



HAL
open science

Evaluation d'une Approche d'Affectation des Ressources Humaines aux Processus d'Entreprise

Meziane Bennour, Didier Crestani, Olivier Crespo, François Prunet

► To cite this version:

Meziane Bennour, Didier Crestani, Olivier Crespo, François Prunet. Evaluation d'une Approche d'Affectation des Ressources Humaines aux Processus d'Entreprise. MOSIM: Modélisation et Simulation, Sep 2004, Nantes, France. lirmm-00108821

HAL Id: lirmm-00108821

<https://hal-lirmm.ccsd.cnrs.fr/lirmm-00108821>

Submitted on 23 Oct 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EVALUATION D'UNE APPROCHE D'AFFECTATION DES RESSOURCES HUMAINES AUX PROCESSUS D'ENTREPRISE

M. BENNOUR¹, D. CRESTANI¹, O. CRESPO¹, F. PRUNET¹

¹ Laboratoire d'Informatique de Robotique et de Microélectronique de Montpellier
161 Rue Ada
34 392 MONTPELLIER Cedex 5, FRANCE
[<name>@lirmm.fr](mailto:irimm@lirmm.fr)

RESUME : *La gestion des ressources humaines s'impose comme l'un des points clé de la compétitivité des entreprises. L'utilisation efficace de leurs compétences s'avère indispensable à la satisfaction des objectifs de performance imposés. Nous évaluons dans cet article un algorithme d'affectation des ressources humaines utilisant une méthodologie d'estimation de performance des processus d'entreprise prenant en compte l'impact des compétences du personnel. L'efficacité de cet algorithme, qui s'appuie sur une approche dichotomique itérative, est comparée avec des algorithmes classiques de type Hybride Tabou-Descente ou recuit simulé. L'étude porte sur des exemples de processus d'entreprise de moyenne et grande complexité analysés selon un point de vue financier.*

MOTS-CLES : *Allocation des ressources humaines – Performance – Compétence – Modélisation d'entreprise*

1. INTRODUCTION

Souvent négligé depuis l'avènement de l'automatisation dans l'étude des systèmes de production, l'impact de l'entité humaine sur le fonctionnement de l'entreprise semble aujourd'hui indiscutable. Ses capacités cognitives en font encore, et pour longtemps, un acteur incontournable des processus industriels. Cependant, les capacités et les comportements de l'entité humaine sont à la base de l'introduction de nouveaux critères classants permettant de reconnaître une compétence professionnelle au-delà de la seule qualification du poste [6]. De nouveaux critères d'évaluation de ce dernier apparaissent. L'autonomie, la responsabilité, le relationnel s'ajoutent aux critères traditionnels de compétences requises (formation, expérience) et de complexité du travail [20]. Cette évolution s'éloigne d'une classification de métiers et de postes pour soutenir des organisations de travail plus réactives, en réponse à l'accélération du changement et à la différenciation de la demande [22]. Un nouveau modèle en devenir semble donc émerger, le modèle de compétence [26]. Il repose sur l'engagement et la valorisation des salariés et met en avant la coopération, l'autonomie et la responsabilité [22].

L'étude proposée dans cet article s'appuie sur une méthodologie d'estimation des performances des processus d'entreprise [8] développée en collaboration avec le laboratoire LGI2P des Mines d'Alès et l'Industriel Merlin Gerin. Ce projet visait à étudier, en détectant et en analysant, des dysfonctionnements organisationnels des processus d'entreprise en tenant compte de l'entité humaine. A partir de ce travail, nous avons proposé dans

[5] une approche d'affectation des ressources humaines, s'appuyant sur un algorithme dichotomique, permettant de déterminer des affectations satisfaisant un objectif de performance temporelle imposé.

Le présent article est organisé de la façon suivante : Dans un premier temps nous expliciterons les contraintes pouvant être imposées lors de l'affectation d'entités humaines et nous préciserons les limites et hypothèses de notre étude. Nous résumerons ensuite l'approche dichotomique développée avant de détailler l'approche d'évaluation suivie selon l'axe de performance Financier, où nous comparerons notre approche avec des algorithmes de type Hybride Tabou-Descente et recuit simulé. Avant de conclure, nous commenterons les résultats de notre approche à l'aide de tableaux synthétiques et graphes.

2. CONTEXTES DE L'ETUDE

2.1. L'allocation des ressources humaines

Les problèmes de management des ressources humaines dépendent de l'horizon temporel pour lequel les décisions d'allocation doivent être prises [12]. On distingue classiquement trois niveaux de décision (stratégique, tactique et opérationnel) correspondant respectivement à aux horizons de temps (long terme, moyen terme et court terme) [15]. L'horizon de temps auquel nous nous sommes intéressés est le court terme. L'objectif dans ce dernier est d'ordonner et d'allouer les ressources en fonction d'objectifs opérationnels (durée et date d'échéance des tâches, coût, etc.) [14] [21].

Au niveau opérationnel (court terme), les approches d'allocation des ressources humaines, doivent, en théorie du moins, intégrer un grand nombre de contraintes.

Tout d'abord il est indispensable d'affecter aux différentes activités d'un processus des employés possédant les compétences requises. Cette **contrainte de compétence** bien qu'évidente est explicitée dans les modèles d'entreprise [25] où l'on distingue les compétences acquises et requises. Elle est cependant peu prise en compte dans la littérature [10] [14] [18] et n'inclut pas toujours la dimension collective du travail.

La **contrainte quantitative** qui définit le nombre d'employés devant être assignés à une activité est exprimée par exemple dans la formulation de Dantzig [9] du problème d'ordonnement.

La **contrainte de disponibilité** des ressources humaines intègre de nombreux facteurs relevant de l'environnement socio-économique de l'entreprise tels que, les congés, les limites légales de travail, etc. Pour cette classe de contrainte on distingue en ordonnancement [11] les problèmes relevant du day-off scheduling, du shift scheduling et du tour scheduling.

Enfin, à ces contraintes s'ajoute celle de satisfaction des objectifs de performance imposés par l'entreprise. Cette **contrainte d'objectif** n'est exprimée en général qu'à travers la vue strictement temporelle et néglige les autres facettes de la performance que sont les points de vue financier et qualité par exemple.

Il ressort donc de ce rapide tour d'horizon que l'allocation des ressources humaines doit satisfaire à un grand nombre de contraintes, induisant l'explosion combinatoire du problème, et qu'aucune des approches actuelles ne permet d'intégrer simultanément. Ce constat étant effectué, nous allons maintenant préciser sur quelles bases s'appuie notre démarche et quelles en sont ses limites.

2.2. Fondements de la démarche et contextes d'étude

Plusieurs études ont montré que peu de travaux ont cherché à intégrer l'impact des compétences sur la réalisation des activités d'un processus industriel [14] [24].

Certaines d'entre elles ne considèrent l'entité humaine que comme une ressource classique pouvant être disponible ou occupée [3]. D'autres prennent en compte l'évolution du savoir-faire des employés (ou groupes d'employés) en modélisant l'évolution de leur maîtrise du travail [1]. Enfin d'autres encore utilisent des modèles plus complexes et prennent en compte différents niveaux de compétence [13] [18]. Celle-ci alors est décomposée en savoir, savoir-faire et savoir être [17].

Les travaux sur l'estimation de performance des processus d'entreprise que nous avons mené avec notre partenaire industriel [4] [7] [8], et que nous ne détaillerons pas ici faute de place, relèvent de cette

dernière approche d'intégration des compétences. Les points remarquables suivants peuvent en être dégagés :

- Tout domaine métier d'une activité est caractérisé par un ensemble de compétences individuelles et collectives.
- L'impact (le poids) de chacune de ces compétences est évaluée par une méthode multicritère telle que AHP [23].
- Des lois, définies avec l'industriel, permettent de rendre compte, l'impact des compétences acquises par les employés sur la performance d'une activité [4].
- Des lois d'agrégation permettent d'intégrer l'influence des compétences requises, et l'apport des compétences acquises, pour calculer, selon un point de vue donné, la performance engendrée par les acteurs affectés à une activité [4].
- Dès lors, pour un comportement donné du processus, il est possible d'estimer, pour un ensemble d'acteurs donné, la performance engendrée par le processus lors de son exécution.

La méthodologie développée s'appuie sur une modélisation fine et dynamique des compétences intégrant, pour un contexte donné, à la fois la dimension individuelle et collective du travail. Elle s'appuie cependant comme d'autres études [2] sur de nombreux coefficients de pondération toujours difficiles à caractériser mais aussi sur des lois empiriques et de bon sens liant compétence et performance.

Notre méthodologie suppose qu'initialement, pour un point de vue donné, la performance d'une activité est caractérisée par sa valeur Nominale P_N non nulle. En se basant sur les hypothèses de travail précédentes, nous avons formalisé l'impact des compétences des ressources humaines sur la performance nominale d'une activité. Le résultat de ce travail conduit pour la performance d'une activité P_A à la formulation suivante (équation 1) :

$$P_A = (1 + \lambda_A) \cdot P_N \cdot \sum_m \left[(1 + \delta_m) \cdot \beta_m \cdot \sum_k \alpha_{mk} \cdot (1 + \gamma_{mk}) \right] \quad (1)$$

β_m Poids d'un domaine métier m dans P_N

α_{mk} Poids d'une compétence k dans un domaine métier m

γ_{mk} Taux de modulation d'une compétence k d'un domaine métier m

δ_m Taux de modulation traduisant l'aspect relationnel intra-métier

λ_A Taux de modulation traduisant l'aspect relationnel inter-métier

$\lambda_A, \delta_m, \beta_m, \alpha_{mk}, \gamma_{mk}$ représentatifs du point de vue considéré

Le but de notre étude est de déterminer quels ensembles d'acteurs il est possible d'envisager d'affecter aux différentes activités d'un processus d'entreprise, lorsque ce dernier s'exécute selon un scénario donné, pour satisfaire un objectif de performance imposé. Dès lors, le processus peut-être alors appréhendé comme étant représentatif d'un séquençement prédéterminé d'activités, s'exécutant dans le temps mais pour lequel on ne connaît pas les durées opératoires réelles tant locales que globales.

Outre cette contrainte d'objectif, nous prendrons en compte au niveau des activités des contraintes quantitatives fixées au niveau de chacun des domaines métiers impliqués. En revanche, nous supposons que nous disposons, pour chacune des activités du processus, d'ensemble initiaux de choix d'acteurs satisfaisant les contraintes de compétences définies et nous supposons que les acteurs seront disponibles. Le contexte et les limitations de l'étude étant maintenant clairement définis nous allons maintenant préciser nos hypothèses de travail.

2.3. Hypothèses de travail

Tout d'abord, la méthodologie d'estimation de performance dont les principales caractéristiques viennent d'être rappelées permet, pour un point de vue donné (coût, etc.), de déterminer la performance associée à une activité d'un processus pour l'ensemble (combinaison / choix) d'acteurs que l'on choisit de lui affecter. Il est donc possible d'estimer, à partir des ensembles d'acteurs satisfaisant les contraintes prises en compte, toutes les performances pouvant être générées par une activité donnée pour toutes les combinaisons d'acteurs envisageables. Dès lors, il est aisé d'ordonner, pour chaque activité, les n combinaisons d'acteurs retenus, en fonction de la performance qu'elles engendrent. Ainsi, dans la Figure 1, l'axe vertical désigne l'axe temporel sur lequel chaque choix est reporté en fonction de sa performance estimée en durée. Ainsi, le Choix 1 (Choix n) est celui qui donne la durée minimale (maximale).

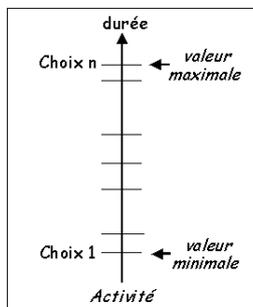


Figure 1. Classement local des choix d'affectation

Il est important pour la suite de l'exposé de noter que le calcul de la performance globale d'un processus fait appel à des lois permettant d'agréger les performances des activités (et donc des acteurs) impliqués dans le comportement choisi. Les lois d'agrégation choisies préservent une relation mathématique forte, la relation d'ordre. En effet, ont été retenues :

- Selon un point de vue temporel, une loi max permettant d'intégrer la synchronisation d'activités.
- Selon un point de vue financier, une loi additive permettant d'ajouter les coûts engendrés par l'exécution des différentes activités.

Il est aussi très important de remarquer que, contrairement à beaucoup d'études nous ne nous intéressons pas ici à la recherche de la solution d'allocation optimale et cela pour deux raisons. Tout

d'abord, avec l'approche d'estimation de performance retenue, il nous est facile de trouver cette (ces) configuration(s). Il suffit en effet d'assigner à chacune des activités d'un processus les acteurs permettant d'atteindre les optimum locaux (temps le plus court par exemple). Il est clair cependant que, s'il nous est possible d'identifier facilement ces configurations lorsque l'on considère un seul point de vue de la performance, la prise en compte simultanée de plusieurs d'entre eux ne nous permettrait alors pas de dégager aisément la meilleure solution. D'autre part, il est bien connu qu'au niveau opérationnel, dans l'entreprise, la solution optimale ne pourra jamais être atteinte. Il paraît donc plus raisonnable de vouloir plutôt fixer un objectif de performance moins exigeant mais qui pourra être réellement obtenu.

Enfin, de façon à mettre à disposition de l'utilisateur l'approche la plus efficace possible nous chercherons, pour satisfaire un objectif de performance donné, à mettre en évidence, le maximum de solutions d'affectation possible dans un temps limité à 1 seconde.

Le cadre de notre étude étant délimité nous allons maintenant décrire l'approche d'affectation développée.

3. L'APPROCHE DICHOTOMIQUE

La complexité du problème étant très importante, il n'est pas possible d'envisager de déterminer une solution exacte au problème posé. Nous nous sommes donc tourné vers une méthode heuristique faisant appel à une recherche locale itérative. Nous proposons d'utiliser une approche dichotomique locale tirant profit, au niveau de chaque activité, du classement des combinaisons d'acteurs assignables, en fonction de la performance correspondante engendrée.

Ce classement nous permet d'introduire la notion d'un choix pivot d'affectation engendrant une performance elle-même pivot, Perf_P, pour une activité (Figure 2). Le choix pivot divise chacun des ensembles de combinaisons d'affectation possibles en deux parties. D'une part l'ensemble Csup des combinaisons qui permettent d'obtenir une performance supérieure à la performance pivot. D'autre part l'ensemble Cinf des combinaisons qui conduisent à une performance inférieure ou égale à la performance pivot.

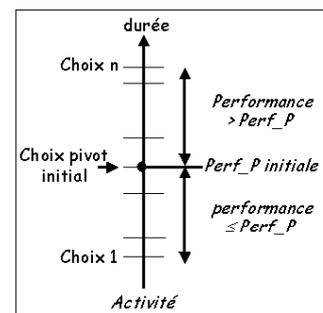


Figure 2. Choix pivot et performance

Ainsi, si les choix pivots sont fixés pour toutes les activités, une seule simulation, pour cette unique configuration d'affectation, permet de conclure globalement, pour un nombre important de configurations, sur la satisfaction de l'objectif de performance donné. Cette conclusion ne peut être obtenue que parce que nous utilisons des lois d'agrégation des performances locales des activités d'un processus qui préservent la relation d'ordre. Par exemple, supposons que l'on cherche à trouver les affectations permettant de garantir une durée limite maximale d'exécution d'un processus. Si cet objectif est atteint pour les choix pivots retenus, il est nécessairement aussi satisfait pour tous les ensembles Cinf de chacune des activités.

La structure de l'algorithme DICH0 développé (Figure 3) est constituée de trois étapes principales : l'initialisation, l'algorithme de recherche dichotomique pour une activité, et la détermination des résultats finaux.

Initialisation	Test extrémités globales	
	Initialisation pivots	
	Ordre de traitement	
	Calcul nombre de solutions	
Pour chaque activité	Test extrémités locales	
	Dichotomie	Restriction échec ou réussite
		Placer pivot
		Test blocage
		Calcul nombre de solutions
Résultats finaux		

Figure 3. Structure de l'algorithme DICH0

L'initialisation permet, de placer les choix pivots initiaux, de vérifier que l'objectif de performance est atteignable, et de fixer l'ordre de traitement des activités. En effet l'approche d'estimation de la performance nous permet de traiter les activités dans un ordre quelconque. Le choix de ce dernier qui peut influencer de façon non négligeable l'évolution de l'algorithme est fixé à l'aide d'une heuristique. On cherchera à traiter en priorité les activités dont la performance moyenne est importante par rapport à l'objectif imposé, présentant peu de choix possibles et d'un faible gradient. Cela nous permettra de positionner au plus vite les ensembles de choix au niveau des activités ayant une grande influence sur le processus (valeur moyenne) mais d'impact limité (gradient) et pour lesquelles nous n'avons que peu de choix envisageables (nombre de combinaisons).

Dans le corps de l'algorithme, nous testons si la valeur de l'objectif se trouve dans l'intervalle de performance envisageable sur l'étape en cours de traitement. Si ce n'est pas le cas, on fixe le pivot de cette étape sur le rang correspondant à la performance maximale ou minimale suivant l'objectif à atteindre, et on passe à l'étape suivante. Sinon, on applique une recherche dichotomique

classique sur l'étape courante de façon à converger vers le meilleur choix possible. La valeur finale du pivot est mémorisée avant d'itérer la même démarche pour toutes les activités selon l'ordre préétabli lors de l'initialisation. Enfin, une fois que toutes les étapes ont été traitées, c'est à dire qu'un pivot est déterminé pour chaque étape, on obtient les résultats finaux correspondant au processus dans sa globalité.

Notons par ailleurs, que lorsque le traitement des premières activités ne permet pas de satisfaire l'objectif de performance imposé, dès qu'une solution est trouvée, un algorithme avec backtrack DICH0_BACK a aussi été développé de façon à chercher à maximiser le nombre de solutions au détriment du nombre de simulation nécessaires. Nous allons maintenant expliciter la méthodologie d'évaluation suivie pour apprécier l'efficacité de l'algorithme développé.

4. METHODOLOGIE D'EVALUATION

Dans cette partie nous présenterons tout d'abord les exemples de moyenne et grande complexité que nous avons utilisé pour tester notre approche. Nous détaillerons ensuite la méthodologie d'évaluation mise en oeuvre en précisant les coefficients retenus.

4.1. Description des exemples tests

Pour mener à bien notre étude nous avons fait appel à deux classes d'exemples. Pour la première classe (EX1 et EX2), de moyenne complexité, nous avons considéré un processus d'entreprise simplifié extrait du manuel qualité de notre partenaire industriel. Ce processus PMP de Mise en Production (Figure 4) a pour objectif d'autoriser, ou non la production d'un nouveau produit. Il se décompose en 3 activités faisant appel à des acteurs appartenant aux services Production et Technique de l'entreprise. Dans un premier temps les tests à effectuer sont définis lors de l'activité A1. Ces derniers sont réalisés et analysés lors de l'activité A2. En fonction du résultat de ces tests il est alors possible soit d'engager des actions correctives et de réitérer l'évaluation, soit de statuer sur la mise en production lors de l'activité A3.

Dans la suite nous considérerons que le comportement du processus s'exécute selon une séquence $\sigma = \{A1, A2, A1, A2, A1, A2, A3\}$ où plusieurs itérations sont nécessaires pour qu'une décision finale soit prise. Pour ce processus et le comportement σ choisi nous avons pris en compte de nombreux acteurs, contraintes de compétence et contraintes quantitative engendrant un nombre important mais exhaustivement calculable de configurations d'affectations envisageables (Tableau 1).

Nous supposerons par ailleurs dans cet article que lorsqu'une activité est exécutée plusieurs fois, les mêmes acteurs lui sont affectés.

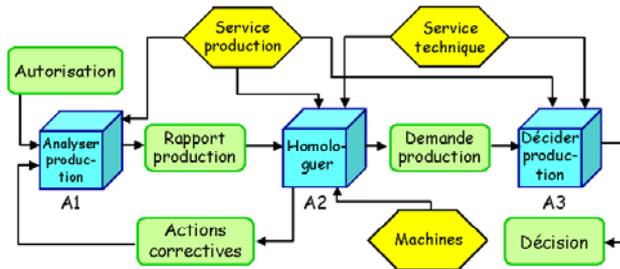


Figure 4. Le processus PMP

En revanche, pour la seconde classe d'exemple (EX3) nous avons considéré un processus "virtuel" composé de 15 activités distinctes exécutées séquentiellement. A chacune de ces activités sont associées 30 configurations d'allocation possibles auxquelles correspondent un ensemble de performances aléatoirement distribuées. Cela conduit à un problème d'une dimension telle qu'il est impossible de l'explorer exhaustivement (Tableau 1).

	Activités					Nbre total de config..
	A1	A2	A3			
Service	Prod	Prod	Tech	Prod	Tech	Π config.
EX1	9	9	3	9	9	19 683
EX2	9	9	9	9	9	59 049
	A1	A2	...	A14	A15	
EX3	30	30	...	30	30	$1.43 \cdot 10^{22}$

Tableau 1. Dimensions du problème

Nous allons maintenant nous appuyer sur ces exemples et sur notre capacité à calculer l'ensemble exact des solutions pour EX1 et EX2, afin de définir notre méthodologie d'évaluation.

4.2. Développement de la Méthodologie d'évaluation

Notre étude comparera notre approche avec les performances de plusieurs algorithmes pouvant s'adresser à la problématique posée. Elle s'articulera autour du calcul de deux coefficients permettant de rendre compte, d'une part du nombre d'affectations trouvées, et d'autre part, de l'efficacité de l'algorithme

4.2.1 Algorithmes de comparaison

Nous avons retenu deux types d'algorithmes classiques pour étayer notre analyse. Ceux-ci, faute de place, ne pourront être détaillés ici.

D'une part nous avons utilisé un algorithme Hybride Tabou-Descente. Il présente une initialisation non aléatoire comme l'algorithme Tabou [16] mais sans la Liste Tabou associée. Cet algorithme, ne tolère pas de dégradation de la fonction objectif. A chaque itération, comme un algorithme de Descente [16], pour trouver une solution, il fait appel, lors de son exécution, au meilleur voisin envisageable. Cependant, ce type d'approche est facilement bloqué dans un minimum local. D'autre part nous avons aussi eu recours à l'algorithme du recuit simulé [19]. Cette approche, qui est fréquemment

utilisée face à des problèmes présentant une combinatoire importante permet d'éviter, contrairement à l'algorithme Hybride Tabou-Descente, d'être bloqué intempestivement dans un minimum local.

4.2.2 Principes d'évaluation

La simulation exhaustive de toutes les combinaisons d'affectations envisageables (19 683 pour EX1 et 59 049 pour EX2) permet de calculer, et de classer, selon un point de vue donné, l'ensemble Simu (Figure 5) des performances pouvant globalement être atteintes pour un comportement σ d'un processus. Parmi cet ensemble, seules certaines d'entre elles satisfont l'objectif de performance Obj imposé. Elles définissent alors l'ensemble exact des solutions satisfaisant la contrainte d'objectif définie (ensemble Global dans Figure 5). Le recours à des algorithmes mettant non exactes conduira alors nécessairement à déterminer un ensemble Local (Figure 5) encore plus réduit de solutions. Ces ensembles satisfont la relation d'inclusion suivante :

$$\text{Local} \subseteq \text{Global} \subseteq \text{Simu} \quad (2)$$

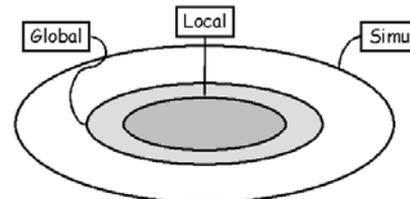


Figure 5. Ensembles solution

Donc, lorsque l'exploration exhaustive est possible, nous pourrions évaluer la "qualité" de la solution générée par un algorithme, en la comparant par rapport au nombre d'affectation trouvé, et au nombre de simulations nécessaires pour y parvenir. En revanche, s'il n'est pas possible d'explorer exhaustivement toutes les solutions (EX3), nous ne pourrions comparer la solution obtenue par notre algorithme dans l'absolu, avec la solution exacte, mais uniquement avec les approches Hybride Tabou-Descente et de recuit simulé.

La combinatoire limitée des problèmes de moyenne complexité qui permet la mise en œuvre d'une analyse exhaustive nous a permis de spécifier, pour les algorithmes utilisés, deux coefficients d'évaluation.

4.2.3 Taux de couverture

Le Taux de Couverture TC est défini par l'équation (3) :

$$TC = \frac{\text{Nbre de solutions détectées}}{\text{Nbre exact de solutions}} \quad (3)$$

Il représente, pour un objectif de performance donné ObjP, le pourcentage de solutions détectées par un algorithme. Pour un ensemble d'objectifs à satisfaire, le taux minimal obtenu TCmin et le taux moyen TCmoy sont deux indicateurs pertinents du comportement d'un algorithme.

4.2.4 Coefficient d'efficacité

Le taux de couverture ne prend pas en compte le nombre de simulations nécessaires à l'obtention des solutions détectées. De ce fait l'approche exhaustive est alors la meilleure puisqu'elle permet toujours d'atteindre une couverture de 100% des solutions. Cela peut être corrigé en introduisant un Coefficient d'Efficacité CE défini par l'équation 4.

$$CE = \frac{TC}{\text{Nbre moyen de simulations}} \quad (4)$$

Comme plus haut on pourra calculer un coefficient moyen CE_{moy} lorsqu'un algorithme sera utilisé sur un ensemble d'objectifs.

Dès lors, un algorithme sera considéré d'autant plus efficace que son Coefficient d'Efficacité sera proche de 100. Ce dernier résultat serait obtenu dans le cas utopique où un algorithme trouverait l'ensemble exact des solutions en une seule simulation. Il faut aussi noter que ce coefficient décroît très rapidement avec le nombre de simulations nécessaires à l'obtention des solutions. Ainsi, il chute déjà à 50 pour un taux de couverture de 100% obtenu avec deux simulations. Sa valeur devient infinitésimale pour une approche exhaustive. Ainsi, dans le cas de EX2, la valeur de CE est voisine de $1.7 \cdot 10^{-3}$.

La méthodologie d'évaluation des différents algorithmes étudiés étant maintenant précisée, nous allons à présent la mettre en œuvre sur les exemples que nous avons décrits.

5. EVALUATION : RESULTATS

Pour évaluer l'efficacité des différents algorithmes, nous avons choisi de nous focaliser, dans l'étude des processus, sur le point de vue financier. L'estimation du coût financier est obtenue en calculant tout d'abord, pour les assignations d'acteurs retenues le temps d'exécution de chacune des activités. Le coût associé est alors évalué en prenant en compte, la durée des activités, les salaires du personnel et les coûts d'amortissement du matériel.

5.1. Graphes types obtenus

Afin d'analyser le comportement des différents algorithmes, nous les avons employés sur 40 objectifs financiers régulièrement répartis sur la plage de coût financier envisageable pour l'exécution des processus étudiés. Sur les graphes que nous allons tracer, l'axe des abscisses représente toujours les objectifs financiers imposés exprimés en unité monétaire. Nous cherchons alors pour chacun des ces objectifs $ObjF$ quelles sont les allocations de ressources humaines permettant de satisfaire l'objectif suivant : $\text{Coût processus} < ObjF$ fixé.

Les graphiques présentés ci-dessous, qui s'adressent à l'exemple EX2, sont représentatifs des évolutions "typiques" observées lors de l'évaluation des algorithmes sur l'ensemble des processus testés.

5.1.1 Evolution de TC pour l'algorithme dichotomique

La Figure 6 présente l'évolution du taux de couverture pour l'algorithme dichotomique. On constate que la plupart du temps, il détecte l'ensemble exact de solutions.

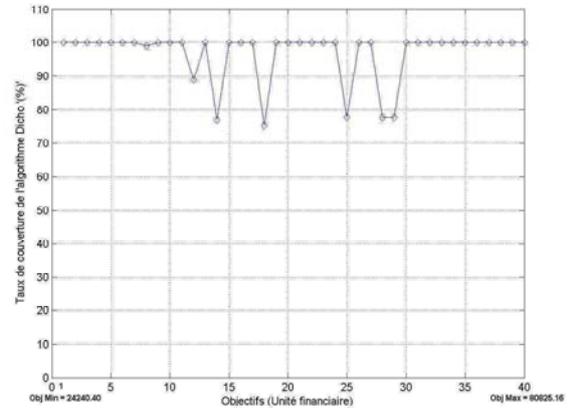


Figure 6. Evolution de TC pour DICH0

5.1.2 Comparaison des algorithmes évalués

La Figure 7 présente sur EX2 l'évolution comparée du nombre de solutions trouvées pour les différents algorithmes. Qualitativement on peut constater que les résultats obtenus par les algorithmes dichotomique et de recuit simulé sont voisins, alors que l'approche Hybride Tabou-Descente est nettement moins efficace.

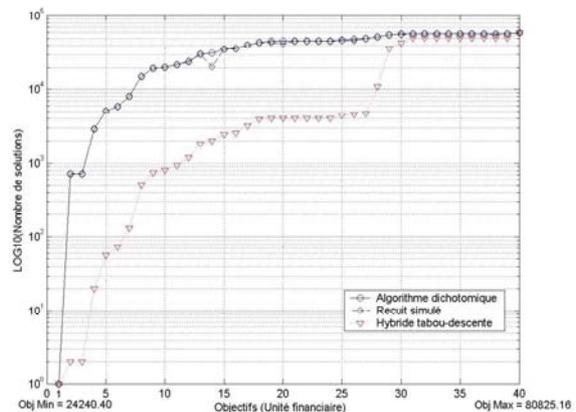


Figure 7. Comparaison des algorithmes

Abordons maintenant une analyse plus quantitative des résultats.

5.2. Tables synthétiques des résultats

Les tables suivantes résument les principaux résultats de notre analyse. Ils ont été obtenus sur un ordinateur Pentium 4 à 1.3 GHz ayant 256 Mo de RAM. Les algorithmes utilisés ont été codés sur le logiciel Matlab[®].

Le Tableau 2 expose les performances de l'approche exhaustive.

	Nb. Simu	Tps (s)	TC (%)	CE
EX1	19 683	56.7	100	5 10 ⁻³
EX2	59 049	307	100	1.7 10 ⁻³

Tableau 2. Résultats pour l'approche exhaustive

Le Tableau 3 et le Tableau 4 synthétisent les résultats obtenus sur les exemples EX1 et EX2 avec l'algorithme DICH0 d'une part et DICH0_BACK d'autre part.

	Nb. Simu	TC (%)		CE	Tps max (s)
	Moy.	TCmin	TCmoy	CEmoy	
EX1	10.5	11.1	96.7	9.3	0.04
EX2	12.9	75.5	96.9	7.5	0.04

Tableau 3. Résultats pour l'algorithme DICH0

	Nb. Simu	TC (%)		CE	Tps max (s)
	Moy.	TCmin	TCmoy	CEmoy	
EX1	10.8	78.5	98.9	9.2	0.06
EX2	13.2	75.5	96.9	7.3	0.05

Tableau 4. Résultats pour l'algorithme DICH0_BACK

Le Tableau 5 et le Tableau 6 résument les résultats recueillis avec les algorithmes Hybride Tabou-Descente d'une part et de recuit simulé d'autre part.

	Nb. Simu	TC (%)		CE	Tps max (s)
	Moy.	TCmin	TCmoy	CEmoy	
EX1	20.5	8.1	36.6	1.8	0.1
EX2	37.9	0.3	32.5	0.8	0.1

Tableau 5. Résultats pour l'algorithme Hybride Tabou-Descente

	Nb. Simu	TC (%)		CE	Tps max (s)
	Moy.	TCmin	TCmoy	CEmoy	
EX1	124.3	0	61.9	0.5	0.19
EX2	117.5	64.2	98.3	0.8	0.15

Tableau 6. Résultats pour l'algorithme de recuit simulé

Enfin, pour EX3, l'ordre de grandeur de certains ensembles solutions rend caduque le calcul d'un nombre de solutions moyen qui pourrait tout de même être évalué en l'absence d'un référentiel exhaustif. Nous limiterons donc notre exposé au Tableau 7 qui précise, pour chacun des algorithmes, le nombre moyen de simulations NSmoy nécessaires pour obtenir une solution, et le temps maximal de simulation observé.

	Dicho	Dicho-back	Recuit	Hybride Tabou-Descente
NSmoy	17.6	33.5	105	219
Tps max (s)	0.05	0.06	0.36	5.42

Tableau 7. Résultats pour EX3

6. ANALYSE DES RESULTATS

On peut tout d'abord constater que pour les exemples de complexité moyenne tous les algorithmes permettent d'obtenir des solutions d'affectation en moins d'une seconde.

Le Tableau 2 démontre que même si l'approche exhaustive est envisageable elle n'est pas utilisable de façon interactive puisque plus d'une minute de calcul est nécessaire. De plus, son coefficient d'efficacité est très faible puisque qu'un grand nombre de simulations est obligatoire pour atteindre les 100% de couverture.

L'algorithme que nous proposons permet d'obtenir d'excellents taux de couverture (> 96 %) en une dizaine de simulations et en quelques centièmes de secondes. On peut aussi constater que le recours au backtrack permet pour EX1 d'améliorer sensiblement le taux de couverture minimal observé et donc le taux moyen final. Cela engendre une chute minime du coefficient d'efficacité qui reste excellent (>7).

Pour EX1 et EX2 l'approche Hybride Tabou-Descente est sans discussion celle qui permet d'atteindre le taux de couverture le plus faible avec à peine plus de 30 %. Cependant pour EX1 son taux d'efficacité est voisin ou supérieur à celui du recuit simulé en raison du faible nombre de simulations exécuté. Le recuit simulé quant-à-lui permet d'obtenir des taux de couverture très acceptables (> 60%) même si cet algorithme semble un peu en difficulté sur EX1.

Pour finir l'évaluation des algorithmes sur EX3 montre que l'algorithme Hybride Tabou-Descente demande un temps important (> 5 s) pour déterminer un ensemble de solutions. Malgré les dimensions de l'espace de recherche, les autres approches satisfont toujours notre critère d'interactivité (Tps < 1s) en nécessitant un nombre de simulations moyen voisin de celui observé pour EX1 et EX2.

7. CONCLUSION

Nous avons présenté et évalué dans cet article un algorithme dichotomique permettant de déterminer, de façon très efficace, un ensemble de solutions d'affectation des ressources humaines à un processus d'entreprise satisfaisant à un objectif de performance imposée. Sa mise en œuvre s'appuie sur une étude, développée dans le cadre d'un projet industriel, et permettant d'intégrer explicitement l'impact des compétences humaines dans le calcul de la performance.

L'évaluation a été mise en œuvre en effectuant une étude comparative avec des approches exhaustive, Hybride Tabou-Descente et de recuit simulé sur des exemples de moyenne et grande complexité. Globalement les résultats obtenus par l'approche dichotomique et de recuit simulé restent voisins, même si l'efficacité de cette dernière est

moindre. De plus, la mise en oeuvre du recuit simulé nécessite un paramétrage toujours délicat. L'approche Hybride Tabou-Descente en revanche donne des résultats généralement mauvais et engendre même une durée de calcul de plus d'une seconde sur l'exemple EX3.

Ce travail d'évaluation, que nous avons étendu à d'autres points de vue (temporel, qualité), conduit aux mêmes conclusions et cela pour des classes de contraintes d'objectif ($<$, $>$), et des répartitions de performances variées. Nous pouvons donc conclure que l'algorithme proposé semble en général le plus simple et le plus efficace à utiliser.

Cependant, il est bien connu que les objectifs d'une entreprise se déclinent selon différents points de vue qui se doivent d'être simultanément satisfaits (Qualité, Coût, Délais). Il nous faut donc maintenant réfléchir aux moyens d'étendre notre approche à cette problématique.

REFERENCES

- [1] D. Arditi, O. B. Tokdemir, K. Suh, Effect of learning on line balancing scheduling, *International Journal of Project Management*, 19, pp. 236-277, 2001.
- [2] R. G. Askin, Y. Huang, Forming effective worker teams for cellular manufacturing, *International Journal of Production Research*, 39(11), pp. 2431-2451, 2001.
- [3] K. Baskar, G. Srinivasan, Static and dynamic operator allocation problem in cellular manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 35(12), pp. 3467-3481, 1997.
- [4] M. Bennour, D. Crestani, F. Prunet, Intégration des compétences individuelles et collectives dans le calcul de la performance de processus industriels, *Colloque du groupe de Gestion des Compétences et des Connaissances en Génie Industriel*, Nantes, pp. 139-147, 2002.
- [5] M. Bennour, D. Crestani, F. Prunet, Une approche de gestion des ressources humaines guidée par les compétences, *MOSIM'03*, Toulouse, pp. 665-671, 2003.
- [6] G. Le Boterf, *De la Compétence : essai sur un attracteur étrange*, Les Editions d'Organisation, Paris 1994.
- [7] C. Covès, D. Crestani, V. Chapurlat, F. Prunet, Implementation of an Approach of Performance Estimation for Enterprise Process Analysis, *MCPL'2000*, Grenoble, France.
- [8] C. Covès, *Analyse et Estimation de Performances de Processus d'Entreprise*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier 2, France, 2000.
- [9] G. B. Dantzig, A comment on edie's traffic delays at tool booths, *Operations Research*, 2, pp. 339-341, 1954.
- [10] A. El Mhamedi, *Sur l'Intégration des Aspects Humains sur la Conduite Multi-Niveaux d'Ateliers de Production*, Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, 1990.
- [11] A. T. Ernst, H. Jiang, M. Kishnamoorthy and D. Sier, Staff Scheduling and rostering : a review of application, methods and models, *European Journal of Operational Research*, 2001.
- [12] L. Franchini, E. Caillaud, P. Nguyen., G. Lacoste, Planning and Scheduling Skills: a Case Study in an Agri-food Industry, *Proceedings of IEEE Conference of Systems, Man and Cybernetics*, 417-422, 1998.
- [13] L. Franchini, *Aide à la décision pour la gestion des opérateurs de production* Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse, France, 2000.
- [14] L. Franchini, E. Caillaud, P. Nguyen., G. Lacoste, 2001, Workload Control of Human Resources to Improve Production Management. *International Journal of Production Research*, 39, 1385-1403, 2001.
- [15] Vincent Giard, *Gestion de la production et des flux*. Ed. Economica, 2003
- [16] Jin-Kao Hao, Philippe Galinier, Michel Habib, *Métaheuristiques pour l'optimisation combinatoire et l'affectation sous contraintes*. Revue d'Intelligence Artificielle, 1999.
- [17] M. Harzallah, *Modélisation des Aspects Organisationnels pour la Réorganisation d'Entreprise Industrielles*. Thèse de doctorat, Université de Metz, France, 2000.
- [18] T. Jia, *Vers une meilleure Gestion des Ressources d'un Groupe Autonome de Fabrication*. Thèse de doctorat de l'Université de Tour, France, 1998.
- [19] S. Kirkpatrick, C. D. Gelatt and M. P. Vecchi, Optimization by simulated annealing, *Science*, 220, pp. 671-680, 1983.
- [20] V. Marbach, *Evaluer et Rénumérer les Compétences*, collection Développement et Emplois, Les Editions d'Organisation, Paris, 1999.
- [21] G. Mosheiov, Scheduling Problem with a Learning Effect. *European Journal of Operational Research*, 132, 687-693, 2001.
- [22] C. Paradeise, Y. Lichtenberger, *Compétence, compétences*, *Sociologie du travail*, 43(2001), Editions Scientifiques et Médicales Elsevier SAS, pp. 33-48, 2001.
- [23] T. L. Saaty, *The analytical hierarchy process*, McGraw Hill, New York, 1980.
- [24] J. L. Tchommo, P. Baptiste, F. Soumis, *Etude bibliographique de l'ordonnancement simultané des moyens de production et des ressources humaines*, *Proceedings of the fifth French-Quebec International Congress of Industrial Engineering*, Quebec, Canada [CD-ROM], 2003.
- [25] F. Vernadat, *Enterprise Modeling and Integration : Principles and Applications*, Chapman&Hall, 1996.
- [26] P. Zarifian, *Le Modèle de la Compétence*, Collection Entreprise & Carrières, Editions Liaisons, 2001.