

## ESTIMATION DES BESOINS EN RESSOURCES HUMAINES POUR LA MAINTENANCE D'UN SYSTEME AU STADE DE LA CONCEPTION

J.-B. MENYE, D. AIT-KADI

Département de génie mécanique, Université Laval  
Membres du CIRRELT  
Québec, QC, G1K 7P4, Canada  
[jean-baptiste.menye@centor.ulaval.ca](mailto:jean-baptiste.menye@centor.ulaval.ca)  
[Daoud.Aitkadi@gmc.ulaval.ca](mailto:Daoud.Aitkadi@gmc.ulaval.ca)

A. COULIBALY, E. CAILLAUD

LGeCo (Laboratoire de Génie de la Conception)  
INSA Strasbourg - 24, Bd de la Victoire  
67084 Strasbourg, France  
[amadou.coulibaly@insa-strasbourg.fr](mailto:amadou.coulibaly@insa-strasbourg.fr)  
[emmanuel.caillaud@insa-strasbourg.fr](mailto:emmanuel.caillaud@insa-strasbourg.fr)

**RESUME :** *Cet article propose deux modèles de calcul des besoins en opérateurs pour la maintenance d'un système, sur un horizon déterminé. Ces modèles peuvent être mis en œuvre en phase d'exploitation ou au stade de la conception d'un système complexe en tenant compte de son contexte d'utilisation. Les résultats permettent de fournir des recommandations en vue de garantir les niveaux de maintenabilité et de disponibilité exigés. Les deux modèles sont basés sur l'analyse, d'une part, des compétences requises pour les tâches de maintenance et, d'autre part, des compétences accessibles dans le contexte d'utilisation du système. Cette analyse permet de définir les profils d'opérateurs de maintenance. En fonction du volume de tâches à exécuter, les modèles permettent de déterminer, pour chaque profil, le nombre d'opérateurs requis, tout en minimisant le coût total d'exécution des tâches. Les deux modèles utilisent deux approches de résolution différentes. La première approche consiste à affecter les tâches aux profils avant de calculer le nombre d'opérateurs requis par profil. La deuxième approche effectue directement le calcul, sans affectation, préalable des tâches aux profils. Un exemple est traité pour illustrer le processus de modélisation et valider la cohérence des modèles. Les formes explicites des modèles sont fournies, en annexe.*

**MOTS-CLES :** *Ressources humaines, maintenabilité, maintenance, modélisation, optimisation, conception*

### 1. INTRODUCTION

La détermination des besoins, en nombre et en compétences, des opérateurs chargés d'exécuter les tâches de maintenance sur un système, est une opération dont les résultats ont une influence sur le coût des activités de maintenance et sur la maintenabilité et la disponibilité du système. La maintenabilité est définie comme étant l'aptitude d'un système à être maintenu ou remis dans un état de fonctionnement spécifique, lorsque la maintenance est exécutée par un personnel ayant les compétences requises et utilisant les procédures et les ressources prescrites (MIL-STD-721C, 1981). La disponibilité, quant à elle, est définie comme étant la proportion de temps de bon fonctionnement sur le temps total d'arrêt et d'exploitation du système (Ait-Kadi, 1993). D'après ces définitions, la maintenabilité et la disponibilité d'un système dépendent, en effet, non seulement des caractéristiques propres au système, par exemple, la fiabilité et la démontabilité des composants, mais aussi des caractéristiques de son contexte d'utilisation, par exemple : les conditions environnementales (température, humidité, etc.), le profil d'utilisation et le nombre et la compétence des opérateurs de maintenance disponibles. Si le nombre d'opérateurs de maintenance est sous estimé, l'équipe de maintenance sera surchargée et le temps d'attente de maintenance du système sera plus long. Cela aura pour effet de diminuer la disponibilité du système. Si la compétence des opérateurs n'est pas suffisante, les tâches de maintenance seront mal exécutées et le

système sera plus fréquemment défaillant. Cela aura aussi pour effet de diminuer sa disponibilité. Si, à l'opposé, le nombre d'opérateurs de maintenance est surestimé ou si les opérateurs sont surqualifiés, cela aura pour effet d'augmenter inutilement la masse salariale. Il importe donc de déterminer, de façon adéquate, les besoins, en nombre et en compétences, des opérateurs de maintenance, pour atteindre un certain niveau de maintenabilité et de disponibilité à moindre coût.

Avec la complexité sans cesse croissante des nouveaux systèmes, la maintenabilité et la disponibilité sont de plus en plus mentionnées comme exigences dans le cahier des charges. Pour garantir les niveaux de maintenabilité et de disponibilité exigés par l'utilisateur futur, le concepteur doit prendre en considération également le contexte d'utilisation du système. Et c'est dans ce cadre qu'il définira, entre autres, les besoins en opérateurs de maintenance, sur l'horizon d'exploitation prévu. Ces besoins seront présentés, à l'utilisateur du système, sous forme de recommandations soit pour le recrutement des ressources requises, soit sous forme de contrat de service.

Beaucoup de travaux disponibles dans la littérature abordent la problématique de la prise en considération de la maintenabilité au stade de la conception (*Design For Maintainability*). On peut citer, entre autres, (MIL-HDBK-470A, 1997), (MIL-HDBK-791AM, 1988) (Dhillon, 1999), (Ramakumar *et al.*, 2000), (Dhillon, 2002), (Ireson *et al.*, 1995), (Blanchard and Fabrycky,

2005) et (Zwingmann, 2005). Quelques uns de ces travaux traitent de la prise en compte, au stade de la conception, du contexte d'utilisation d'un système, pour lui assurer les niveaux de maintenabilité et de disponibilité exigés par l'utilisateur futur. On se réfère essentiellement à (Ramakumar *et al.*, 2000), (Coulibaly *et al.*, 2007a), (Coulibaly *et al.*, 2007b), (Zwingmann, 2005) et (Menye *et al.*, 2007), pour ne citer que ceux là. Mais, ces travaux ne proposent pas de modèle de calcul des besoins en opérateurs de maintenance. Il existe cependant une littérature abondante qui présente des méthodes de calcul des effectifs, dans la planification des capacités, en gestion de projets et en gestion et organisation de la production, par exemple (Stevenson, 2006), (Javel, 2003), (Salvendy, 2001) ou (Dilworth, 1993). Ces références présentent aussi des modèles de calcul du nombre de serveurs, pour des problèmes modélisés par des files d'attente.

Dans cet article, nous proposons deux approches de modélisation et d'évaluation du nombre d'opérateurs de l'équipe de maintenance d'un système complexe. Ces approches se basent sur les tâches de maintenance à exécuter sur un système et les profils de compétence disponibles localement dans le milieu d'utilisation du système. Les deux approches peuvent être mises en œuvre aussi bien au stade de la conception qu'en phase d'exploitation d'un système. L'article qui est structuré de la manière suivante : la section 2 présente la problématique traitée et les deux approches de modélisations proposées. La section 3 présente les modèles issus des deux approches de modélisation. Un exemple d'application est traité à la section 4. Cet exemple n'est qu'un cas d'école visant essentiellement à illustrer les processus de modélisation et à vérifier la cohérence des modèles. La conclusion de l'étude et quelques extensions possibles sont données à la section 5. Enfin, les formes explicites de la fonction objectif et des contraintes, pour l'exemple traité, sont fournies en annexe, pour faciliter la compréhension des deux modèles.

## 2. PROBLEMATIQUE ET APPROCHES DE MODELISATION

Pour une meilleure compréhension de la démarche, il importe tout d'abord de bien préciser le sens donné à certains termes clés :

*Volume agrégée d'une tâche* : somme des durées d'exécution de la même tâche sur plusieurs sous-systèmes identiques (par exemple, le changement d'un même roulement sur cinq machines identiques). A priori, la durée d'exécution est la même sur chaque sous-système. Le volume agrégé de la tâche est alors égal à sa durée d'exécution sur un sous système multipliée par le nombre de sous-systèmes identiques concernés ;

*Discipline* ou *domaine* : branche de connaissance technologique ou professionnelle (par exemples la mécanique ou l'électricité);

*Qualification* : formation professionnelle acquise dans une discipline (mécanicien ou électronicien par exemple);

*Compétence* : aptitude, habileté à exécuter une tâche d'une discipline donnée;

*Profil* : ensemble des qualifications d'un opérateur. Un profil peut être spécialisé (qualifié dans une seule discipline) ou polyvalent (qualifié dans plusieurs disciplines). Plusieurs opérateurs peuvent avoir le même profil avec des niveaux de compétence différents.

*Niveau de compétence* : difficulté (maximale) des tâches pouvant être exécutées par un opérateur. Les niveaux de compétence sont définis au sein d'un profil donné. Ainsi, plusieurs opérateurs d'un même profil peuvent avoir des niveaux de compétence différents. Dans cette étude, nous ne nous intéressons pas aux niveaux de compétence des opérateurs;

Notre objectif est de déterminer les profils d'opérateurs devant constituer l'équipe de maintenance, ainsi que le nombre d'opérateurs de chaque profil retenu. Les paragraphes ci-dessous présentent les approches utilisées pour atteindre cet objectif.

Au terme du processus de conception d'un système, le concepteur est à mesure de fournir une liste des tâches de maintenance à exécuter sur le système, ainsi que leur fréquence d'exécution, pendant la phase d'exploitation. La définition des tâches de maintenance est possible grâce aux caractéristiques inhérentes au système (fiabilité et taux de panne des composants, types de liaisons entre composants, les matériaux utilisés, etc.) et, aussi, aux caractéristiques du milieu d'utilisation (profils d'utilisation, température, pression, vibration, etc.). Quelques sources d'obtention de ces données, au stade de la conception, sont fournies dans (Menye *et al.*, 2007). Comme sources possibles, on a, par exemple, les bases de données de fiabilité de certains composants, le retour d'expérience, les avis d'experts et l'utilisateur.

L'exploitation des informations et données évoquées ci-dessus permettra au concepteur de définir les tâches de maintenance à exécuter sur le système et les modalités d'exécution de ces tâches (fréquences d'exécution, procédures et ressources humaines et matérielles requises, etc.). Le respect de ces modalités est l'une des conditions qui permettront d'atteindre et de maintenir les niveaux de maintenabilité et disponibilité exigés par l'utilisateur, durant la phase d'exploitation du système. La problématique abordée, dans cet article, est la détermination d'une de ces modalités : le nombre et les profils des opérateurs qui composeront l'équipe de maintenance du système.

### 2.1. Processus de définition des profils des opérateurs

Pour déterminer les compétences requises, on considère le portefeuille de tâches définies par le concepteur. Celles-ci peuvent être classées en deux catégories : les tâches spécialisées, qui exigent des compétences dans une discipline précise (mécanique, électricité ou

automatique par exemple) et les tâches non spécialisées qui n'exigent aucune compétence technologique (nettoyage, manutention, etc.). Lorsque le nombre de tâches à traiter est assez élevé et que plusieurs d'entre elles sont identiques (par exemple le changement d'un roulement sur plusieurs machines identiques), il est suggéré d'agréger celles qui sont identiques, c'est-à-dire, les considérer comme une seule tâche ayant un volume agrégé, égal à la somme des durées d'exécution de la tâche sur chacune des machines concernées. Cela permettra, comme on le verra plus loin, de limiter la taille des modèles de calcul du nombre d'opérateurs. On suppose que chaque tâche spécialisée requiert des

compétences dans une et une seule discipline. Par ailleurs, deux tâches différentes peuvent exiger des compétences dans une même discipline. En se basant, d'une part, sur l'ensemble des disciplines dont relèvent les tâches définies par le concepteur et, d'autre part, sur les compétences et les formations facilement accessibles dans le lieu d'utilisation futur du système, on établit les profils d'opérateurs devant constituer l'équipe de maintenance, comme l'indique la figure 1. Ces profils peuvent être soit directement qualifiés à l'exécution des tâches, soit aptes à suivre des formations pour acquérir de nouvelles qualifications afin de tendre vers les profils idéaux existant dans l'environnement du concepteur.

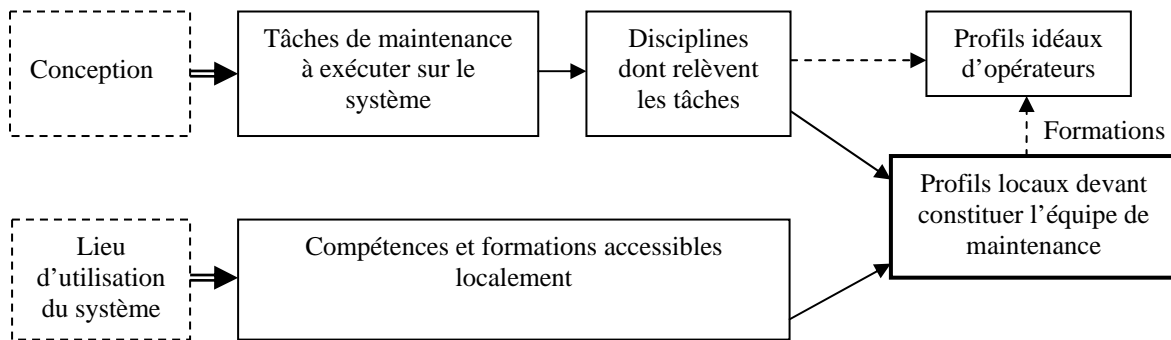


Figure 1. Processus de définition des profils d'opérateurs de maintenance

Par exemple, pour l'exécution d'un ensemble de tâches du domaine de la mécanique, les profils possibles peuvent être : mécanicien, électromécanicien ou mécatronicien. Pour l'exécution d'un ensemble de tâches d'électricité, les profils peuvent être : électricien, électromécanicien ou électrotechnicien. Un profil peut être spécialisé (compétent dans une seule discipline) ou polyvalent (compétent dans plusieurs disciplines). Le profil électromécanicien, par exemple, est polyvalent car il est apte à exécuter, à la fois, les tâches de mécanique et celles d'électricité. Par contre, les profils mécanicien et d'électricien sont spécialisés, car ils ne sont aptes à exécuter que les tâches du domaine de la mécanique et du domaine de l'électricité, respectivement.

La conséquence directe de la polyvalence de certains profils est que plusieurs profils peuvent être aptes à exécuter une même tâche spécialisée. Quant aux tâches non spécialisées, elles peuvent être exécutées par n'importe quel profil. On peut donc considérer que les tâches non spécialisées relèvent de toutes les disciplines identifiées. Une autre façon de modéliser ces tâches serait de leur associer une discipline fictive et considérer que tous les profils ont des compétences dans cette discipline fictive. La figure 2 illustre toutes ces considérations. Elle montre que les tâches 1 à 9 sont spécialisées. Elles relèvent, chacune, d'une et d'une seule discipline. Par contre, la tâche 10 est non spécialisée. Elle relève de toutes les disciplines. Les tâches 3 et 8 sont de la même discipline, b. Les profils  $\alpha$ ,  $\gamma$  et  $\eta$  sont polyvalents alors que le profil  $\beta$  est spécialisé. La tâche 4 peut être exécutée par les profils  $\alpha$  et  $\beta$ .

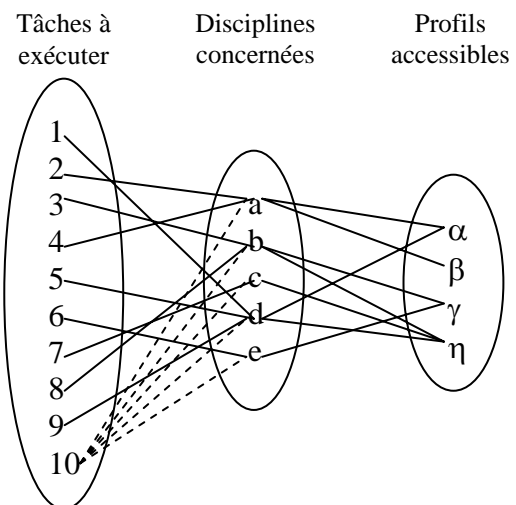


Figure 2. Modèle tâches-compétences-profil

Le nombre total de disciplines dont relèvent l'ensemble du portefeuille de tâches peut être considéré comme un indicateur de complexité du système. Si ce nombre est élevé, cela peut signifier que le système est assez complexe. Ce qui devrait inciter le concepteur à modifier le système qu'il a conçu, pour l'améliorer en diminuant le nombre de disciplines dont relèvent les tâches de maintenance. Une des pistes d'amélioration possibles, pour cet objectif, est la modularisation. De même, si les compétences requises pour la maintenance du système ne sont pas accessibles dans son lieu d'utilisation futur, alors, le concepteur devrait modifier le système pour l'adapter aux compétences accessibles. Dans le cas où

ces modifications ne sont pas possibles, le concepteur peut proposer, à l'utilisateur, des contrats de service pour la maintenance du système ou, si possible, de la e-maintenance.

## 2.2. Approches de détermination du nombre d'opérateurs par profil

Une fois les profils définis, il faut déterminer le nombre d'opérateurs requis par profil. Ce nombre dépend du volume de travail associé aux tâches à exécuter. Chaque tâche a une durée d'exécution qui diffère selon le profil qui l'exécute. Dans ce cas, on considère que le volume de travail associé à une tâche est égal à la moyenne des durées d'exécution de cette tâche, pour tous les profils aptes à l'exécuter. Chaque profil a, sur l'horizon considéré, un temps réglementaire de travail et un salaire fixe. Il est aussi possible de sous-traiter l'exécution de certaines tâches. On peut considérer plusieurs sous-traitants dans le processus de modélisation. Mais, dans cet article, on considère qu'il y a un seul sous-traitant et qu'il a des compétences pour exécuter n'importe quelle tâche du portefeuille. Le sous-traitant a ses durées d'exécution par tâche. Les coûts d'exécution par le sous-traitant sont variables. Ils dépendent de la tâche et de sa durée d'exécution. On considère que l'exécution de chaque tâche est confiée soit à un profil, soit au sous-traitant. L'objectif est de déterminer le nombre d'opérateurs requis pour chaque profil et les tâches à confier au sous-traitant, afin de minimiser le coût total d'exécution du portefeuille des tâches sur l'horizon considéré. Pour atteindre cet objectif, nous envisageons deux approches de modélisation présentées ci-dessous. Ces deux approches sont justifiées par le fait que les ensembles de tâches exécutables par chaque profil ne sont pas tous disjoints. En effet, à cause de la polyvalence, plusieurs profils peuvent être compétents pour exécuter une même tâche. Chacune des approches sera modélisée sous forme d'un programme linéaire mixte. Les modèles 1 et 2, issus respectivement de la première et de la deuxième approche, sont présentés dans la section 3.

### Première approche

La première approche procède en deux étapes : la première étape consiste à affecter les tâches aux profils et au sous-traitant. Ce dernier peut d'ailleurs être considéré comme un profil spécial. La deuxième étape consiste au calcul du nombre d'opérateurs requis par profil, en fonction du volume de tâche affecté à chaque profil. En pratique, les deux étapes s'effectuent simultanément lors de la résolution du modèle issu de cette approche, le modèle 1, présenté dans la section suivante. La figure 3 illustre l'affectation des tâches aux profils. Initialement, certaines intersections entre les ensembles de tâches exécutables par chaque profil, ne sont pas vides, comme le montre la figure 3a, du fait de la polyvalence des profils. L'affectation des tâches aux profils consiste donc à vider toutes ces intersections, comme l'indique la figure 3b. Dans le cas spécifique de cette figure, on remarque que, finalement, aucune tâche

n'est affectée au profil A. Donc, aucun opérateur ayant ce profil n'est requis. En somme, le modèle qu'on obtient de cette approche fournit, non seulement le nombre d'opérateur par profil, mais aussi la liste des tâches que chaque profil sera appelé à exécuter sur l'horizon considéré. Si l'horizon est trop long, cette approche aura comme avantage de procurer aux profils une parfaite maîtrise des activités qui leur seront affectées. Ce qui peut être considéré comme une pseudo-spécialisation des profils dans ces activités. Mais, cette approche présente aussi des inconvénients. En effet, si les tâches affectées aux profils ne sont pas variées, les profils polyvalents risquent ne pas avoir l'occasion d'exploiter toutes leurs compétences. Par ailleurs, il y a des risques de tomber dans la routine. Ce qui peut constituer une source importante de démotivation des opérateurs. Les résultats fournis par le modèle issu de cette approche peuvent être utilisées comme données d'entrée du modèle d'allocation présenté dans (Ait-Kadi *et al.*, 2006).

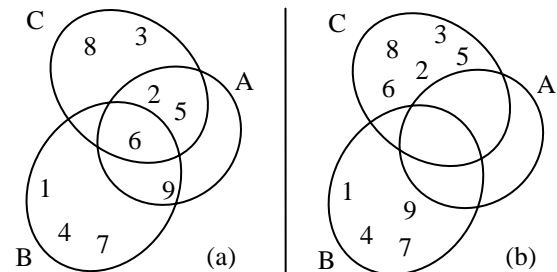


Figure 3. Affectation des tâches aux profils

### Deuxième approche

Dans la deuxième approche, il n'y a pas d'affectation des tâches aux profils. Les ensembles de tâches exécutables par chaque profil restent donc dans leur état initial, avec des intersections non vides dans certains cas, comme l'illustre la figure 3a. Cet état initial reste inchangé durant tout le processus. On procède en une étape, en parcourant tous les sous-ensembles non vides de l'ensemble des profils. Le principe est le suivant : pour chaque sous-ensemble non vide (il y en a  $2^n - 1$ , si on a défini  $n$  profils), on identifie toutes les tâches dont, seuls, les profils appartenant au sous-ensemble considéré sont aptes à exécuter. Ces tâches sont dites exclusives à ces profils, car ils sont les seuls à pouvoir les exécuter. Par conséquent, le nombre total d'opérateurs de chacun de ces profils doit être, au moins, suffisant pour exécuter toutes les tâches qui leur sont exclusives. A titre d'exemple, la figure 3a montre qu'on a  $n = 3$  profils (A, B et C). Par conséquent, l'ensemble des profils comporte donc  $2^3 - 1 = 7$  sous-ensembles non vides. Si on considère le sous-ensemble formé uniquement par le profil C, les tâches qui lui sont exclusives sont les tâches 3 et 8. Le nombre d'opérateurs de profil C doit donc être, au minimum, suffisant pour exécuter les tâches 3 et 8. Si on considère le sous-ensemble formé par les deux profils A et C, les tâches qui leur sont exclusives sont les tâches 2, 3, 5 et 8. Le nombre total d'opérateurs de profil A ou C doit être au minimum suffisant pour exécuter les

tâches 2, 3, 5 et 8. On procède de la même manière jusqu'à couvrir tous les sous-ensembles non vides de l'ensemble des profils. Au final, on obtient le modèle 2, présenté à la section suivante. Sa résolution, comme celle du modèle 1, permet d'obtenir le nombre adéquat d'opérateurs par profil, les tâches affectées au sous-traitant et le coût total d'exécution du portefeuille de tâches. Contrairement à la première approche, l'affectation des tâches aux opérateurs va se faire, dans ce cas, pendant lors de la planification de leur exécution.. L'avantage de cette approche est que chaque profil et

donc, chaque opérateur, conserve la possibilité de se voir attribuer n'importe quelle tâche dont il détient les compétences requises. Les opérateurs polyvalents ont donc la possibilité de valoriser toutes leurs compétences. Ce qui va procurer une grande flexibilité pendant la planification des tâches. Cette planification peut être facilitée grâce au modèle d'allocation de ressources proposé dans (El Assami *et al.*, 2007). La figure 4 présente toutes les données d'entrée et de sortie des modèles issus des deux approches.

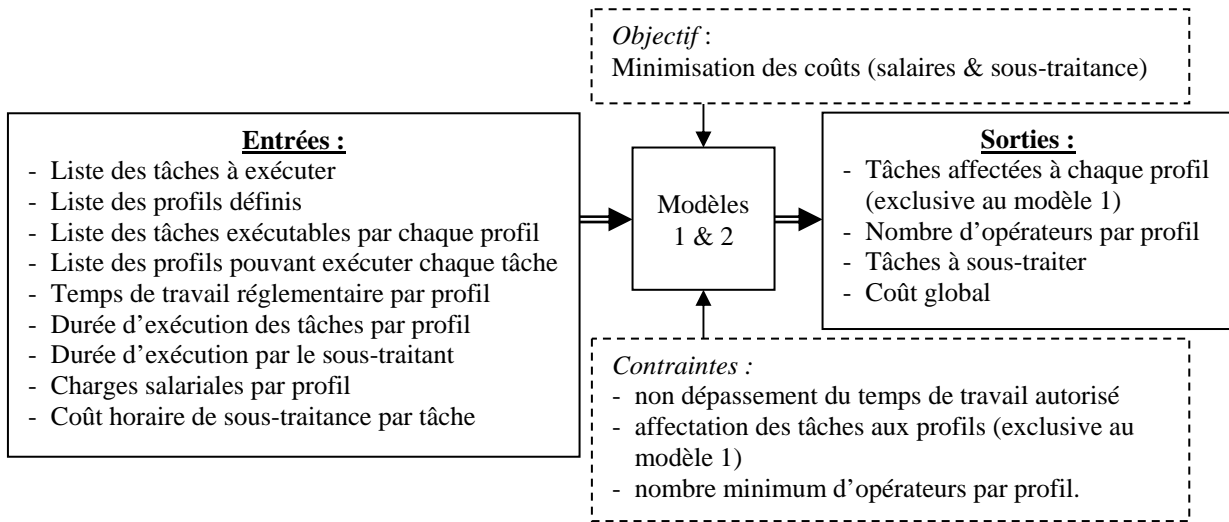


Figure 4. Contraintes et données d'entrée et de sortie des modèles

### 3. MODÈLES ANALYTIQUES

*Variables de décision :*

$N_j$  : variable entière désignant le nombre d'opérateurs ayant le profil  $j$ ;

$Y_{ij}$  : variable binaire qui prend la valeur 1 si la tâche  $i$  ( $i=1, \dots, M$ ) est affectée au profil  $j$  ( $j=1, \dots, N$ ); 0 sinon;

$Y_{i0}$  : variable binaire qui prend la valeur 1 si la tâche  $i$  est affectée au sous-traitant; 0 sinon;

*Paramètres :*

$T = \{t_i\}$  : ensemble des tâches  $i$  à exécuter ( $i=1, \dots, M$ );

$P = \{p_j\}$  : ensemble des profils  $j$  requis ( $j=1, \dots, N$ );

$T_j$  : ensemble des tâches que peut exécuter le profil  $j$ ;

$P_i$  : ensemble des profils pouvant exécuter la tâche  $i$ ;

$d_{ij}$  : durée d'exécution de la tâche  $i$  par le profil  $j$ ;

$d_{i0}$  : durée d'exécution de la tâche  $i$  par le sous-traitant

$c_j$  : salaire d'un opérateur ayant le profil  $j$  sur l'horizon considéré;

$c_{i0}$  : coût horaire d'exécution de la tâche  $i$  par le sous-traitant;

$h_j$  : durée de disponibilité d'un opérateur de profil  $j$  sur l'horizon considéré;

$n_0^j$  : nombre minimum d'opérateur de profil  $j$  requis

$P^*(P)$ : ensemble des parties (sous-ensembles) non vides,  $X_\alpha$ , de  $P$  ( $\alpha=1, \dots, 2^N-1$ );

$T_{X_\alpha} = T - \left( \bigcup_{\substack{k \neq j \\ j \in X_\alpha}} T_k \right)$  : ensemble des tâches que seuls

les profils  $j \in X_\alpha$  peuvent exécuter.

Nous cherchons à déterminer le nombre d'opérateurs par profil et les tâches à sous-traiter afin de minimiser le coût total d'exécution des tâches. La fonction objectif, représentée par l'expression (1), est la même pour les deux modèles proposés. Elle représente le coût total d'exécution du portefeuille des tâches. Ce coût, que l'on cherche à minimiser, comporte deux composantes. D'une part, le coût des opérateurs, constitué des salaires et, éventuellement, d'autres frais comme les frais d'embauche et les frais de formation. Ces coûts sont fixes sur l'horizon considéré. D'autre part, le coût d'exécution des tâches par le sous-traitant. Cette composante ne prend évidemment en compte que les tâches à sous-traiter. C'est un coût variable, qui dépend de la tâche et de sa durée d'exécution.

L'expression (2), exclusive au modèle 1, est la contrainte qui assure l'affectation des tâches aux profils et au sous-

traitant. Cette contrainte se base sur le fait que chaque tâche doit être attribuée à un seul profil ou au sous-traitant. La famille de contraintes (3) permet, au modèle 1, d'ajuster le nombre d'opérateurs par profil, en fonction du volume de travail affecté au profil, tout en s'assurant du respect du temps réglementaire de travail pour chaque profil. L'expression (4), présente dans les deux modèles, exprime le fait qu'on puisse avoir besoin, pour une raison ou une autre, d'un minimum d'opérateurs d'un certain profil. Une des raisons possible est le transfert de connaissance entre deux générations d'opérateurs. Les familles de contraintes (5) et (6), présentes dans les deux modèles, indiquent, respectivement, les variables entières et les variables binaires. La famille de contraintes (7) du modèle 2, joue le même rôle que la contrainte (3) du modèle 1, mais de manières différentes. D'où la différence entre leurs expressions. L'expression (7) traduit le fait que le nombre total d'opérateurs des profils appartenant au sous-ensemble  $X_\alpha$  de  $P$ , doit être suffisant pour réaliser toutes les tâches appartenant à l'ensemble  $T_{X_\alpha}$ , des tâches dont l'exécution ne peut se faire que par un ou plusieurs profils appartenant à  $X_\alpha$ . Dans le cas où plusieurs profils de  $X_\alpha$  peuvent exécuter une même tâche de  $T_{X_\alpha}$ , on considère comme volume de la tâche concernée, la moyenne des durées d'exécution de tous les profils pouvant l'exécuter. Le fait de parcourir systématiquement l'ensemble des parties (sous-ensembles) non vides de  $P$ ,  $P^*(P)$ , permet au programme de fixer un nombre adéquat d'opérateur par profil. Pour un ensemble de  $N$  profils définis, le nombre de sous-ensembles non vides,  $X_\alpha$ , à parcourir est égal à  $2^N - 1$ .

### 3.1 Modèle 1

Modèle issu de la première approche.

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^N c_j N_j + \sum_{i=1}^M c_{i0} d_{i0} Y_{i0} \quad (1)$$

Contraintes :

*Affectation des tâches aux profils*

$$Y_{i0} + \sum_{j \in P_i} Y_{ij} = 1 \quad \forall i \in T \quad (2)$$

*Non dépassement du temps réglementaire de travail par profil*

$$h_j N_j \geq \sum_{i \in T_j} d_{ij} Y_{ij} \quad \forall j \in P \quad (3)$$

*Minimum d'opérateurs par profil*

$$\sum_{j=1}^N N_j \geq n_0^j \quad \forall j \in P \quad (4)$$

*Intégralité et binarité des variables*

$$N_j \text{ entiers} \quad \forall j \in P \quad (5)$$

$$Y_{ij} \text{ et } Y_{i0} \text{ binaires} \quad \forall i \in T, \forall j \in P \quad (6)$$

### 3.2 Modèle 2

Modèle issu de la deuxième approche.

$$\text{Min } Z = \sum_{j=1}^N c_j N_j + \sum_{i=1}^M c_{i0} d_{i0} Y_{i0} \quad (1)$$

Contraintes :

*Non dépassement du temps réglementaire de travail par profil*

$$\sum_{j \in X_\alpha} h_j N_j \geq \sum_{i \in T_{X_\alpha}} \left( \frac{\sum_{j \in X_\alpha} d_{ij}}{\text{card}(P_i)} \right) (1 - Y_{i0}) \quad (7)$$

$$\forall X_\alpha \in P^*(P) / T_{X_\alpha} \neq \emptyset, \alpha = 1, \dots, 2^N - 1.$$

*Minimum d'opérateurs par profil*

$$\sum_{j=1}^N N_j \geq n_0^j \quad \forall j \in P \quad (4)$$

*Intégralité et binarité des variables*

$$N_j \text{ entiers} \quad \forall j \in P \quad (5)$$

$$Y_{ij} \text{ et } Y_{i0} \text{ binaires} \quad \forall i \in T, \forall j \in P \quad (6)$$

## 4. ILLUSTRATION

Cet exemple n'est qu'un cas d'école ayant pour but d'illustrer le processus de détermination du nombre d'opérateurs par profil et de valider la cohérence des modèles. Il n'illustre pas le processus de définition de ces profils. On prend donc pour acquis que les profils ont déjà été définis. On considère un ensemble de 10 tâches à exécuter sur un système. Compte-tenu des disciplines donc relèvent ces tâches, 4 profils d'opérateurs ont été définis. L'exécution des tâches doit se faire sur une journée. Un sous-traitant est aussi capable d'exécuter chacune des 10 tâches. Chaque tâche doit être exécutée plusieurs fois, sur différentes parties du système, soit par un des quatre profils soit par le sous-traitant. Le volume associé à chaque tâche est agrégé. Il correspond à la



X <sub>4</sub>	p <sub>4</sub>									t <sub>9</sub>		16
X <sub>5</sub>	p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub>		t <sub>2</sub>			t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>			t <sub>8</sub>		81
X <sub>6</sub>	p <sub>1</sub> , p <sub>3</sub>					t <sub>5</sub>				t <sub>8</sub>		49
X <sub>7</sub>	p <sub>1</sub> , p <sub>4</sub>					t <sub>5</sub>				t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	65
X <sub>8</sub>	p <sub>2</sub> , p <sub>3</sub>		t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>								32
X <sub>9</sub>	p <sub>2</sub> , p <sub>4</sub>		t <sub>2</sub>								t <sub>9</sub>	28
X <sub>10</sub>	p <sub>3</sub> , p <sub>4</sub>				t <sub>4</sub>						t <sub>9</sub>	25
X <sub>11</sub>	p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub> , p <sub>3</sub>		t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>		t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>			t <sub>8</sub>		101
X <sub>12</sub>	p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub> , p <sub>4</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>			t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>			t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	112
X <sub>13</sub>	p <sub>1</sub> , p <sub>3</sub> , p <sub>4</sub>				t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>				t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub> t <sub>10</sub>	99
X <sub>14</sub>	p <sub>2</sub> , p <sub>3</sub> , p <sub>4</sub>		t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>						t <sub>9</sub>	58
X <sub>15</sub>	p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub> , p <sub>3</sub> , p <sub>4</sub>	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	t <sub>6</sub>	t <sub>7</sub>	t <sub>8</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>10</sub>	184

Tableau 4. Tâches exclusives aux profils appartenant au sous-ensemble X<sub>α</sub>

Les deux modèles développés, pour cet exemple d'application, ont été résolus par le logiciel d'optimisation LINGO (LINGO, 2001). Le tableau 5 présente les résultats obtenus. Ces résultats montrent que le nombre d'opérateurs, pour les 3 premiers profils, est le même pour les deux modèles : 8 opérateurs de profil p<sub>1</sub>, aucun opérateur de profil p<sub>2</sub> et 9 opérateurs de profil p<sub>3</sub>. Par contre le nombre d'opérateurs de profil p<sub>4</sub> diffère selon le modèle. Il est de 3 opérateurs avec le modèle 1 et de 1 opérateur avec le modèle 2. Cette différence est due au fait que, dans le modèle 1, le profil p<sub>4</sub> hérite de la tâche t<sub>9</sub> dont il est le seul apte à exécuter. Compte tenu du volume de cette tâche et le temps règlementaire de travail de p<sub>4</sub>, il faut exactement 3 opérateurs de ce profil pour exécuter t<sub>9</sub> dans la journée. Le modèle 2 suggère un seul opérateur de profil p<sub>4</sub> juste pour respecter la contrainte qui impose au moins un opérateur de ce profil. Cet opérateur pourra exécuter d'autres tâches, mais pas la tâche 9 qui est confiée au sous-traitant. Si on supprime la contrainte qui impose au moins un opérateur de profil p<sub>4</sub>, alors les deux modèles donnent des résultats strictement identiques comme l'indique le tableau 6.

L'analyse du nombre d'opérateurs obtenu par profil montre qu'à priori, les deux modèles privilégient les profils qui ont le temps de travail le plus long sur l'horizon considéré. C'est le cas des profils p<sub>1</sub> et p<sub>3</sub> qui s'en sortent avec le plus grand nombre d'opérateurs. Les tâches t<sub>2</sub> et t<sub>6</sub> sont affectées au sous-traitant par le modèle 1. Ce qui correspond à un volume de travail de 32 heures pour un coût de \$512. Le modèle 2, lui, affecte les tâches t<sub>2</sub>, t<sub>8</sub> et t<sub>9</sub> au sous-traitant. Soit un volume de 42 heures pour un coût de \$672. Concernant la spécificité du modèle 1, qui est l'affectation des tâches aux profils, il en résulte que les tâches t<sub>1</sub>, t<sub>5</sub> et t<sub>8</sub> sont affectées à p<sub>1</sub>. Ce qui représente un volume de travail de 64 h. Comme on pouvait s'y attendre, aucune tâche n'est affectée à p<sub>2</sub>, étant donné que le modèle suggère de ne pas avoir d'opérateurs de ce profil. p<sub>3</sub> reçoit la charge des tâches t<sub>3</sub>, t<sub>4</sub>, t<sub>7</sub> et t<sub>10</sub>. Soit un volume de travail de 72 heures. Enfin, la tâche t<sub>9</sub> revient à p<sub>4</sub>. Ces résultats sont bien cohérents avec les contraintes du modèle. Le coût total obtenu par le modèle 1 est de \$2768. Il est plus élevé que celui de \$2688 obtenu par le modèle 2.

Modèle	Nombre d'opérateurs				Tâches affectées aux profils et au sous-traitant					Coût total
	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>	Sous-traitant	
Modèle 1	8	0	9	3	t <sub>1</sub> , t <sub>5</sub> et t <sub>8</sub>		t <sub>3</sub> , t <sub>4</sub> , t <sub>7</sub> et t <sub>10</sub>	t <sub>9</sub>	t <sub>2</sub> et t <sub>6</sub>	\$2768
Modèle 2	8	0	9	1					t <sub>2</sub> , t <sub>8</sub> et t <sub>9</sub>	\$2688

Tableau 5. Synthèse des résultats des deux approches

Modèle	Nombre d'opérateurs				Tâches affectées aux profils et au sous-traitant					Coût total
	N <sub>1</sub>	N <sub>2</sub>	N <sub>3</sub>	N <sub>4</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>	Sous-traitant	
Modèle 1	8	0	9	0	t <sub>1</sub> , t <sub>5</sub> et t <sub>8</sub>		t <sub>3</sub> , t <sub>4</sub> , t <sub>7</sub> et t <sub>10</sub>		t <sub>2</sub> , t <sub>6</sub> et t <sub>9</sub>	\$2664
Modèle 2	8	0	9	0					t <sub>2</sub> , t <sub>6</sub> et t <sub>9</sub>	\$2664

Tableau 6. Synthèse des résultats des deux approches (cas N<sub>4</sub><sup>min</sup> = 0)

### 5. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons proposé deux modèles de calcul des besoins en opérateurs chargés d'exécuter les tâches de maintenance sur un système en cours de développement ou en phase d'exploitation. Le processus de modélisation prend en considération les compétences

disponibles dans le milieu d'utilisation futur du système. Lorsqu'il est mis en œuvre au stade de la conception du système, les résultats de l'analyse qui découle de ce processus permet au concepteur d'améliorer le système qu'il a conçu en le modifiant soit pour diminuer le nombre de disciplines dont relèvent les tâches de maintenance à exécuter sur le système, soit pour

l'adapter aux compétences accessibles dans son milieu d'utilisation futur Cet analyse peut aussi déboucher sur des contrats de service de maintenance, à proposer à l'utilisateur. Les modèles de calcul du nombre d'opérateurs proposés sont issus de deux approches différentes. Les résultats fournis par ces modèles peuvent être présentés comme recommandations permettant à l'utilisateur d'obtenir les niveaux de maintenabilité et de disponibilité exigés. L'exemple d'application a permis de montrer la cohérence des modèles. Ces modèles peuvent aussi être utilisés en phase d'exploitation du système. Des travaux sont en cours pour étudier la sensibilité des modèles par rapport aux paramètres comme le temps de travail des opérateurs.

## REFERENCES

- Ait-Kadi, D., 1993, Availability Optimization for Randomly Failing equipments: Advances in Factory of the Future, CIM and Robotics, *Elsevier, Manufacturing Research and Technology*, 16, p. 333-942.
- Ait-Kadi, D., Menye, J.-B., et Kane, H., 2006, Resources assignment model in maintenance activities scheduling, *International Journal of Production Research* (accepté pour publication, Juillet 2007).
- Coulibaly, A., Mutel, B., et Ait-Kadi, D., 2007a, Product Modelling Framework for Behavioural Performance Evaluation at Design Stage, *Computers In Industry*, 58, p. 567-577.
- Coulibaly, A., Mutel, B., et Ait-Kadi, D., 2007b, Manufactured Products Behavioral Performance Evaluation under environmental constraints, *Actes (CD-ROM) du 7<sup>ème</sup> Congrès International de Genie Industriel (CIGI 2007)*, Trois-Rivières, Canada, 5-8 juin.
- Blanchard, B. S. and Fabrycky, W. J., 2005, *Systems Engineering and Analysis*, 4th Edition, Prentice-Hall International Series in Industrial and Systems
- Dhillon, B.S., 2002, *Engineering Maintenance : A Modern Approach*, CRC Press, ISBN 1-58716-142-7
- Dhillon, B. S., 1999, *Engineering Maintainability : How to Design for Reliability and Easy Maintenance*. Gulf Publishing Compagny
- Dilworth, J. B., 1993, *Production and operations management : manufacturing and services*, 5<sup>th</sup> Edition, McGraw-Hill, New York.
- El Assami, Y., Ait-Kadi, D., Menye, J.-B. et Kane, H., 2007, Modèle d'allocation d'opérateurs polyvalents dans l'ordonnancement de tâches de maintenance, *Actes (CD-ROM) du 7<sup>ème</sup> Congrès International de Genie Industriel (CIGI 2007)*, Trois-Rivières, Canada, 5-8 juin.
- Javel, G., 2003, *Pratique de la gestion industrielle : organisation, méthodes et outils*, Dunod : Éditions de l'Usine nouvelle, Paris.
- Ireson, W.G., Coombs, C.F. and Moss, R.Y., 1995, *Handbook of Reliability Engineering and Management*, Second Edition, McGraw-Hill Companies, ISBN 0-07-012750-6.
- LINGO user's manual, version 7, 2001, LINGO System Inc., Chicago, USA.
- Menye, J.-B., Ait-Kadi, D., Coulibaly, A. et Caillaud, E., (2007), Prise en compte de la maintenabilité en conception des produits mécaniques, *Actes (CD-ROM) du 7<sup>ème</sup> Congrès International de Genie Industriel (CIGI 2007)*, Trois-Rivières, Canada, 5-8 juin.
- MIL-HDBK-470A, 1997, *Designing and Developing Maintainable products and Systems*, Military HandBook, US Department Of Defense, Washington, DC.
- MIL-HDBK-791AM, 1988, *Maintainability Design Techniques*. Military HandBook, US Department Of Defense, Washington, DC.
- MIL-STD-721C, 1981, *Definitions of Terms for Reliability and Maintainability*, Military Standard, US Department Of Defense, Washington, DC.
- Ramakumar, R., Dhillon, B., Jambekar, A., and Pelc, K., 2000, Reliability and Maintainability, *Technology Management Handbook*, Ed. Richard C. Dorf, Boca Raton: CRC Press LLC.
- Salvendy, G., 2001, *Handbook of industrial engineering :technology and operations management*, 3<sup>rd</sup> Edition, Wiley, New York.
- Stevenson W.J. et Benedetti C., 2006, *La gestion des opérations, produits et services*, 2<sup>ème</sup> Edition, Chenelière/McGraw-Hill, Montréal.
- Zwingmann, X., (2005), *Modèle d'évaluation de la fiabilité et de la maintenabilité au stade de la conception*, thèse de doctorat, Département de génie mécanique, Université Laval, Québec, Canada.

## ANNEXES

### Détails de la formulation LINGO du modèle 1.

$$\text{Min} = 120 * N1 + 112 * N2 + 104 * N3 + 120 * N4 + 240 * Y10 + 192 * Y20 + 320 * Y30 + 144 * Y40 + 560 * Y50 + 320 * Y60 + 288 * Y70 + 224 * Y80 + 256 * Y90 + 400 * YA0;$$

! Affectation des tâches aux profils

$$\begin{aligned} Y10 + Y11 + Y21 + Y41 &= 1 ; \\ Y20 + Y22 &= 1 ; \\ Y30 + Y23 + Y33 &= 1 ; \\ Y40 + Y34 + Y44 &= 1 ; \\ Y50 + Y15 &= 1 ; \\ Y60 + Y16 + Y26 &= 1 ; \\ Y70 + Y17 + Y27 + Y37 + Y47 &= 1 ; \\ Y80 + Y18 &= 1 ; \\ Y90 + Y49 &= 1 ; \\ YA0 + Y1A + Y3A + Y4A &= 1 ; \end{aligned}$$

! Non dépassement du temps réglementaire de travail par profil

$8*N1 \geq 15*Y11 + 35*Y15 + 20*Y16 + 18*Y17 + 14*Y18 + 25*Y1A$  ;  
 $7*N2 \geq 15*Y21 + 12*Y22 + 20*Y23 + 20*Y26 + 18*Y27$  ;  
 $8*N3 \geq 20*Y33 + 9*Y34 + 18*Y37 + 25*Y3A$  ;  
 $6*N4 \geq 15*Y41 + 9*Y44 + 18*Y47 + 16*Y49 + 25*Y4A$  ;

*! Minimum d'opérateurs par profil*

$N3 \geq 2$  ;  
 $N4 \geq 1$  ;

*! Intégralité des variables,  $j = 1, \dots, 4$*

@GIN(Nj);

*! Binarité des variables,  $i = 1, \dots, A, (A=10)$*

@BIN(Yi0) ;

@BIN(Y44) ;

@BIN(Y47) ;

@BIN(Y49) ;

@BIN(Y4A) ;

### Détails de la formulation LINGO du modèle 2.

$Min = 120*N1 + 112*N2 + 104*N3 + 120*N4 + 240*Y10 + 192*Y20 + 320*Y30 + 144*Y40 + 560*Y50 + 320*Y60 + 288*Y70 + 224*Y80 + 256*Y90 + 400*YA0$  ;

*! Non dépassement du temps réglementaire de travail par profil*

$8*N1 + 35*Y50 + 14*Y80 \geq 49$  ;

$7*N2 + 12*Y20 \geq 12$  ;

$6*N4 + 16*Y90 \geq 16$  ;

$8*N1 + 7*N2 + 12*Y20 + 35*Y50 + 20*Y60 + 14*Y80 \geq 81$  ;

;

$8*N1 + 8*N3 + 35*Y50 + 14*Y80 \geq 49$  ;

$8*N1 + 6*N4 + 35*Y50 + 14*Y80 + 16*Y90 \geq 65$  ;

$7*N2 + 8*N3 + 12*Y20 + 20*Y30 \geq 32$  ;

$7*N2 + 6*N4 + 12*Y20 + 16*Y90 \geq 28$  ;

@BIN(Y11) ;

@BIN(Y15) ;

@BIN(Y16) ;

@BIN(Y17) ;

@BIN(Y18) ;

@BIN(Y1A) ;

@BIN(Y21) ;

@BIN(Y22) ;

@BIN(Y23) ;

@BIN(Y26) ;

@BIN(Y27) ;

@BIN(Y33) ;

@BIN(Y34) ;

@BIN(Y37) ;

@BIN(Y3A) ;

@BIN(Y41) ;

$8*N3 + 6*N4 + 9*Y40 + 16*Y90 \geq 25$  ;

$8*N1 + 7*N2 + 8*N3 + 12*Y20 + 20*Y30 + 35*Y50 + 20*Y60 + 14*Y80 \geq 101$  ;

$8*N1 + 7*N2 + 6*N4 + 15*Y10 + 12*Y20 + 35*Y50 + 20*Y60 + 14*Y80 + 16*Y90 \geq 112$  ;

$8*N1 + 8*N3 + 6*N4 + 9*Y40 + 35*Y50 + 14*Y80 + 16*Y90 + 25*YA0 \geq 99$  ;

$7*N2 + 8*N3 + 6*N4 + 12*Y20 + 20*Y30 + 9*Y40 + 16*Y90 \geq 57$  ;

$8*N1 + 7*N2 + 8*N3 + 6*N4 + 15*Y10 + 12*Y20 + 20*Y30 + 9*Y40 + 35*Y50 + 20*Y60 + 18*Y70 + 14*Y80 + 16*Y90 + 25*YA0 \geq 184$  ;

*! Minimum d'opérateurs par profil*

$N3 \geq 2$  ;

$N4 \geq 1$  ;

*! Intégralité des variables,  $j = 1, \dots, 4$*

@GIN(Nj);

*! Binarité des variables,  $i = 1, \dots, A, (A=10)$*

@BIN(Yi0) ;