En effet, la machine M2 est en arrêt pendant son déménagement (cf. figure 2), et il existe alors deux lignes de production, l'une en aval, sur le nouveau site, et l'autre en amont, sur l'ancien.

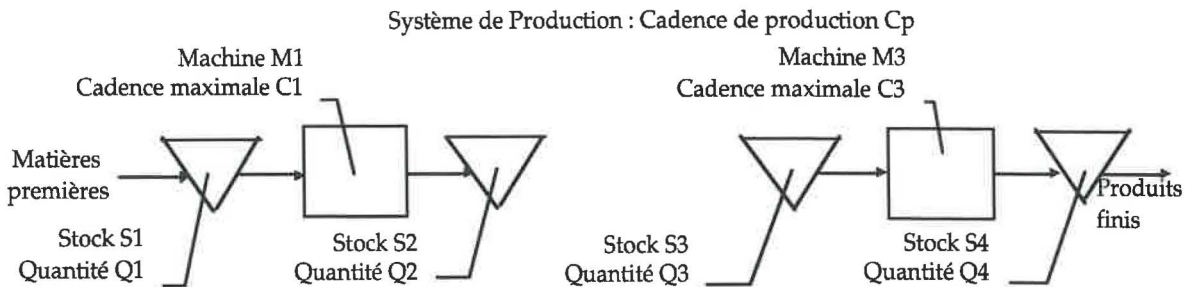


Figure 2 : Modèle d'une ligne de production à flux interrompu

Pour continuer à produire, le niveau du stock de découplage S3 doit être suffisamment élevé pour pouvoir alimenter la machine suivante M3 durant toute la durée d'indisponibilité de la machine M2, c'est-à-dire le temps de son déménagement (t_{D2}). Le stock S2 va, quant à lui, se charger progressivement, car il n'y a plus de consommation : M2 est indisponible pour cause de déménagement.

Toute la problématique du maintien en production sans discontinuité de cet ensemble tient donc dans la maîtrise des stocks intermédiaires S3 et S2. Toutefois, ce pilotage ne demande pas des mécanismes de décision trop complexes, mais simplement l'utilisation de modèles classiques de constitution et d'écoulement d'un stock (Zermatti, 1996). C'est ce que nous allons préciser.

2.2 Etude de la partie aval de la chaîne de production

Pour ne pas arrêter le flux de produits finis, il suffit que la machine M3 continue à produire durant le déménagement de M2, c'est-à-dire que le stock S3 contienne une quantité de produits suffisante pour pouvoir alimenter M3 à la cadence C_p pendant toute la durée du déménagement de M2. Cette quantité de réserve, définie par $Q_3 = C_p * t_{D2}$, est constituée en une

durée $t = \frac{C_p}{C_{am} - C_p} * t_{D2}$, en augmentant la cadence amont jusqu'à la valeur C_{am} , ce qu'il est possible de faire tout en produisant normalement.

2.3 Etude de la partie amont de la chaîne de production

Pendant le déménagement de M2, la partie de la chaîne en amont peut continuer de produire normalement, créant ainsi un stock en S2. Le volume de ce stock ainsi créé, défini par $Q_2 = C_p * t_{D2}$, sera absorbé en un temps t (après le déménagement de M2) défini par

$$t = \frac{C_p}{C_{AV} - C_p} * t_{D2}, \text{ où } C_{AV} \text{ est la cadence maximale de l'aval (M2 incluse).}$$

Si M2 travaille déjà en situation normale d'exploitation à cadence maximale pour pouvoir assurer la cadence globale de la ligne de production, il est préférable *a priori* d'arrêter toute la production lors de ce déménagement élémentaire : ceci permet d'éviter la création de stocks indésirables, car ne pouvant plus être résorbés par la suite.

2.4 Conclusion : déménagement élémentaire

Nous avons vu dans ce paragraphe que l'arrêt programmé d'une ressource dans une ligne de production manufacturière, pour cause de déménagement ou autre, peut être parfaitement anticipé par la création d'un stock temporaire de substitution. De cette manière, nous pouvons envisager la suppression de l'impact de cet arrêt sur le fonctionnement global de la ligne de production. Nous allons développer l'utilisation de ce résultat pour l'appliquer au déménagement de la totalité d'une ligne de production, et ceci sans interrompre la production, c'est-à-dire en maintenant un flux de sortie de produits pour toute la durée de l'opération.

3. Déménagement progressif d'une ligne de production

3.1 Principes généraux du déménagement d'une ligne de production

Afin d'exploiter au mieux les caractéristiques des situations précédemment décrites, nous proposons une organisation fondée sur les deux principes suivants :

- création du stock aval nécessaire pendant le déménagement de la machine précédente,
- absorption du stock amont créé pendant le déménagement de la machine suivante.

En effet, pour ne pas arrêter la chaîne de production, il faut prévoir un stock en aval de la machine à déménager, afin que l'aval de la chaîne continue à produire.

Ensuite, le déménagement d'une machine provoque la création d'un stock de produits semi-finis en amont de cette machine (si la partie amont continue de produire).

Enfin, le déménagement d'une machine provoque la disparition du stock de produits semi-finis en aval de cette machine (si la partie aval continue de produire).

Ceci est illustré à la figure 3, où sont représentés l'évolution des stocks S1, S2 et S3, lors des deux déménagements successifs de M2, puis de M1.

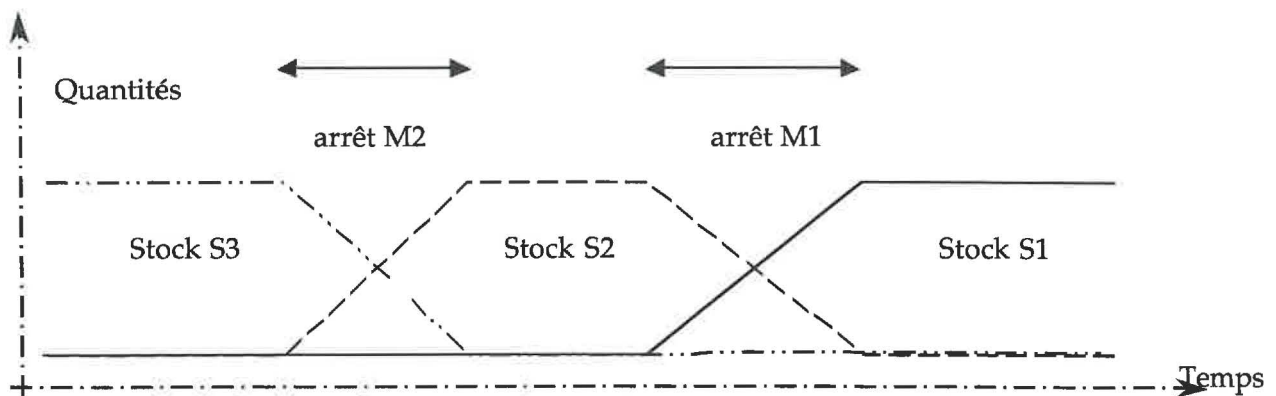


Figure 3 : Evolution des stocks de découplage lors d'un déménagement élémentaire

Ainsi, lors du déménagement d'une machine, le stock en aval disparaît alors qu'un stock en amont se crée : le stock apparent est déplacé de l'aval à l'amont de la machine (cf. figure 4).

Nous pouvons utiliser ce déplacement du stock d'aval en amont de la machine déménagée pour ne pas avoir à recréer un nouveau stock en prévision du déménagement suivant : nous proposons de commencer le déménagement de la chaîne de production par la dernière machine. Lors de son déménagement, un stock se crée en amont, ce qui va permettre de déménager l'avant-dernière machine... et ainsi de suite.

Cette solution consistant à déménager le système de production en commençant par la fin permet de limiter la durée du déménagement total de la chaîne : nous allons créer un seul stock tampon et le déplacer en l'ajustant en fonction des temps respectifs de déménagement des machines successivement rencontrées.

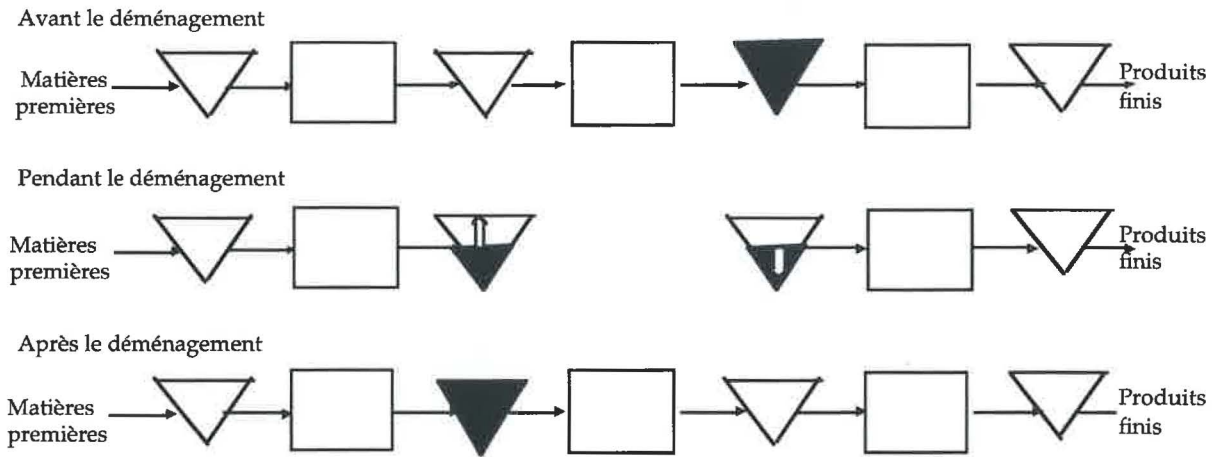


Figure 4 : Principe d'un déménagement élémentaire

3.2 Méthodologie du déménagement d'une chaîne de production

Les principales étapes nécessaires pour déménager une ligne de production sont :

1. le déménagement de la dernière machine (pendant ce temps-là, le stock de découplage se forme en amont de cette machine),
2. l'adaptation du stock déplacé pour la machine précédente (le stock doit pouvoir alimenter la partie aval de la chaîne de production durant tout le déménagement de la machine, c'est-à-dire que la quantité de produits stockés va dépendre du temps de déménagement de la machine),
3. le déménagement de la machine précédente,
4. retour au deuxième item jusqu'au déménagement de la première machine de la chaîne de production,
5. la reprise de la consommation sur le stock de matières premières (interrompu lors du déménagement de la première machine).

Le déménagement de chaque machine (ou sous-ensemble de machines) doit faire l'objet d'une étude particulière. Si la partie amont de la chaîne de production produit à la même cadence que la partie aval, le stock obtenu en amont aura la même quantité de produits que celle qu'avait le stock en aval. Mais ce n'est pas forcément le cas, et il faut paramétrer chaque déménagement. Déménager une machine signifie son arrêt, son démontage, sa maintenance et son transport, son remontage, sa calibration et sa requalification.

L'ensemble de ces activités constitue le temps t_D de déménagement. La cadence de production nominale C_p et la cadence maximale de production C_{av} sont les deux autres paramètres fondamentaux.

3.3 *Adaptation du stock pour la machine précédente*

3.3.1 **Enoncé de la problématique d'adaptation du stock de découplage**

La quantité de produits stockés en aval de la machine à déménager doit être définie en fonction de son temps de déménagement, d'où un ajustement de la cadence amont :

- soit le temps de déménagement de la machine sera plus long que le précédent : il faudra alors augmenter le stock et donc la cadence de production amont ;
- soit la machine sera déménagée plus rapidement, auquel cas il va falloir diminuer le stock (pas de création de stocks d'encours non absorbables en cadence normale) ; d'où une diminution de la cadence de production amont durant le déménagement.

Afin d'établir les relations mathématiques permettant de connaître et de gérer les stocks en vue de déménager une machine, nous allons reprendre le cas théorique au moment où M2 est déjà déménagée. A ce moment-là, les machines M2 et M3 sont opérationnelles sur le nouveau site, le stock créé en S2 (Stock en amont de M2) n'a pas été absorbé et contient une quantité de produits égale à $Q_2 = C_p * t_{D2}$. Les stocks S3 et S1 sont revenus à leur capacité normale. Pour le déménagement de M1, il va falloir continuer la production, ce qui implique que S2 devra avoir en stock une quantité de produits égale à $Q'_2 = C_p * t_{D1}$. Donc, il va falloir produire, en plus de la production normale, $Q'_2 - Q_2$ produits, c'est-à-dire $C_p * (t_{D1} - t_{D2})$. Le temps de production du stock nécessaire au déménagement de M1 sera donc égal à $t = \frac{C_p}{C_1 - C_p} * (t_{D1} - t_{D2})$.

3.3.2 **Adaptation du temps de déménagement**

Dans le cas où t_{D2} est inférieur à t_{D1} , la quantité de stock nécessaire au déménagement de M1 (Q'_2) est supérieure à la quantité de stock laissée par le déménagement de M2 (Q_2). Il faut donc produire des encours supplémentaires, puisqu'il y a augmentation de la durée du déménagement.

Deux stratégies sont possibles. Tout d'abord produire après le déménagement de M2 (dans ce cas, le temps de production est défini par la relation énoncée ci-dessus), ou alors produire pendant le déménagement de M2, grâce à une augmentation de la cadence de M1. Dans ce dernier sous-cas, si C est la capacité de production nécessaire pour produire cette quantité en un temps t_{D2} (c'est-à-dire pour produire les produits nécessaires au fonctionnement normal ainsi que ceux qui sont nécessaires à la préparation du stock), nous obtenons alors la relation

$(C - C_p) * t_{D2} = C_p * (t_{D1} - t_{D2})$. Ainsi C est défini par la relation $C = C_p * \left(\frac{t_{D1} - t_{D2}}{t_{D2}} + 1 \right)$. Si la cadence nécessaire pour préparer le stock pour le déménagement de M1 pendant celui de M2 (C) est supérieure à la cadence maximale de M1 (C1), alors il restera à produire, après le déménagement de M2, la quantité $Q'_2 - (C_1 - C_p) * t_{D2} = (C_1 - C_p) * t$. Il faudra donc produire à cadence maximale pendant une durée égale à $t = \frac{C_p}{C_1 - C_p} * t_{D1} - t_{D2}$.

Dans le cas où t_{D2} est supérieur à t_{D1} , il y a diminution du temps de déménagement et le stock de découplage est excédentaire. Les solutions possibles consistent soit à arrêter la production pendant une durée égale à $t = \frac{C_p}{C_1 - C_p} * (t_{D2} - t_{D1})$, soit à diminuer la production de M1 pendant le déménagement de M2 (la nouvelle cadence de M1 sera alors $C = C_p * \left(\frac{t_{D2} - t_{D1}}{t_{D2}} + 1 \right)$).

Dans tous les cas de figure, il est plus facile de travailler avec des durées de déménagement relativement homogènes, car le pilotage de l'ajustement du stock de découplage est délicat.

3.4 Cas d'éléments de la ligne de production avec redondance de ressources

Dans le cas où une fonction de production serait répartie sur n machines travaillant en parallèle (exemple pour deux machines en figure 5), nous avons deux alternatives. Si le stock créé par le déménagement de M3 est suffisant pour déménager les n machines en parallèle (c'est-à-dire si le temps de déménagement des n machines n'est pas trop important par rapport à celui de M3), alors nous considérerons les n machines comme une seule et elles seront déménagées simultanément. Si tel n'est pas le cas, il peut être avantageux de déménager les machines l'une après l'autre ou par petits groupes.

Dans ce dernier cas, la production n'est pas complètement coupée : on continue de produire, même si la cadence de production est diminuée ; le stock tampon nécessaire pour compenser ce déménagement partiel ne concernera qu'une partie de la production, il sera donc moins important (les modèles mathématiques à établir sont tout à fait équivalents aux précédents).

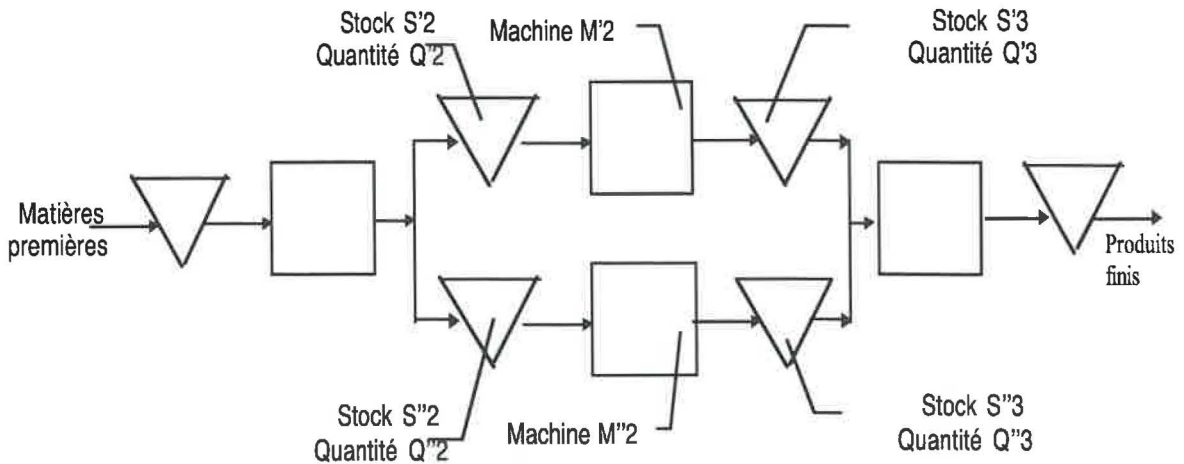


Figure 5 : modèle d'une étape de production répartie sur plusieurs ressources

4. Transfert des résultats à un cas industriel de déménagement

Cette étude a été réalisée pour une P.M.E. de production à la commande de circuits imprimés, ayant une niche de marché fondée sur la réactivité face aux besoins de grands donneurs d'ordres. Là où la production de masse implique des délais de livraison largement supérieurs au mois, cette entreprise propose pour des petites ou moyennes séries un délai moyen inférieur à deux semaines, avec possibilité en cas d'urgence de produire en moins de cinq jours. Mais l'atout lié à ce service implique l'obligation d'être toujours présent sur le marché. Le déménagement envisagé ne doit donc en aucun cas entraîner une cessation, même temporaire, de l'activité de production.

4.1 Présentation du système de production de test de la méthodologie

La production se fait sur une ligne de production de 24 postes, automatisés ou non, le tout réparti en 6 ateliers spécialisés. Quelques postes comportent plusieurs machines en parallèle. Les transferts entre machines sont principalement manuels, les circuits imprimés étant temporairement stockés verticalement sans se toucher sur des palettes. Certains de ces ateliers sont caractérisés par des conditions environnementales particulières. Ainsi, les ateliers de chimie et de gravure, dans lesquels de nombreuses réactions chimiques dégagent des effluents malodorants, doivent faire l'objet d'extraction et de traitement de l'air, alors que la salle jaune, dans laquelle des produits photosensibles non révélés sont utilisés, nécessite une lumière polarisée (en jaune !) et un certain niveau de filtration des poussières. La figure 6 donne une idée de l'enchaînement des opérations de production qui permettent de transformer une plaque d'époxy recouverte de cuivre en un circuit imprimé double face.

Le déménagement par machines élémentaires est ici inadapté, car les différentes machines sont trop nombreuses et trop hétérogènes, dans le sens où certaines sont extrêmement simples à déménager alors que d'autres nécessitent un protocole assez sophistiqué.

4.2 Etude par simulation de différentes stratégies de regroupement de machines

En conséquence, nous avons déterminé différents regroupements possibles de machines afin de constituer des sous-ensembles à déménager se caractérisant par des temps de déménagement sensiblement homogènes et par des variations du stock tampon les plus faibles possible.

La plus petite quantité du stock tampon que nous pourrions obtenir sera caractérisée par le temps de déménagement de la machine la plus délicate à déménager. Ainsi, six stratégies de déménagement ont été plus finement étudiées, et les décompositions simplistes par machine ou par atelier se sont avérées inadéquates. Nous présentons les trois meilleures solutions au tableau 1. Nous avons commencé par regrouper des machines de divers ateliers (solution A). Puis, nous avons segmenté différents ateliers, dont le plus long (solution B), afin d'optimiser les variations du stock tampon. Enfin, nous avons exploité le parallélisme interne de l'atelier initial, profitant ainsi du maintien en production de certaines machines pendant le déménagement des autres, pour minimiser l'importance du stock tampon moyen (solution C).

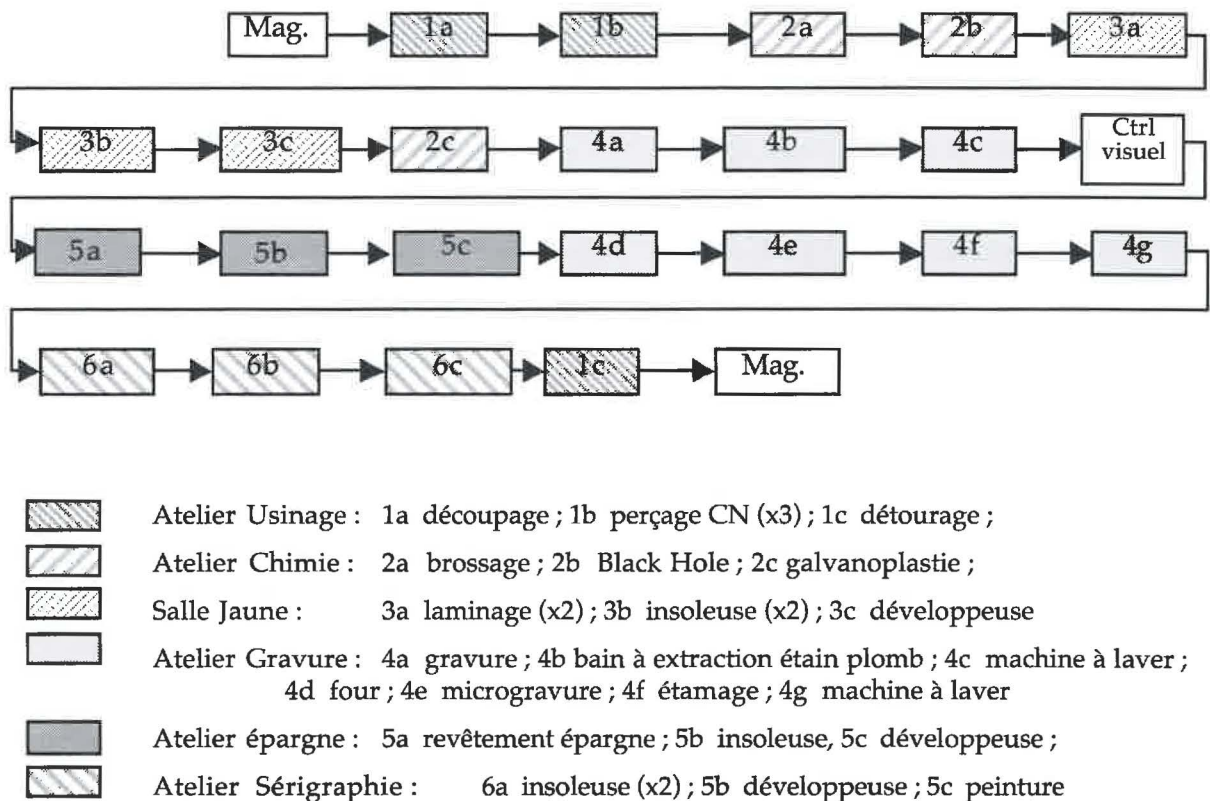


Figure 6 : vue schématique de la ligne de production

Pour tester ces solutions, une modélisation fine du système de production et de ses flux a été nécessaire (Claver *et al.*, 1996). Elle a nécessité une enquête de terrain pour relever les caractéristiques exactes des machines, tant sur le plan des performances de production que sur celui de l'aptitude au déménagement. Parmi les données les plus stratégiques pour une bonne

mise en œuvre de la méthode se trouvent les durées de transfert des machines, qui sont délicates à estimer. Ces durées correspondent à la somme du temps de démontage, du temps de transport, du temps de remontage et du temps de requalification de l'équipement. Comme chaque étape de déménagement concerne tout un groupe de machines, il a fallu à chaque fois rechercher l'ordonnancement de ces tâches élémentaires qui en minimisait la durée. L'entreprise ayant par le passé réimplanté plusieurs fois ses machines dans ses anciens locaux, ces informations ont pu être facilement collectées par enquête auprès du personnel, et se sont révélées ultérieurement assez fiables.

| Solution | Description de la solution | Nb de blocs | Durée (semaine) |
|----------|--|-------------|-----------------|
| A | 4 blocs issus de divers regroupements : (6, 1c) puis (4,5) puis (2,3) puis (1(ab)) | 4 | 5,5 |
| B | Idem A, mais séparation des ateliers (4) & (5), puis fractionnement de 4 : (4(defg)) puis (4(abc)) | 6 | 7,5 |
| C | Idem B + atelier perçage décomposé en 3 machines parallèles : (1b1 // 1b2 // 1b3) | 9 | 11,5 |

Tableau 1 : Description des propositions de solutions A, B et C.

Ce modèle a été ensuite implémenté sous la forme d'un modèle de simulation dans un logiciel de simulation à événements discrets (Cadence, de Synquest). La technique de simulation retenue a été relativement simple. La ligne dans sa configuration normale a été modélisée selon une approche par activités, chaque activité correspondant à une machine. Au total, une trentaine d'activités ont été définies et paramétrées pour supporter le passage d'une production type représentant plus de 80 % des cas de gamme type. La durée totale de simulation débutait dans chaque cas une semaine avant le début du déménagement, afin de préparer le stock tampon, et se terminait une semaine après la fin, une fois la stabilisation des flux atteinte. La simulation d'une étape de déménagement (concernant donc un groupe de machines) a été obtenue par le mécanisme suivant :

- inhibition de l'entrée de nouveaux produits dans le groupe de machines à déménager (le stock en amont commence à se créer, pendant que le groupe de machines à déménager se vide petit à petit) ;
- à l'instant de la sortie du dernier encours de ce groupe, nous commençons à décompter le temps de son déménagement ;
- à la fin de ce temps, le blocage en entrée des produits est supprimé et les produits recommencent à circuler dans le groupe de machines qui vient d'être déménagé.

4.2.1 Présentation des résultats de simulation

Pour chaque stratégie de regroupement, la simulation complète du déménagement a permis de déterminer l'évolution du flux de production et celle des stocks d'encours. Nous ne présenterons ici que les résultats de la solution C, dont les graphiques sont donnés en figure 7. Dans cette solution, la moyenne des productions hebdomadaires s'élève à 336 m², soit environ 67 m² par jour, ce qui représente la valeur moyenne du volume habituel de production de l'entreprise. Le premier pic sur la courbe de produits finis correspond à la création du stock tampon. Ce stock est créé par un week-end de travail supplémentaire, dont nous observons l'encours au niveau de la gravure la semaine précédant le début du déménagement. Nous observons ensuite la propagation du stock tampon, qui parcourt la ligne de production de l'aval vers l'amont (détourage, gravure..., puis galvanoplastie, les autres encours n'ayant pas été représentés) en s'atténuant peu à peu.

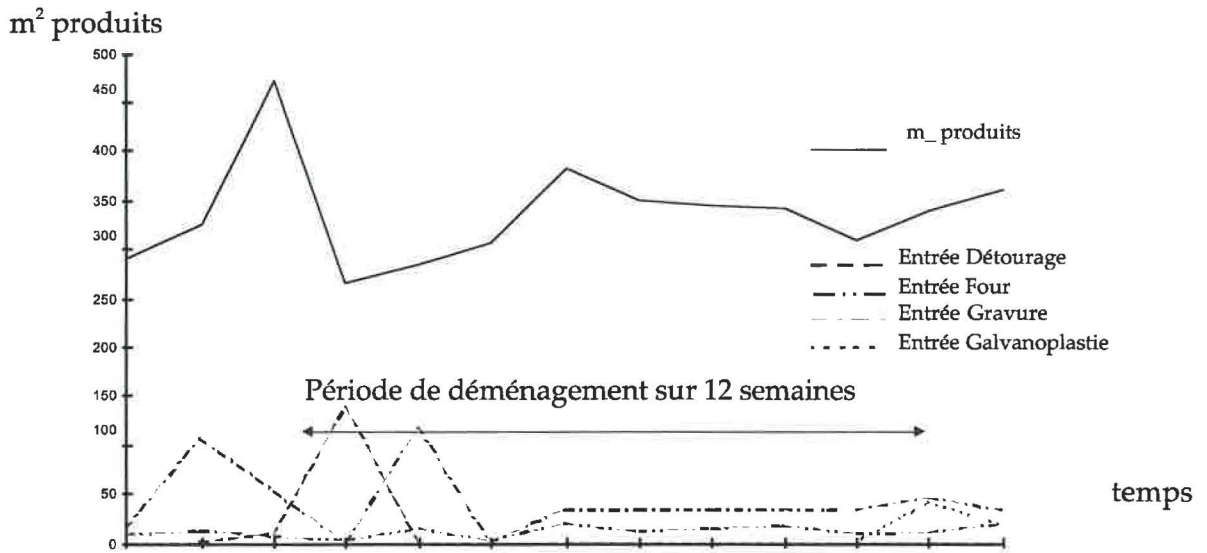


Figure 7 : Simulation des stocks d'encours et des quantités produites

Le second pic de production de produits finis, en semaine 6, correspond à un rattrapage d'une accumulation cyclique en entrée de l'atelier de sérigraphie, ce dernier ayant des périodes de maintenance programmée cyclique.

Par ailleurs, nous constatons que les valeurs des stocks d'encours, hors période de déménagement, sont extrêmement stables.

4.2.2 Analyse comparative selon les stratégies de regroupement de machines

Nous avons obtenu différentes visualisations des résultats obtenus avec chacune de ces stratégies, tels que par exemple les deux critères de performance suivants : la durée du déménagement et le volume d'encours. Ces deux critères n'ont évidemment pas la même signification.

L'importance du stock tampon moyen pourrait s'interpréter dans un contexte purement économique. Mais il représente surtout le critère de service à la clientèle : plus le stock tampon sera faible, moins les dates de livraison aux clients seront repoussées. La figure 8 permet une évaluation comparative entre les solutions A, B et C.

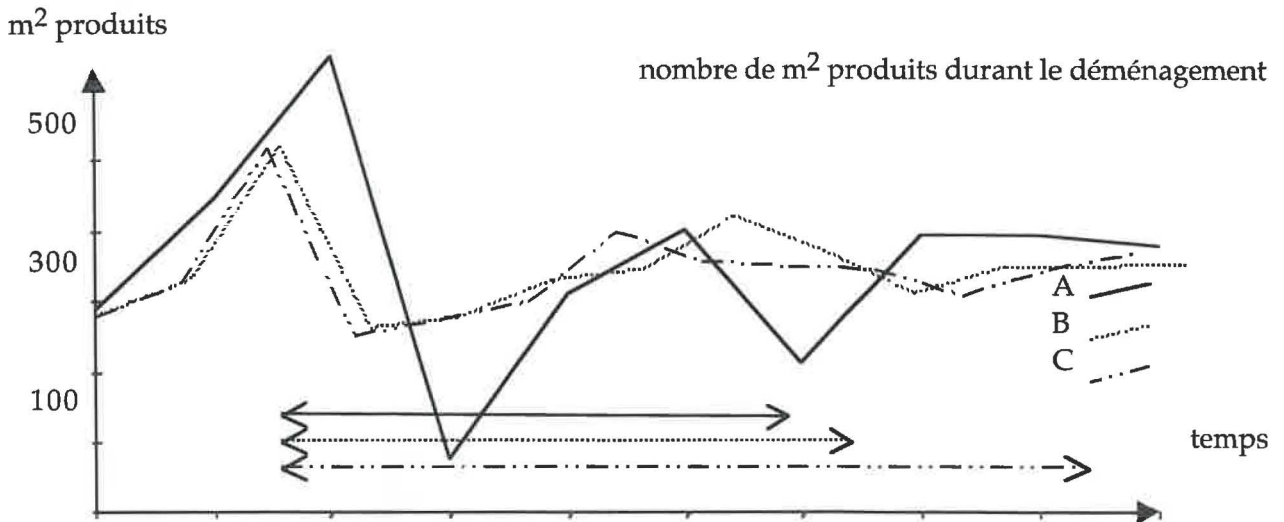


Figure 8 : Résultats des simulations des solutions A, B et C.

D'autres critères peuvent être mis en évidence, comme la régularité qui est le signe d'un pilotage de l'opération plus aisé, car moins sensible à de petites perturbations.

Nous avons construit ces indicateurs sur la base de ratios et de métriques, afin d'obtenir des éléments tangibles de comparaison. Ainsi, pour quantifier l'indicateur de flexibilité, nous avons testé sur chaque stratégie plusieurs jeux de données. Si les résultats obtenus restent homogènes, c'est le signe d'une excellente robustesse de la solution de déménagement face aux sollicitations forcément contingentes d'un planning de production à la demande, comme c'est le cas ici. Par ailleurs, l'absence de rupture de production sur le flux de produits finis et le délai moyen de retard des livraisons permettent de construire un indicateur de régularité.

| Solution | Stocks totaux créés (en m ²) | Indicateur de flexibilité | Régularité des encours | Régularité des livraisons |
|----------|--|---------------------------|------------------------|---------------------------|
| A | 1128 | * | ** | * |
| B | 987 | ** | **** | ** |
| C | 611 | **** | **** | *** |

Tableau 2 : Description des résultats des solutions A, B et C.

Certains critères doivent être examinés avec précaution. Par exemple, l'allongement de la durée du déménagement, qui maintient l'entreprise plus longtemps dans une situation transitoire, est *a priori* néfaste. Or, force est de constater qu'un déménagement avec plus d'étapes a comme avantage la réduction du volume de ressources à déménager à chaque étape. Ceci est ici important, car l'entreprise souhaite utiliser son propre personnel pour déménager et ne recourir qu'au minimum à de la main-d'œuvre extérieure. D'autres données ont été obtenues grâce à la simulation, tels que l'accroissement du parcours physique suivi par les produits (certaines stratégies impliquaient des allers-retours entre les deux sites), les coûts de transport des produits encourus, les modifications de cadence machines... La figure 9 montre un de ces critères, l'accroissement des durées de passage des produits sur la ligne de production selon les différentes solutions. Ce critère est fondamental, vu les caractéristiques de réactivité de l'entreprise, et nous pouvons constater que certaines solutions, par exemple la solution δ (non explicitement décrite ici) peuvent être extrêmement préjudiciables.

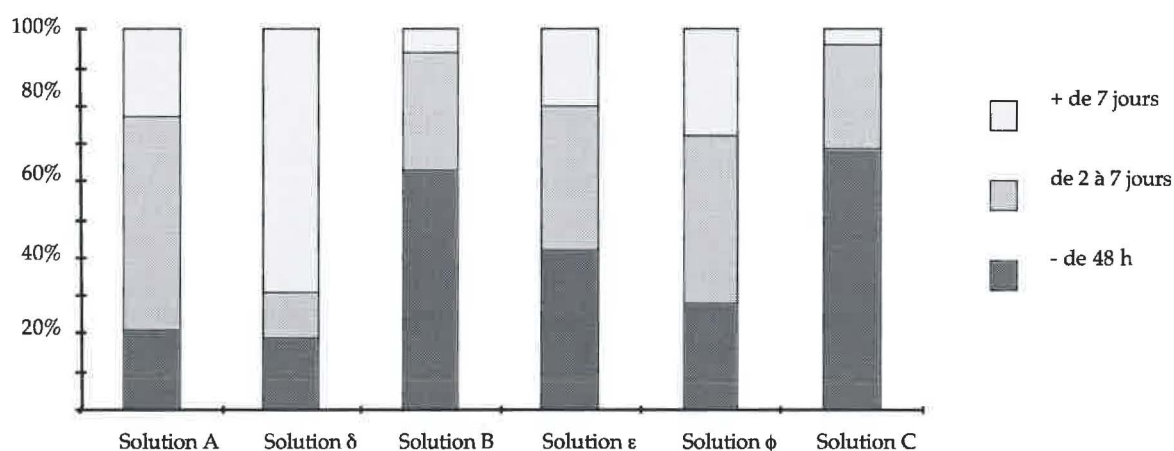


Figure 9 : Comparaison de l'accroissement des durées de passage pour les différentes solutions.

C'est un jugement global sur l'ensemble de ces critères, tous obtenus par simulation et synthétisés sous forme d'indicateurs, qui, allié à une étude économique (gestion des coûts prévisionnels), permet de juger de l'aptitude d'une stratégie donnée de déménagement à être efficace, c'est-à-dire à laisser une certaine latitude (ou flexibilité) dans la gestion du projet tout en permettant de réaliser les objectifs d'un déménagement transparent pour la clientèle. En définitive, c'est la solution C qui s'est avérée être la plus performante. Cette solution a donc servi de fil conducteur à l'entreprise pour l'organisation de son projet de déménagement. Toutefois, un certain nombre de faits nouveaux en ont perturbé le scénario initial. Nous ne citerons par exemple que le cas du renouvellement partiel du parc machine : certaines machines neuves ayant été achetées pour l'occasion et ayant été directement livrées sur le nouveau site, nous avons pu observer quelques perturbations dans la propagation du stock tampon.

5. Conclusion

Nous avons présenté dans cet article une classe de problèmes industriels rarement abordée sur le plan scientifique. Face à une apparente simplicité du problème (nous avons constaté que les modèles mathématiques étaient aisés à obtenir), nous constatons que de mauvais choix peuvent avoir des conséquences importantes. En réalité, la difficulté provient essentiellement d'une part de la complexité du système de production (hétérogénéité des machines) et d'autre part du caractère variable des commandes client. Dans ce contexte, nous avons établi une méthodologie permettant l'organiser l'opération et nous avons pu vérifier (Thiel, 1993) que l'apport de la simulation à ce niveau de décision est fondamental : il permet de résorber la complexité quantitative et d'avoir une vision stochastique des comportements. Il s'agit là d'une aide importante à la préparation et à la conduite d'un projet de cette ampleur, même si un modèle ne peut pas prendre en compte les multiples aspects et aléas qui apparaissent lors du déménagement réel.

6. Bibliographie

- Aquilano N.J., Chase R.B., Davis M.M., *The fundamentals of operations management*, 2nd ed., Irwin 1995
- Baglin G., Bruel O., Garreau A., Greif M., Van Delft C., *Management industriel et logistique*, 2e ed., Economica 1996
- Claver J.F., Gélinaud J., Pitt D., *Gestion de flux en entreprise : modélisation et simulation*, Hermès 1996
- Courtois A., Martin-Bonnefous C., Pillet M., *Gestion de la production*, Economica, 1998
- Heizer J., Render B., *Operations management*, Prentice Hall, 1999
- Moddie C.L., *Assembly line balancing*, chapter 3.4. in G. Salvendy ed., *Handbook of industrial engineering*, Wiley, NY, 1981
- Monks J.G., *Theory and problems of operations management*, McGraw-Hill, 1985
- Muther R., *Systematic Layout Planning*, VNR Company, 1969
- Peyrot J., Pujo P., *Rapport interne : simulation de stratégies de déménagement*, DIAM, juin 1999
- Thiel D., *Management industriel : une approche par la simulation*, Economica 1993
- Tompkins J., White J., *Facilities planning*, Wiley, 1984
- Zermatti P., *La pratique de la gestion des stocks*, 5e ed., Dunod, 1996