

## INTÉGRATION DE LA POLYVALENCE ET DE LA MODULATION D'HORAIRE DANS UNE APPROCHE D'AFFECTATION FLEXIBLE DE LA RESSOURCE HUMAINE

**Kouassi Hilaire EDI<sup>1\*</sup> et Philippe DUQUENNE<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Laboratoire de Mathématique et Informatique, UFR-SFA, Université  
Abobo-Adjamé, Côte d'Ivoire, 02 BP 801 Abidjan 02  
<sup>2</sup>LGC - PSI - Génie Industriel, INPT-ENSIACET, France, 118 route de  
Narbonne, 31077 Toulouse cedex 4

(Reçu le 06 Juillet 2009, accepté le 13 Décembre 2009)

---

\* Correspondance et tirés à part, e-mail : [edi.hilaire@yahoo.fr](mailto:edi.hilaire@yahoo.fr)

### RÉSUMÉ

Dans ce travail, nous proposons une démarche méthodologique en matière de planification d'activités industrielles, qui prend en compte deux aspects de la flexibilité, liés l'un à la possibilité que pourrait avoir une ressource humaine à exécuter diverses tâches (polyvalence) et la modulation du temps de travail. Comme tout problème d'affectation, nous avons d'une part, un programme à réaliser pour lequel nous supposons connues les tâches, leur ordonnancement prévisionnel ainsi que les charges par tâche et par compétence. Et d'autre part, nous considérons une entreprise chargée de mener à bien l'activité, et composée d'acteurs supposés polyvalents travaillant selon des horaires modulables. Pour caractériser la polyvalence, nous associons à chaque compétence des acteurs un poids que nous appelons dans notre modèle « efficacité », permettant d'abord de guider les divers choix d'affectation ; elle nous sert également à apprécier, les répercussions de ces choix sur les durées standards définies pour les tâches. Dans cet article, nous proposons un modèle mathématique qui décrit les différentes contraintes, la fonction « objectif » du problème et une démarche méthodologique qui nous permet de simuler différentes politiques d'affectation des ressources humaines

**Mots-clés :** *Flexibilité, polyvalence, planification, ordonnancement*

### ABSTRACT

**Integration of the multi skill and the modulation of time in a flexible approach for allocation of human resource**

In this work, we propose a methodology for planning of industrial activities. Our method takes into account two aspects of flexibility. The first one is

related to the skills of a human resource to perform various tasks (multi skills) and the second one is related to modulation of working time. As any assignment problem, on one hand we have to compute a program for which we suppose that the tasks, their precedence constraints, the workload per task and per skill are known. On the other hand we consider a company responsible for carrying out the activity and composed of multi skills actors working according to flexible schedules. To characterize the multi skills, we give to each skill a weight that we call in our model the "efficiency". It helps to choose the assignment. It also helps us to assess the impact of the standard times for tasks. In this paper, we propose a mathematical model that describes the various constraints, the objective function of problem and a methodological approach that allows us to simulate different policies for allocating resources.

**Keywords :** *Flexibility, multi skills, planning, scheduling*

## I - INTRODUCTION

L'une des inquiétudes des entreprises est l'utilisation rationnelle des ressources humaines lors de la planification des activités [1]. Cependant, un travail de planification se heurte au double problème : d'une part, de respecter des contraintes d'ordonnancement entre les tâches et d'autre part, de vérifier la disponibilité des ressources nécessaires. Si les premières sont généralement imposées par la logique de réalisation du travail, le traitement des ressources est souvent abordé en supposant de leur part une capacité de travail régulière, et surtout prédéterminée. Ainsi, l'amélioration des systèmes d'affectation passe par la mise en place et la modélisation des facteurs de flexibilité pouvant permettre d'opter entre plusieurs options; car les demandes deviennent de plus en plus incertaines [2-4]. Les facteurs de flexibilités généralement modélisés concernent l'aspect quantitatif [5-7]. Les travaux comme ceux de Loerch et Muckstadt dans [8] proposent une approche de planification et d'affectation des ressources complémentaires telles que le recours aux heures supplémentaires où la sous-traitance. Très peu de travaux se sont intéressés à la modélisation de la polyvalence comme un moyen de flexibilité [9,10]. Ceux de Giard [9] propose un système d'aide à la décision pour la détermination des services et l'ajustement charge-capacité d'un centre de production en intégrant dans un même modèle la notion de catégorie de personnel, avec une affectation fixe pour certains opérateurs et variable au cours du temps pour le personnel polyvalent. En intégrant la notion de polyvalence dans les modèles, ces auteurs mettent en évidence, la nécessité de rechercher d'autre forme de flexibilité permettant aux industriels d'absorber certaines charges en faisant appelle aux acteurs internes. Nous avons dans [11,12] montré l'impact de la prise en compte de la

polyvalence dans la charge de travail global. Cet article propose, un modèle mathématique permettant de simuler différentes politiques d'affectations de la ressource humaine lors de la planification des activités industrielles. Pour la résolution, un simulateur utilisant les algorithmes génétiques est développé, qui joue sur deux caractéristiques différents : l'intensité des affectations qui permet de moduler la consommation de ressources trop chargées d'une part, et l'efficacité des ressources qui permet de « puiser » dans les ressources non optimales (efficacité dans la compétence) mais disponibles d'autre part. Notons que l'une comme l'autre de ces caractéristiques à un impact direct sur la durée des tâches.

## II - PRINCIPES DU MODELE

### II-1. Terminologie

**Activité:** Une activité est ici entendue au sens large, qu'elle relève d'une logique de projet (ensemble de tâches uniques et originales) ou qu'elle concerne des campagnes de fabrications (séries d'opérations plus calibrées et consistant à l'exécution de gammes définies). Dans un cas comme dans l'autre, une activité est un ensemble de tâches ordonnancées.

**Acteur :** Dans notre communication, nous appelons une ressource humaine un acteur.

**Efficacité :** concerne les acteurs, elle caractérise la possibilité pour un acteur de réaliser ou non des tâches requérant des compétences données, et quantifie l'effort correspondant.

**Charge :** concerne les tâches; nombre d'heures nécessaire pour effectuer une tâche. Ce nombre d'heures suppose une efficacité nominale.

**Travail :** concerne les acteurs; nombre d'heures effectuer par un acteur sur une tâche. Contrairement à la charge, cette grandeur fait intervenir l'efficacité.

### II-2. Les variables et les données

Nous allons décrire l'ensemble des variables et des données du problème utilisées dans la formulation. Pour l'unité de planification, nous avons travaillé avec l'unité « jour ».

#### II-2-1. Les données du modèle

-  $A, K, I$  : (entiers) respectivement, nombre d'acteurs, de compétences et de tâches;

- $A_k, I_k$  : (entier) respectivement nombre d'acteurs et de tâches utilisant la compétence (k);
- $w_{i,k}$  : (heure) charge estimée de la tâche (i) sur la compétence (k);
- $g$  : (réel) niveau minimum d'acceptation d'une compétence acquise (paramétrage de l'efficacité);
- $nk_a$  : (entier) nombre de compétences détenu par l'acteur (a);
- $NK_i$  : (entier) nombre de compétences utilisé par la tâche (i) ;
- $D_i$  : (en jours) durée standard de la tâche (i),  $D_i^{\min} \leq D_i \leq D_i^{\max}$  ;
- $MT_i$  : marge totale de la tâche (i);
- $D_i^{\min}$  et  $D_i^{\max}$  : (en jour) respectivement durée minimale et maximale pour exécuter la tâche (i);
- $\alpha_{i,n}$  délai sur le lien entre les tâches (i) et (n);
- $DMaxJ$  : (heures) durée maximale de travail journalier selon la loi (10 heures en France) ;
- $DMaxS$  : (heures) durée maximale de travail hebdomadaire selon la loi (48 heures en France) ;
- $DMaxMod$  : (heures) durée de travail hebdomadaire d'accord de modulation: accord d'entreprise (identique pour tous les acteurs);
- $D12S$  : (heure) durée moyenne de travail sur 12 semaines consécutives;
- $HSA$  : (heure) heure supplémentaire annuelle autorisé;
- $HSR_a$  (heure) heure supplémentaire déjà utilisée par l'acteur (a);
- $DSA$  : (heure) durée standard annuelle autorisée, en France cette durée est de 1600 heures;
- $C_{s0}$  : (en heures) durée moyenne hebdomadaire de temps de travail ( $C_{s0} = 35$  heures en France);
- $U_a$  : (unité monétaire) coût horaire de l'acteur a;
- $UF_a$  : (unité monétaire) coût fictif lié à la perte de flexibilité de l'acteur a;
- $UP$  : (unité monétaire) coût fixe de pénalité de retard;
- $u$  : taux de bonification des heures supplémentaires;
- $UI$  : (unité monétaire) coût d'immobilisation journalier du résultat de l'activité;
- $P$  : tranches périodiques consécutifs de jours sert à calculer les pénalités de retard.

**II-2-2. Les variables de décision**

- $\sigma_{a,k,i}$  : (binaire) variable d'affectation  
 $\sigma_{a,k,i} = 1$  si l'acteur (a) est affecté pour sa compétence (k) sur la tâche (i),  
 $\sigma_{a,k,i} = 0$  si non ;
- $d_{i,k}$  : (en jours) durée mise pour exécuter la tâche (i) sur la compétence (k);

**II-2-3. Les autres variables**

- $dd_{i,k}$  : Date de début de la tâche (i) sur la compétence (k);
- $\theta_{a,k} \in [0, 1]$  : (adimensionnelle) ; paramétrage de l'efficacité de l'acteur (a) dans la compétence (k) ;  
 $dd_i = \min_{NK_i}(dd_{i,k})$  (en jours) date de début de la tâche (i);
- $d_i = \max_{NK_i}(d_{i,k})$  (en jours) durée totale d'exécution de la tâche (i);
- $\psi_{a,s}$  : (en heures) travail effectué par l'acteur (a) à la semaine (s) ;
- $\beta_{a,s}$  : (réel) disponibilité de l'acteur (a) à la semaine (s) ;
- $HS_{a,s}$  : (en heures) Heures supplémentaires effectuées par l'acteur (a) à la semaine (s).
- $C'_{s0,k}$  (en heures) travail moyen hebdomadaire nécessaire sur la compétence (k) calculé pour besoin de faisabilité;
- $\varepsilon_a$  : variable d'écart permettant d'apprécier la flexibilité résiduelle de l'acteur (a) à la fin de l'activité;
- $t_p$  : Taux de pénalité par période;
- $LV$  : (en jours) nombre de jours réel de l'activité
- $SV = Ent[(LV - 1)/5] + 1$  : Nombre réel de semaines de l'activité;
- $L$  : (en jours) nombre contractuel de jours de l'activité
- $S = Ent[(L - 1)/5] + 1$  : Nombre contractuel de semaines de l'activité;
- $\delta_{i,j}$  : (binaire) variable permettant de savoir si une tâche doit être réalisée le jour (j) ou pas,  
 $\delta_{i,j} = 1$  si la tâche (i) se déroule le jour (j),  $\delta_{i,j} = 0$  si non

- $\omega_{a,k,i,j}$  : (en heures) travail effectué par l'acteur (a) pour sa compétence (k) sur la tâche (i) le jour (j);
- $\omega_k$  : (en heures) travail global des acteurs sur la compétence (k);
- $m$  : nombre de douzaine de semaines qu'il y a dans  $LV$ ,  
 $0 \leq m \leq Ent[(LV - 1)/(5 * 12)] + 1$ ;
- $EE_k$  : effectif équivalent des acteurs sur la compétence (k);
- $Q_{k,l}$  : capacité globale équivalente des acteurs sur la durée contractuelle de l'activité;
- $q_{k,j}$  : capacité équivalente des acteurs ayant la compétence (k) pour le jour (j);
- $W_k$  : charge globale de la compétence (k);
- $W_{k,j}$  : charge globale sur la compétence (k) pour le jour (j);

### II-3. Hypothèses de la modélisation

Nous considérons le cas d'une entreprise constituée de ( $K$ ) compétences et devant réaliser une activité, répondant aux hypothèses suivantes :

*H1* : l'ordonnancement des tâches est connu ainsi que la durée en jours ( $L$ ) contractuelle de l'activité ;

*H2* : les charges estimées par tâche et par compétence  $w_{i,k}$  sont connues ;

*H3* : la durée d'exécution de chaque tâche est variable  $(D_i^{\min} \leq d_i \leq D_i^{\max})$  ;

*H4* : l'entreprise dispose à tout moment une évaluation de l'efficacité de ses acteurs dans leurs compétences respectives ;

*H5* : les acteurs de l'entreprise travaillent sur des horaires modulables ;

*H6* : toutes les tâches se déroulent sans interruption.

### II-4. Modélisation des contraintes

Nous distinguons quatre grandes familles de contraintes qui sont représentées par un ensemble d'équations de type « égalité » ou « inégalité ». Pour respecter la modulation du temps de travail, nous travaillons autour d'un horaire hebdomadaire moyen  $C_{s0}$ .

#### II-4-1. Les contraintes temporelles et d'antériorités

Ces contraintes décrivent l'ordonnancement de l'activité. Les dates de début et fin de chaque tâche ainsi que leur durée standard sont consignées dans un réseau logique.

### - Définition de la durée de réalisation des tâches

Chaque tâche est définie par le nombre de compétences qu'elle utilise, sa charge dans chacune de ces compétences et ses durées minimale et maximale de réalisation. Définir le début de chaque tâche revient à identifier le début de la charge pour chacune de ses compétences. La durée de chaque tâche considérant sa charge par compétence est calculée comme la différence entre la date de fin et la date de début de réalisation de cette partie de la tâche.

$$df_{i,k} = dd_{i,k} + d_{i,k} \Leftrightarrow d_{i,k} = df_{i,k} - dd_{i,k} \quad \forall i \forall k$$

$$D_i^{\min} \leq d_{i,k} \leq D_i^{\max} \quad (1)$$

### - Les contraintes d'antériorité des tâches (utilisation de la méthode des potentiels)

L'ordonnancement de l'activité permet la mise en évidence des différents liens qui existent entre les tâches. Il existe quatre types de liens entre les tâches.

Pour une modélisation simple, nous considérons deux tâches  $i$  et  $n$ , et  $n$  est une tâche antécédente de ( $i$ ), on aura :

- Fin-Début : la fin de ( $n$ ) autorise le début de ( $i$ ) :

$$dd_i \geq dd_n + d_n + \alpha_{i,n} \quad (2)$$

- Fin-Fin : la fin de ( $n$ ) autorise la fin de ( $i$ ) :

$$dd_i \geq dd_n + d_n - d_i + \alpha_{i,n} \quad (3)$$

- Début-Début : le début de ( $n$ ) autorise le début de ( $i$ ) :

$$dd_i \geq dd_n + \alpha_{i,n} \quad (4)$$

- Début-Fin, le début de ( $n$ ) autorise la fin de ( $i$ ) :

$$dd_i \geq dd_n + d_i + \alpha_{i,n} \quad (5)$$

Dans un réseau logique, une tâche peut avoir plus d'un antécédent, dans ce cas la date de début de cette tâche sera alors le maximum de  $(dd_i)$  de cette tâche.

### II-4-2. Les contraintes de modulation d'horaire

Ces contraintes sont liées à la réglementation du temps de travail et permettent de limiter le travail des acteurs.

- **Respecter la capacité journalière des acteurs :**

$$\omega_{a,k,i,j} \leq DMaxJ; \omega_{a,k,i,j} \geq 0; \forall a \forall k \forall i \forall j \quad (6)$$

Par exemple, la charge de travail journalière d'un acteur ne dépasse pas les 10 heures.

- **Respecter la capacité des acteurs :**

Pour une semaine donnée, le travail effectué par un acteur doit pouvoir respecter sa capacité hebdomadaire disponible.

$$\begin{aligned} \psi_{a,s} &\leq DMaxMod * \beta_{a,s} + HS_{a,s}, \\ \forall a \forall s \forall k \quad \psi_{a,s} &\geq 0 \quad HS_{a,s} \geq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

- **Respecter la durée réglementaire de travail hebdomadaire :**

Pour une semaine, on parlera de travail supplémentaire lorsque le travail réalisé par un acteur dépasse la capacité maximale de modulation ( $DMaxMod$ ) contenue dans les accords d'entreprise.

$$\begin{aligned} \psi_{a,s} > DMaxMod &\Leftrightarrow HS_{a,s} = \psi_{a,s} - DMaxMod, \\ HS_{a,s} + DMaxMod &\leq DMaxS, \forall a \forall s \end{aligned} \quad (8)$$

- **Respecter pour chaque tâche sa charge dans la compétence (k) :**

Cette contrainte permet de couvrir la totalité de la charge d'une tâche dans

$$\text{une compétence} \quad \sum_{a=1}^{A_k} \sum_{j=1}^{d_{i,k}} \sigma_{a,k,i} * \omega_{a,k,i,j} * \theta_{a,k} = w_{i,k}, \forall i \forall k \quad (9)$$

- **Respecter le volume annuel d'heures supplémentaires par acteur :**

$$\sum_{s=0}^{Enl[(LV-1)/5]} HS_{a,s} \leq HSA - HSR_a \quad \forall a \quad (10)$$

avec  $HSR_a$  les heures supplémentaires déjà réalisées par l'acteur (a) avant affectation de l'activité considérée.

- **Respecter la capacité pour une période de douze semaines consécutives :**

$$\begin{aligned} (Enl[(LV-1)/5] + 1) \geq 12 &\Rightarrow \sum_{s=m}^{m+1} \psi_{a,s} \leq D12S, \\ \forall a, \forall k \text{ et } m &= 0, 1, \dots, Enl[(LV-1)/(5*12)] \end{aligned} \quad (11)$$



**II-4-3. Les contraintes de compétence et de disponibilité**

**- Contrainte sur l'efficacité d'un acteur**

Cette équation n'est pas une contrainte proprement dite mais un paramétrage : une entreprise se fixe un niveau minimum  $(g)$  pour autoriser l'affectation d'un acteur sur une tâche :

$$g \leq \theta_{a,k} \leq 1; \forall a \forall k \tag{12}$$

**- Contrainte de disponibilité des acteurs**

Dans le cadre de notre modèle, la notion de disponibilité sera liée à la semaine. La disponibilité d'un acteur à la semaine (s) dépend de son occupation à la semaine précédente (s-1) :

$$\beta_{a,s} = 2 - \tau_{a,s-1}, \quad \beta_{a,s} \geq 0 \quad \forall a \forall s \tag{13}$$

Où  $\tau_{a,s}$  le taux de d'occupation de l'acteur (a) à la semaine (s), ce taux est fonction du travail de l'acteur dans la semaine considérée et n'est pas lié aux travaux supplémentaires qu'il pourrait faire, car ceux-ci bénéficient d'une autre régime dictée par la réglementation du temps de travail (repos compensateurs, bonus salarial, ...).

Appelons  $(\psi_{a,s})$  le travail hebdomadaire d'un acteur :

$$\psi_{a,s} = \sum_{j=5s+1}^{5(s+1)} \omega_{a,k,i,j}, \quad \forall a \forall k; s=0,1,\dots, Ent[(LV-1)/5] \tag{14}$$

$$\tau_{a,s} = \left( \frac{\psi_{a,s} - HS_{a,s}}{C_{s0}} \right), \quad 0 \leq \tau_{a,s} \leq \frac{DMaxMod}{C_{s0}} \tag{15}$$

$$\varepsilon_a = 1 - \frac{\sum_{s=0}^{Ent[(LV-1)/5]} \tau_{a,s}}{SV}, \quad \forall a \text{ et } -1 \leq \varepsilon_a \leq 1 \tag{16}$$

$\varepsilon_a$  est une variable d'écart permettant d'apprécier la flexibilité résiduelle des acteurs à la fin de l'activité. C'est une variable permettant de lisser le travail des acteurs au cours de l'affectation. L'idéal serait que la variable  $(\varepsilon_a)$  soit plus proche de zéro.

#### II-4-4. La contrainte d'affectation

Pour chaque tâche donnée, un acteur ne peut être affecté que pour une seule de ses compétences :

$$\sum_{k=1}^{nk_a} \sigma_{a,k,i} = 1; \quad \forall a \forall i \quad (17)$$

#### II-5. La fonction objective

Dans ce travail, nous cherchons à minimiser un coût global qui résulte de cinq origines :

##### F1 : Coût du travail normal (sans charges supplémentaires) :

La fonction F1 permet de calculer le coût salarial du travail effectif réalisé sur une activité sans les travaux supplémentaires. :

$$F1 = \sum_{a=1}^A \sum_{s=0}^{Ent[(L-1)/5]} (\psi_{a,s} - HS_{a,s}) U_a = \sum_{a=1}^A \sum_{s=0}^{Ent[(L-1)/5]} \left[ \left( \sum_{j=5s+1}^{5(s+1)} \sigma_{a,k,i} * \omega_{a,k,i,j} \right) - HS_{a,s} \right] U_a \quad (18)$$

##### F2 : Coût des travaux supplémentaires

Vu les surcoûts qu'occasionnent les heures supplémentaires, il faut utiliser au mieux les acteurs en se servant de leur polyvalence pour minimiser ces surcoûts. :

$$F2 = \sum_{a=1}^A \left( \sum_{s=0}^{Ent[(L-1)/5]} HS_{a,s} * u \right) U_a \quad (19)$$

##### F3 : Coût d'immobilisation du résultat

Lorsque la date de fin réelle est antérieure à la date de fin contractuelle, les résultats de l'activité doivent être stockés, en attendant leur livraison : pour cela nous tenons compte du coût de l'immobilisation financière :

$$L > LV \Rightarrow F3 = UI(L - LV) \quad (20)$$

##### F4 : Coût de pénalité de retard

Nous supposons dans ce cas que la date de fin réelle coïncide avec la date de livraison et dépasse la date de fin contractuelle de l'activité. La fonction de pénalité est définie comme une sommation par période de pénalité dans la

mesure où le taux de pénalité peut être fixé par tranche de jours que nous appelons période.

$$LV > L \Rightarrow F4 = \sum_{p=0}^{Ent[(LV-L)/P]} UP * t_p \tag{21}$$

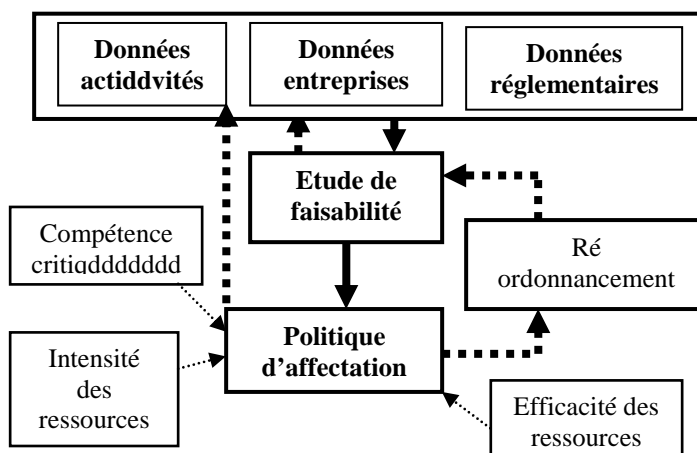
**F5 : Coût fictif associé à la flexibilité**

Cette fonction représente un coût fictif à l’utilisation rationnelle des acteurs , elle permettra de préserver un minimum de flexibilité :

$$F5 = \sum_{a=1}^A UF_a * \epsilon_a \tag{22}$$

**III – RÉSULTATS ET DISCUSSION**

Nous présentons une première démarche méthodologique qui nous a permis de résoudre quelques exemples. Cette démarche regroupe deux aspects successifs: l’un concerne la vérification de la faisabilité de l’activité; l’autre concerne le choix d’affectation des acteurs en fonction de leur efficacité dans les compétences concernées et de leur disponibilité (*Figure 1*). Ces deux points cités plus haut utilisent simultanément deux caractéristiques (le nombre et l’efficacité des ressources) en vue de dégager les différentes décisions quant à l’affectation des acteurs sur les tâches.



**Figure 1 : Démarche méthodologique générale**

**III-1. Inter comparaisons et analyses élémentaires**

L’étude de la faisabilité permet d’évaluer la capacité de l’entreprise à réaliser l’activité. Elle se fait à deux niveaux distincts ; un niveau global où nous

considérons l'ensemble des tâches de l'activité et la capacité globale des acteurs, et un niveau détaillé qui permet d'identifier pour chaque jour les tâches ordonnancées et d'évaluer la disponibilité des acteurs susceptibles d'être affectés.

### III-1-1. Faisabilité globale

Dans le calcul global, nous considérons que tous les acteurs sont disponibles. Nous prenons chaque compétence indépendamment de l'autre.

#### - Calcul des capacités globales des acteurs :

La capacité est le travail réalisable par les acteurs dans la limite de la loi sur la réglementation du temps de travail. Tenant compte de l'efficacité par compétence des acteurs, la capacité globale par compétence peut varier tout en gardant l'effectif des acteurs constant. Appelons  $(Q_{k,L})$  la capacité globale équivalente que peut supporter l'ensemble des acteurs ayant l'efficacité non nulle dans la compétence (k) pendant l'ensemble de la période (L).

$$Q_{k,L} = C_{s0} \left( 1 + \frac{HSA}{DSA} \right) * S * EE_k ; \forall k \quad \text{où} \quad EE_k = \left( \sum_{a=1}^{A_k} \theta_{a,k} \right)_{\theta_{a,k} \geq \theta_{\min}} , \forall k \quad (22)$$

#### - Charge globale par compétence :

Pour chaque tâche, est connue sa charge estimée par compétence  $(w_{i,k})$ ; ainsi, nous calculons la charge globale par compétence :

$$W_k = \sum_{i=1}^{I_k} w_{i,k} ; \forall k \quad (22)$$

#### - Besoin global :

Globalement, pour que l'activité soit faisable, il faut pour chaque compétence, que  $Q_{k,L} \geq W_k \quad \forall k$ .

Autrement, nous calculons la capacité moyenne par acteur  $(C'_{s0,k})$  nécessaire pour satisfaire la charge globale. A la limite :

$$Q_{k,L} = W_k \Rightarrow C'_{s0,k} \left( 1 + \frac{HSA}{DSA} \right) * EE_k * S = W_k \Leftrightarrow$$

$$C'_{s0,k} = \frac{W_k}{\left( 1 + \frac{HSA}{DSA} \right) * S * EE_k}, \quad \forall k \tag{22}$$

- Si  $C'_{s0,k} > C_{s0}$ , on a la certitude que la réalisation de l'activité ne pourra se faire qu'en recourant à la modulation d'horaire et toutefois en condition que  $C'_{s0,k} \leq DMaxMod$  ;
- Si  $C'_{s0,k} > DMaxMod$ , l'activité n'est pas réalisable en l'état actuel des ressources (effectif + efficacité) de l'entreprise.
- Si  $C'_{s0,k} \leq C_{s0}$  ou si  $C'_{s0,k} \leq DMaxMod$ , on a aucune certitude sur la faisabilité. Une étude plus détaillée set nécessaire.

### III-1-2. Étude détaillée

En vu d'étudier l'adéquation entre la charge et la capacité par une étude détaillée, nous minimisons les plans de charge des acteurs en étirant les tâches au maximum possible : leur durée est provisoirement (pour les besoins de ce test). On considère ensuite l'ensemble des tâches utilisant une même compétence à une période donnée.

#### - Charge journalière par compétence :

Si nous appelons  $D_i$  la durée standard de la tâche (i), et  $w_{i,k}$  sa charge dans la compétence (k), la charge journalière globale pour la compétence (k) est donnée par :

$$W_{k,j} = \sum_{i=1}^{I_k} \frac{w_{i,k}}{D_i + MT_i} * \delta_{i,j}, \quad \forall k, j \tag{22}$$

Où  $w_{i,k} / (D_i + MT_i)$  est la charge journalière standard estimée de la tâche  $(i)$  sur la compétence (k).

#### - Capacité journalière par compétence :

Pour simplifier, nous supposons disponible tous les acteurs. Appelons  $q_{k,j}$  la capacité équivalente journalière pour l'entreprise sur la compétence (k) :

$$q_{k,j} = \left( \sum_{a=1}^{A_k} \frac{C_{s0}}{5} \left( 1 + \frac{HSA}{DSA} \right) * \theta_{a,k} \right)_{\theta_{a,k} \geq \theta_{\min}}, \forall j \text{ avec } k=1,2,\dots,K \quad (22)$$

Pour satisfaire le calcul des besoins journaliers, il faut que la capacité journalière équivalente soit supérieure ou égale à la charge de cette activité dans la compétence considérée, soit :  $q_{k,j} \geq W_{k,j}, \forall k \forall j$ . Comme pour l'analyse globale, si ce test n'est pas vérifié, on conclura la non faisabilité de l'activité. La réciproque n'est pas toujours vraie.

### III-2. Politique d'affectation

Une fois passés (avec succès) les tests des faisabilités globale et au niveau détaillé, les tâches sont « remises » à leurs durées standard – par la suite, ces durées pourront au besoin, au cas par cas pour chaque tâche (i), être modifiées dans l'intervalle  $[D_i^{\min}, \min(D_i + MT_i; D_i^{\max})]$ ; reste ensuite le problème de l'affectation des ressources. Cette affectation se fait en deux temps successifs : d'abord pour toute tâche, identification des compétences requises, puis pour chacune de ces compétences, affectation d'un ou plusieurs acteurs.

L'examen précédent des charges globales et périodiques nous permet de définir un ordre prioritaire de traitement des compétences :

#### - Notion de compétence critique

Lors du calcul des charges globales par compétence, nous avons déterminé, pour chacune des compétences, une disponibilité  $C'_{s0,k}$  nécessaire pour que l'activité soit réalisable dans le délai imparti pour la compétence (k): ces disponibilités nécessaires nous aident à hiérarchiser l'ordre de traitement des compétences, sachant que les compétences les plus chargées seront les plus « rares », et qu'il conviendra de réserver les acteurs disponibles au plus tôt – avant ceux qui représentent les compétences les moins précieuses dans l'activité.

Une fois établi l'ordre de traitement des compétences en fonction de cette « criticité » (qui représente une rareté relative), le choix des acteurs peut se faire selon deux critères, quantitatifs et qualitatifs :

#### - Critère quantitatif : l'intensité de l'affectation

L'intensité de l'affectation consiste à jouer sur le nombre de ressources affectées à une tâche, tout d'abord pour équilibrer la charge requise et la durée ; ce problème est ensuite récurrent : d'une part, l'efficacité des

ressources choisies (pas nécessairement nominale, pour des raisons de disponibilité) peut modifier cette durée ; d'autre part, les mêmes problèmes de disponibilité peuvent inciter le planificateur à une modification sensible de la durée (toujours dans l'intervalle  $[D_i^{\min}, \min(D_i + MT_i; D_i^{\max})]$ ) ... ce qui a un impact sur l'effectif nécessaire. Notons au passage que du fait de la modulation d'horaire, les interactions entre intensité d'affectation et durée de la tâche ne sont pas linéaires.

### - Critère qualitatif : efficacité des ressources

La prise en compte de l'efficacité des ressources consiste à affecter en priorité sur les tâches les acteurs disponibles d'efficacité maximale – de manière à minimiser à la fois le travail nécessaire (donc le coût) et l'impact sur la durée de la tâche. La contrainte de disponibilité des acteurs peut bien entendu entraîner l'affectation de ressources non optimales (recours à la polyvalence)...

## III-3. Exemple illustratif

### III-3-1. Le problème

Pour illustrer notre démarche, nous présentons un cas simple: une activité composée de 4 tâches, 3 acteurs et 3 compétences. Les données sont consignées dans les tableaux 1, 2 et 3; l'ordonnancement initial et l'évolution de la charge par compétence sont donnés par les **Figures 2 et 3**.

$$L = 15j \Rightarrow S = \{Ent[(L-1)/5] + 1\} = 3s$$

**Tableau 1 :** Données activités : charge par compétence et les différentes durées

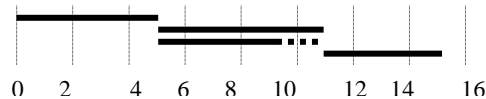
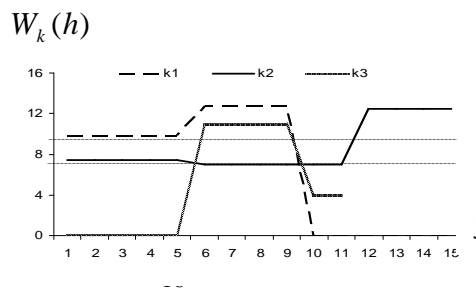
	k1	k2	k3	$D_i^{\min}$	$D_i$	$D_i^{\max}$	$MT_i$
i1	49h	37h	0	3j	5j	7j	0
i2	0	42h	24h	5j	6j	7j	0
i3	50h	0	28h	3j	4j	7j	2j
i4	0	50h	0	3j	4j	6j	0

**Tableau 2 :** Donnée entreprise : efficacité par compétence

	k1	k2	k3
a1	1	0	0,8
a2	0,8	1	0
a3	0	0,7	1

**Tableau 3 : Données réglementaires**

$C_{s0}$	$DMaxMod$	$HSA$	$DSA$	$DMaxJ$
35 h	39 h	180 h	1600 h	10 h

**Figure 2 : Gantt initial (en jour)****Figure 3 : Evolution de la charge par compétence**

Nous constatons que l'activité est infaisable sans polyvalence.

### III-3-2. Faisabilité globale

Calcul de la charge globale par compétence et de l'effectif équivalent (**Tableau 4**); de la capacité globale par compétence (**Tableau 5**).

**Tableau 4 : Charge global et effectif équivalent par compétence**

	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>
$W_k$ (h)	93	129	52
$EE_k$	1,8	1,7	1,8



Charge globale  $\sum_{k=1}^3 W_k = 274 \text{ heures}$

**Tableau 5 : capacité équivalente des acteurs**

$Q_{k,L} \text{ (h)}$	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>
	195	184	173,3

Après avoir validé la faisabilité globale, nous allons la vérifier au niveau détaillé.

**III-3-3. Etude détaillée**

Il s’agit d’abord de calculer la charge moyenne journalière par compétence (Tableau 6) en tenant compte de l’ordonnement; ensuite nous calculons la capacité journalière par compétence (**Tableau 7**) disponible en tenant compte des heures supplémentaires.

**Tableau 6 : Charge journalière par compétence**

$W_{k,j}$ (h)		<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
	<b>k1</b>	8,4	8,4	8,4	8,4	8,4	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	8,5	0	0	0	0
	<b>k2</b>	7,4	7,4	7,4	7,4	7,4	7	7	7	7	7	7	12,5	12,5	12,5	12,5
	<b>k3</b>	0	0	0	0	0	8,67	8,67	8,67	8,67	8,67	8,67	0	0	0	0

**Tableau 7 : Capacité journalière par compétence**

$q_{k,j} \text{ (h)}$	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>
	13	12,3	13

Vu que les conditions de faisabilité sont satisfaites, nous avons procédé à l’affectation proprement dite en tenant compte des caractéristiques du paragraphe 3.2. Une des solutions est représentée sous forme de diagramme de Gantt (**Figure 4**) et l’évolution du travail par acteur (**Figures 5, 6 et 7**).

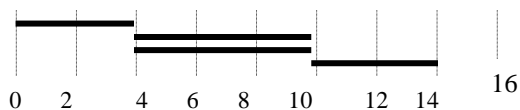


Figure 4 : Gantt final (en jour)

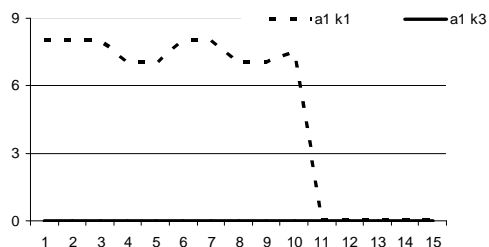


Figure 5 : Evolution du travail de l'acteur (a1)

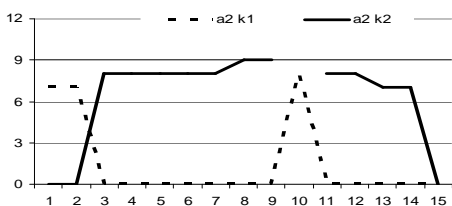


Figure 6 : Evolution du travail de l'acteur (a2)

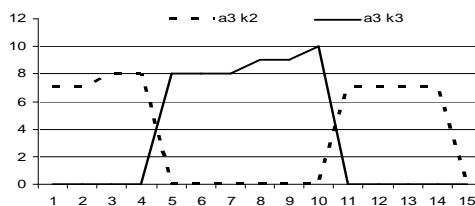


Figure 7 : Evolution du travail de l'acteur (a3)

Le résumé du travail global par compétence et par acteur après affectation est résumé dans le tableau 8 suivant :

Tableau 8 : Travail global par compétence et par acteur

$\omega_k$ (h)	k1	k2	k3	a1	a2	a3
	97,5	146	52	75,5	110	110

Le travail global pour l'entreprise est :

$$\sum_{k=1}^3 \omega_k = 295,5 \text{ heures}$$

dont 30,5 heures de travail en modulation et 8 heures de travail supplémentaire.

Notons que sans la polyvalence et la modulation d'horaire, la faisabilité de cette activité devenait impossible par le simple raison de manière classique pour chaque compétence on a un seul acteur qui ne peut pas réaliser les charges de sa compétence à cause des données réglementaires.

#### IV - CONCLUSION

L'affectation flexible des ressources dans la planification des activités industrielles se déroule sur deux phases essentielles. D'une part, l'adaptation de la charge à la capacité par période. Cette partie qui se déroule dans la partie faisabilité permet de lisser la charge selon la capacité de l'entreprise. D'autre part, le choix des acteurs sur les différentes tâches. A ce niveau, nous utilisons la polyvalence qui fournit des ressources non optimales pour augmenter le nombre de choix que l'on peut opérer sur les acteurs internes de l'entreprise. A partir de notre méthodologie qui nous a permis de simuler les premières solutions, nous développons à partir de l'algorithme génétique une méthode d'optimisation pour identifier la solution optimale.

#### RÉFÉRENCES

- [1] - P. BAPTISTE P., V. GIARD, A. HAÏT et F. SOUMIS, “Gestion de production et ressources humaines - Méthodes de planification dans les systèmes productifs”, Presses Internationales Polytechnique, (Juin 2005).
- [2] - EVERAERE, “Management de la flexibilité”, Editions Economica, (1997).
- [3] - EROL, “Prise en compte de la flexibilité dans la planification dynamique : Application à la flexibilité des ressources humaines”, Thèse de l'Institut National Polytechnique de Grenoble, spécialité : Génie Industriel, (1999).
- [4] - EVERAERE et P. PERRIER, “La flexibilité dans les organisations industrielles”, revue AG 3 100, Techniques de l'ingénieur, (1999).
- [5] - Inman, “Scheduling preventive overtime : a new approach for the automotive industry”, *IIE transactions ISSN 0740-817X*, Vol 28, (1996) 555-556
- [6] - KANE, “Étude de l'ajustement de la capacité à la charge pour une gestion quantitative des ressources humaines en production”, Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2001.
- [7] - HUNG, “Scheduling a workforce under annualized hours”, *Int. J. of Production Research*, vol. 37, n° 11 (1999) 2419-2427
- [8] - LOERCH, “An approach to production planning and scheduling in cyclically scheduled manufacturing systems”; *Int. J. of Production Research*, N°4, Vol.32 (1994)851 – 871,.
- [9] - GIARD V. et TRIOMPHE C., “SIAD permettant la définition des services offerts au personnel d'un centre de production”, Cahier de recherche du GREGOR, IAE de Paris, (1996).
- [10] - HOONG C. and S. CHONG, “Efficient Multi-skill Crew Rostering via Constrained Sets”, Information Technology Institute Singapore (1997).

- [11] - EDI K. H. DUQUENNE P. and J. M. LE LANN, “Prise en compte de l’efficacité dans la compétence des acteurs : caractéristique essentielle de la polyvalence”, 6<sup>e</sup> congrès international de génie industriel, Besançon France (juin 2005), 7- 10
- [12] - DUQUENNE P. EDI K. H., J.M. LE LANN, 2005. “Characterization and modelling of flexible resources allocation on industrial activities”, 7th World Congress of Chemical Engineering, Glasgow, Scotland; (juillet 2005), 10-14