



# Affectation multi-périodes de tâches de conception en fonction de l'évolution des compétences

ONANONG HLAOITTINUN<sup>1</sup>, ERIC BONJOUR<sup>1</sup>, MARYVONNE DULMET<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INSTITUT FEMTO-ST UMR CNRS 6174

DEPARTEMENT AS2M

24, Rue Alain Savary, 25000 Besançon Cedex

{onanong.hlaoittinun, eric.bonjour, maryvonne.dulmet}@ens2m.fr

## Résumé –

Les projets de conception de produits complexes nécessitent des acteurs pluridisciplinaires afin de réaliser l'intégralité des activités du projet. Les chefs de projet ont besoin d'outils d'aide à l'affectation des ressources humaines en fonction de l'évolution des compétences. Dans cet article, un modèle d'affectation permettant de modéliser le développement des compétences sur plusieurs périodes et sur plusieurs projets est proposé. Nous cherchons un compromis entre le coût supplémentaire lié au manque de compétence et le coût pénalisant dû à l'écart de l'objectif de compétences. Un cas d'études est présenté. Nous utilisons un algorithme de recuit simulé pour résoudre le problème.

## Abstract

Complex product development projects involve multiple actors with various skills and competencies. Project managers require management tools to optimize the human resource allocation to several projects simultaneously. The affectation problem is formulated for complex design projects with multiple-periods for modelling competency development and with multiple-design projects. The model seeks to find a trade-off between the supplementary cost for project due to the extended task durations and the opportunity for employees to increase competencies. We provide a simulated annealing (SA)-based optimization algorithm to solve the problem.

**Mots clés –** affectation des tâches, modélisation des compétences, dynamique des compétences, recuit simulé.

**Keywords -** assignment problem, competency modelling, competency dynamics, simulated annealing.

## 1 INTRODUCTION

Les entreprises sont confrontées à une situation fortement compétitive, où elles doivent constamment développer de nouveaux produits afin de répondre aux exigences des clients. Elles ont besoin de gérer leurs projets de développement de produits et de mettre sur le marché des produits le plus rapidement possible. Lorsqu'il s'agit de situations avec une forte évolution des technologies et des besoins du marché, la définition des tâches de conception, ainsi que celle des nouvelles compétences associées peuvent évoluer. Ces situations peuvent engendrer une carence de compétences à un moment donné. Ces manques sont reliés fortement aux compétences possédées par les ressources humaines. Le développement de compétence des ressources humaines devient une des priorités de l'entreprise. Par conséquent, l'affectation des tâches aux acteurs peut être considérée comme un outil de développement de compétences pour améliorer la performance globale du projet.

## 2 PLANIFICATION DES RESSOURCES HUMAINES

Concernant l'évolution de compétences, nous avons classé les problèmes d'affectation trouvés dans la littérature en 4 catégories suivant deux critères: l'affectation des tâches (mono-période ou multi-périodes) et le type de modélisation (statique ou dynamique) des compétences.

L'affectation « multi-périodes » des tâches aux acteurs prend en compte à la fois l'ordonnancement des tâches et le problème d'affectation. L'affectation « mono-période » des tâches aux acteurs est le cas où on s'intéresse uniquement au

problème d'affectation. Il n'existe pas la planification des tâches ou les tâches ont été déjà planifiées.

La modélisation « statique » des compétences est le cas où les acteurs affectés ont les mêmes niveaux de compétence du début à la fin de l'affectation. La modélisation « dynamique » des compétences considère que les compétences des acteurs évoluent au cours de la réalisation d'une tâche.

### 2.1 Affectation mono-période des tâches aux acteurs avec une modélisation statique des compétences

Les premiers travaux d'affectation liés à la compétence ont été réalisés en termes de qualification des personnels. La qualification représente une satisfaction ou non du niveau de compétence demandé. [Caron *et al.*, 1999] proposent une extension du modèle d'affectation classique, qui s'assure que les personnes affectées sont suffisamment qualifiées pour les tâches.

Par la suite, les travaux se focalisent sur deux types de compétences : la compétence technique et la compétence psycho-sociologique. La compétence technique est un des critères importants pris en compte dans l'affectation [Zakarian and Kusiak, 1999], [Tseng *et al.*, 2004], [Hadj-Hamou and Caillaud, 2004], [Fitzpatrick and Askin, 2005]. [Zakarian and Kusiak, 1999] proposent une approche pour constituer des équipes. Ils affectent les compétences techniques nécessaires à la réalisation de chaque sous-ensemble du produit dans le but de maximiser les satisfactions du client.

Même si la compétence technique reste un élément de choix primordial dans l'affectation des tâches aux acteurs, cependant ce n'est pas l'unique paramètre à prendre en compte. Il s'agit

également de compétences psycho-sociologiques. Un groupe de travail efficace en conception suppose une bonne interaction et une bonne collaboration entre les différents acteurs de ce groupe. Dans le cadre de la conception collaborative, [Chen, 2005] [Rose et al., 2007] s'intéressent à ce type de compétence dans l'affectation.

La diversité du rôle d'équipe apparait comme un autre critère important dans la constitution d'équipe. Ces rôles décrivent les caractères et les comportements différents des acteurs dans un projet. [Hadj-Hamou et Caillaud, 2004] proposent un modèle d'affectation des rôles qui s'assure que chaque rôle nécessaire dans une équipe est réellement occupé.

#### 2.2 Affectation mono-période des tâches aux acteurs avec une modélisation dynamique des compétences

Ce problème prend alors en compte les améliorations de compétence pendant la phase d'affectation. [Sayin et Karabati, 2007] propose un modèle d'affectation des acteurs aux départements en tenant compte de l'évolution de compétences. Le problème se pose lors de l'affectation inter-départements où la compétence est représentée par une compétence collective (département). L'évolution de compétences est souvent prise en compte à travers une courbe d'apprentissage individuelle. Les facteurs facilitant les améliorations de compétences sont le temps consacré aux tâches et le niveau accumulé des anciennes expériences. Le modèle vise à maximiser l'amélioration des compétences des acteurs affectés sur le projet.

#### 2.3 Affectation multi-périodes des tâches aux acteurs avec une modélisation statique des compétences

Il s'agit à la fois d'ordonner des tâches et d'affecter des tâches aux acteurs. Ce problème est connu sous le nom «problème de gestion de projet à contraintes de ressources». Il a été développé dans la gestion de projet à travers les travaux de Blazewicz et al., (1983). La prise en compte des compétences a été récemment intégrée en tant qu'extension de cette problématique. [Bellenguez-Morineau, 2006] s'est intéressé à la gestion de projets avec prise en compte de compétences multiples (MSPSP: Multi-skill Project Scheduling Problem). Leur modèle est inspiré par le problème de gestion de projet à contrainte de ressources classique (RCPSP). Le modèle s'assure que les personnes affectées maîtrisent les compétences nécessaires aux tâches du projet en minimisant la durée totale ou la date d'achèvement global ( $C_{max}$ ).

#### 2.4 Affectation multi-périodes des tâches aux acteurs avec une modélisation dynamique des compétences

Ce problème traite à la fois l'ordonnement des tâches, l'affectation des tâches aux acteurs et l'évolution des compétences. [Gutjahr, et al., 2008] proposent un modèle qui optimise la gestion de portefeuille de projets (project portfolio) et l'affectation des tâches aux acteurs à long terme en prenant en compte les effets d'apprentissage et de dépréciation de connaissances. Les auteurs supposent que le niveau de compétence d'une personne affectée à une tâche augmente en fonction du nombre de périodes où la personne a travaillé et du taux d'apprentissage. De la même façon, son niveau de compétence diminue selon un taux de dépréciation des connaissances si elle n'est pas affectée.

Dans cette communication, nous nous intéressons à l'affectation multi-périodes et multi-projets des tâches aux acteurs avec la modélisation dynamique des compétences. Nous supposons que l'ordonnement des tâches a été réalisé, le découplage et l'ordre des tâches sont des données.

### 3 MODELISATION DES COMPETENCES

Les modèles de compétences sont nombreux dans la littérature. [Le Boterf, 2002] considère la compétence en termes de modes opératoires divers selon les combinaisons des ressources (capacité cognitive). La compétence étant liée à la tâche, nous utiliserons donc, dans ce document, le terme «tâche» dans le sens d'une compétence à mettre en œuvre. La réalisation de la compétence peut être décomposée en un agencement de sous-butts intermédiaires que l'on peut considérer comme l'architecture fonctionnelle de la compétence. Pour des missions semblables, cet agencement d'éléments organiques est généralement stable et renvoie au concept de schème<sup>1</sup>. Modéliser un schème revient à définir l'architecture organique d'une compétence : ensemble de connaissances, savoir-faire et règles de conduite structurées par un plan d'actions.

Dans cette communication, nous avons modélisé la tâche par un ensemble d'attributs non reliés. L'ensemble de connaissances et le savoir-faire sont modélisés dans ce travail. Ils sont modélisés par l'attribut «discipline» qui représente des connaissances disciplinaires nécessaires dans la réalisation de la tâche.

Le plan d'action n'est pas modélisé dans ce travail. Cependant, il peut être modélisé par cette méthode en définissant un attribut qui représente la capacité de mise en œuvre de l'ensemble des connaissances et du savoir-faire dans la réalisation de la tâche considérée.

#### 4 DEMARCHE DE L'AFFECTATION DES TACHES AUX ACTEURS EN TENANT COMPTE DE LA MODELISATION DYNAMIQUE DES COMPETENCES

Les qualités attendues d'une telle démarche sont les suivantes :

- 1 Minimiser le coût de réalisation des tâches
- 2 Affecter des tâches multi-périodes et multi-projets en tenant compte d'une loi d'évolution des compétences.
- 3 Fixer des objectifs ou contraintes de développement de compétences.
- 4 Suivre l'évolution des compétences au cours de la réalisation de la tâche

##### 4.1 Notations préliminaires principales

Tableau 1: Notations

$T_{i\{st\}}$	Tâche générique de type $i$
$T_{i\{kl\}}$	Tâche particulière de type $i$ instanciée dans le projet $l$ à la période $k$
$R_{i\{st\},d}^1$	Niveau de maîtrise requis dans la discipline $d$ par la tâche générique $T_{i\{st\}}$
$R_{i\{kl\},d}^1$	Niveau de maîtrise requis dans la discipline $d$ par la tâche particulière $T_{i\{kl\}}$
$RQ_{i\{kl\}}$	Niveau de compétence requis de la tâche particulière $T_{i\{kl\}}$
$R_{d,j,k}^2$	Niveau de maîtrise acquis dans la discipline $d$ par l'acteur $j$ à la période $k$ .

<sup>1</sup> "Un schème est une entité qui intègre en une structure, spécifique à la finalité et au contexte de l'action, des composantes cognitives hétérogènes".

Nous regroupons le tableau 1 les notations utilisées lors de la formulation du problème.

Nous définissons un ensemble de tâches génériques, indexées par  $i$  ( $i=1, \dots, M$ ), un ensemble de projets à réaliser, indexés par  $l$  ( $l=1, \dots, P$ ), un ensemble de périodes, indexées par  $k$ , ( $k=1, \dots, K$ ), un ensemble d'acteurs, indexées par  $j$  ( $j=1, \dots, N$ ) et un ensemble de disciplines, indexées par  $d$ , ( $d=1, \dots, D$ ).

#### 4.2 Planification des tâches multi-périodes

Le découplage et l'ordre des tâches étant des données d'entrée, la planification des tâches dans le temps est donnée par un ensemble de périodes, indexées par  $k$ , ( $k=1, \dots, K$ ). Par exemple, la période  $k=0$  représente la période avant l'affectation des tâches, et la période  $k=1$  représente la période après une première affectation.

Un ensemble des tâches appartenant à un projet  $l$  a été planifié à chaque période  $k$ . Nous supposons que la durée de chaque période  $k$  est suffisamment courte pour que nous n'ayons pas besoin de prendre en considération les contraintes de précedence entre des tâches dans cet ensemble. Nous présentons deux types de tâches utilisés dans ce modèle.

##### 4.2.1 Tâche générique $T_{i\{st\}}$

Les tâches génériques couvrent une classe de tâches appelant les mêmes types de connaissances. Les tâches génériques sont souvent les tâches qui ont été couramment affectées, et elles sont archivées et référencées en vue de réutilisations futures. Les tâches génériques sont définies en termes de disciplines nécessaires à leur réalisation:  $R_{i\{st\}, d}^1, d=1, \dots, D$ .

##### 4.2.2 Tâche particulière $T_{i\{kl\}}$

La tâche particulière  $T_{i\{kl\}}$  représente une tâche ressemblant à la tâche générique de type  $i$ , appartenant au projet  $l$ , et elle a été planifiée pour être réalisée à la période  $k$ . Nous présentons un exemple de la planification des tâches dans la figure 1.

Le processus d'affectation multi-périodes des tâches aux acteurs en prenant en compte la dynamique des compétences est organisé en 5 étapes (§4.3 à §4.7) : la caractérisation de la tâche et de l'acteur, le calcul de l'évolution du niveau dans la discipline, le calcul d'un indicateur de similarité a priori, le calcul du coefficient correcteur.

Tâche générique		k=1	k=2	k=3	k=4	k=5
Projet (l=1)	T1	$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$			
	T2	$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$		
	T3		$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$		
	T4					
	T5			$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$	
	T6				$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$
	T7					
Projet (l=2)	T1					
	T2	$T_{i\{kl\}}$				
	T3	$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$		
	T4		$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$		
	T5					
	T6			$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$
	T7				$T_{i\{kl\}}$	$T_{i\{kl\}}$

Figure 1 : Planification multi-périodes des tâches ( $T_{i\{kl\}}$ )

#### 4.3 Caractérisation de la tâche

Les tâches particulières  $T_{i\{kl\}}$  peuvent être caractérisées de deux façons: le vecteur représentant le niveau de maîtrise

requis dans les disciplines de la tâche particulière  $R_{i\{kl\}, \bullet}^1$  (appelé vecteur de discipline de la tâche) et le niveau de compétence requis par la tâche particulière ( $RQ_{i\{kl\}}$ ).

Le vecteur ( $R_{i\{kl\}, \bullet}^1$ ) représente le vecteur de disciplines requises par la tâche  $T_{i\{kl\}}$ . Ce vecteur est constitué de l'ensemble des niveaux de maîtrise dans la discipline  $R_{i\{kl\}, d}^1$ .

$$R_{i\{kl\}, \bullet}^1 = \{R_{i\{kl\}, d}^1 \mid d=1, \dots, D\}$$

Le calcul du vecteur ( $R_{i\{kl\}, \bullet}^1$ ) nécessite la connaissance de la variable  $RQ_{i\{kl\}}$  représentant un niveau de compétence requis pour la tâche  $T_{i\{kl\}}$ . La variable  $RQ_{i\{kl\}}$  a pour but de faire varier les différents niveaux de maîtrise dans la discipline  $R_{i\{kl\}, d}^1$ . Nous obtiendrons un nouveau vecteur du niveau de maîtrise dans la discipline en multipliant le vecteur du niveau de maîtrise dans la discipline de la tâche générique par le niveau de compétence requis de la tâche,  $RQ_{i\{kl\}}$ .

$$R_{i\{kl\}, \bullet}^1 = RQ_{i\{kl\}} \times R_{i\{st\}, \bullet}^1$$

#### 4.4 Caractérisation de l'acteur

De la même manière que le vecteur du niveau de maîtrise requis dans la discipline de la tâche ( $R_{i\{kl\}, \bullet}^1$ ), le vecteur  $R_{\bullet, j, k}^2$  est un vecteur représentant le niveau de maîtrise requis dans la discipline possédée par l'acteur  $j$  à la période  $k$ . Ce vecteur  $R_{\bullet, j, k}^2$  est constitué de la manière suivante.

$$R_{\bullet, j, k}^2 = \{R_{d, j, k}^2 \mid d=1, \dots, D\}$$

Concernant l'indice de période  $k$  dans le vecteur du niveau de maîtrise dans la discipline de l'acteur ( $R_{\bullet, j, k}^2$ ), ce vecteur peut évoluer dans le temps en fonction de l'affectation aux tâches.

#### 4.5 Calcul de l'évolution du niveau de maîtrise dans la discipline de l'acteur ( $R_{\bullet, j, k}^2$ )

L'évolution des compétences de l'acteur est liée au niveau atteint dans la discipline, trois cas peuvent se présenter.

1. Le niveau de maîtrise acquis dans la discipline  $d$  (à la période  $k$ ) va *augmenter* s'il y a affectation de tâches (associées à la discipline considérée) et que le niveau de maîtrise acquis dans la discipline  $d$  (à la période  $k-1$ ) est inférieur au niveau de maîtrise requis dans la discipline  $d$  de la tâche particulière  $T_{i\{kl\}}$ .
2. Le niveau de maîtrise acquis dans la discipline  $d$  (à la période  $k$ ) reste *stable* dans le cas où il y a affectation des tâches et que le niveau de maîtrise acquis dans la discipline  $d$  (à la période  $k-1$ ) est supérieur ou égal au niveau de maîtrise requis dans la discipline  $d$  de la tâche.
3. Le niveau de maîtrise acquis dans la discipline  $d$  (à la période  $k$ ) va *diminuer* dans le cas où il n'y pas d'affectation, quel que soit le niveau de maîtrise requis dans la discipline  $d$  de la tâche (affectée à la période  $k$ ).

Dans cet article, nous expliquerons le premier cas d'évolution des compétences des acteurs : l'augmentation de niveau de maîtrise acquis dans la discipline.

Nous précisons l'hypothèse de départ :

Nous savons que le nouveau niveau de maîtrise acquis dans une discipline  $R_{d, j, k}^2$  augmente par rapport au niveau de la

période précédente.  $DIF_{d,j,k}$  représente l'augmentation du niveau de maîtrise de la discipline. Cela s'écrit :

$$R_{d,j,k}^2 = R_{d,j,k-1}^2 + DIF_{d,j,k}$$

Pour déterminer  $DIF_{d,j,k}$ , nous fixons les indices  $d, j, k$ . L'acteur peut être affectée sur plusieurs tâches de types différents (indice  $i$ ) et de projets différents (indice  $l$ ). Il y a donc plusieurs valeurs d'augmentation selon le type de tâche  $i$  et le projet  $l$ . Cette augmentation est appelée  $(\Delta Ds_{il})_{d,j,k}$ . Un exemple est présenté ci-dessous avec les valeurs suivantes ( $d=1, j=1, k=1$ ). Les variables  $p_1$  et  $p_2$  représentent respectivement le projet 1 et le projet 2.

$$(\Delta Ds_{il})_{d,j,k} = \begin{matrix} p_1 & p_2 \\ t_1 \begin{bmatrix} \Delta Ds_{11} & \Delta Ds_{12} \\ \Delta Ds_{21} & \Delta Ds_{22} \\ \Delta Ds_{31} & \Delta Ds_{32} \\ \Delta Ds_{41} & \Delta Ds_{42} \end{bmatrix} \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{matrix}$$

$$(\Delta Ds_{il})_{1,1,1} = \begin{matrix} p_1 & p_2 \\ t_1 \begin{bmatrix} 0.05 & 0.03 \\ -0.03 & 0 \\ -0.24 & 0 \\ 0 & 0.04 \end{bmatrix} \\ t_2 \\ t_3 \\ t_4 \end{matrix}$$

Ayant plusieurs possibilités de valeurs, nous voulons savoir laquelle parmi celles-ci représente l'augmentation réelle ( $DIF_{d,j,k}$ ). Nous supposons que  $DIF_{d,j,k}$  est égal au maximum de ces valeurs. Dans l'exemple, la valeur  $DIF_{1,1,1} = \Delta Ds_{11} = 0,05$ .

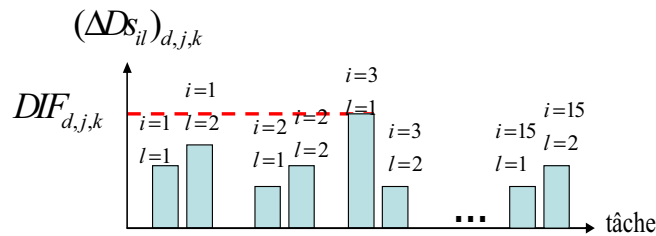
$$DIF_{d,j,k} = \max_{i,l} \{ \Delta Ds_{il} \}_{d,j,k}$$

$$\forall d = 1, \dots, D, \forall j = 1, \dots, N, \forall k = 1, \dots, K$$

**Tableau 2 : Variables de l'évolution de compétence**

$(\Delta Ds_{il})_{d,j,k}$	Augmentation de niveau de maîtrise acquis dans la discipline $d$ provenant de chaque tâche $i$ (quelque soit le projet) pendant la période $k$ .
$DIF_{d,j,k}$	Valeur maximale de $(\Delta Ds_{il})_{d,j,k}$

Nous illustrons cette idée sous la forme graphique ci-dessous.



**Figure 2: Augmentation du niveau de maîtrise dans une discipline**

Le niveau de maîtrise acquis dans la discipline de l'acteur ( $R_{d,j,k}^2$ ) sera obtenu selon la démarche suivante déployée en 6 points :

**Point 1** : Calculer le niveau de maîtrise requis dans la discipline  $d$  ( $R_{i\{kl\},d}^1$ ) de la tâche  $T_{i\{kl\}}$ .

$$R_{i\{kl\},d}^1 = RQ_{i\{kl\}} \times R_{i\{st\},d}^1$$

**Point 2** : Calculer l'augmentation de niveau de maîtrise acquis dans la discipline  $d$ ,  $(\Delta Ds_{il})_{d,j,k}$  :

$(\Delta Ds_{il})_{d,j,k}$  est obtenu par la différence de niveau de la discipline  $d$  entre tâche-acteur ( $R_{i\{kl\},d}^1 - R_{d,j,k-1}^2$ ) multipliée par la variable de décision de l'affectation ( $x_{i\{kl\},j}$ ). La valeur  $R_{d,j,k-1}^2$  est calculée au point 1.

$$\Delta Ds_{il} = (R_{i\{kl\},d}^1 - R_{d,j,k-1}^2) \cdot x_{i\{kl\},j}$$

$$-1 \leq \Delta Ds_{il} \leq 1, \quad \forall i = 1, \dots, M, \forall l = 1, \dots, P$$

**Point 3** : Identifier la valeur maximum des  $(\Delta Ds_{il})_{d,j,k}$

$$DIF_{d,j,k} = \max_{i,l} \{ \Delta Ds_{il} \}_{d,j,k}$$

$$\forall d = 1, \dots, D, \forall j = 1, \dots, N, \forall k = 1, \dots, K$$

**Point 4** : Calculer le nouveau niveau de maîtrise ( $R_{d,j,k}^2$ )

Après avoir obtenu la valeur augmentée maximale des disciplines ( $DIF_{d,j,k}$ ), on l'ajoute au niveau de maîtrise acquis dans la discipline de la période précédente ( $R_{d,j,k-1}^2$ ).

$$R_{d,j,k}^2 = R_{d,j,k-1}^2 + DIF_{d,j,k}$$

**Point 5** : Répéter du point 1 au point 4 pour toutes les disciplines. Nous obtenons un nouveau vecteur de discipline de l'acteur ( $R_{\cdot,j,k}^2$ )

**Point 6** : Répéter les points 1 à 5 pour tous les acteurs. Nous obtenons une nouvelle matrice Discipline-Acteur ( $R_k^2$ ).

#### 4.6 Indicateur de similarité a priori $V_{i\{kl\},j}^3$

Cet indicateur a pour but de connaître la distance acteur-tâche avant la  $kième$  affectation. Une fois la matrice Discipline-Acteur ( $R_k^2$ ) obtenue, nous calculons l'indicateur de similarité a priori ( $V_{i\{kl\},j}^3$ ). Au moment où l'on calcule cet **indicateur**, la tâche particulière  $T_{i\{kl\}}$  n'a pas encore été affectée, l'acteur  $j$  possède toujours le niveau de maîtrise dans la discipline de la période précédente ( $k-1$ )

$$V_{i\{kl\},j}^3 = R_{i\{kl\},d}^1 \cdot R_{d,j,k-1}^2$$

$$0 \leq V_{i\{kl\},j}^3 \leq 1$$

#### 4.7 Calcul du coefficient correcteur $\gamma_{i\{kl\},j}$

Une fois l'indicateur de similarité a priori obtenu, nous l'utilisons pour calculer le **coefficient correcteur**  $\gamma_{i\{kl\},j}$ . Ce coefficient a pour but de matérialiser le coût supplémentaire dû à la sous-qualification pour l'affectation de la tâche particulière  $T_{i\{kl\}}$  à l'acteur  $j$ . Nous proposons la formule suivante permettant de faire varier le temps supplémentaire entre 1 et 2 fois par rapport au temps théorique. Pour ce faire,

la variable *const.* est utilisée. La variable *const* est représentée par une «partie entière».

$$\gamma_{i\{kl\},j} = 1 + \text{const.} \times (1 - V_{i\{kl\},j}^3)$$

## 5 FONCTIONS OBJECTIFS ET LES CONTRAINTES

Dans cette partie, nous expliquons les contraintes (tâche, ressources) et les fonctions de coûts.

### 5.1 Contraintes liées à la charge de réalisation de la tâche

La contrainte liée à la charge du travail est définie de telle sorte que chaque tâche  $T_{i\{kl\}}$  soit entièrement réalisée.

$$\sum_{j=1}^N L_{i\{kl\}} x_{i\{kl\},j} = L_{i\{kl\}}, \forall i = 1, \dots, M, \forall l = 1, \dots, P, \forall k = 1, \dots, K$$

Nous distinguons deux types de durées du travail liés à la tâche.

- La **durée du travail** ( $L_i$ ) est la durée théorique nécessaire à la réalisation de la tâche générique  $T_{i\{st\}}$ .
- La **durée du travail** ( $L_{i\{kl\}}$ ) est la durée du travail nécessaire à la réalisation de la tâche particulière  $T_{i\{kl\}}$ .

$$L_{i\{kl\}} = L_i \times RQ_{i\{kl\}}$$

### 5.2 Contraintes liées à la charge des acteurs

La contrainte liée à la charge des acteurs exprime que la charge totale du travail affecté à des acteurs ne doit pas dépasser leurs capacités.

$$\sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^P \gamma_{i\{kl\},j} L_{i\{kl\}} x_{i\{kl\},j} \leq LM_j, \forall j = 1, \dots, N, \forall k = 1, \dots, K$$

Le coté droit de l'inéquation représente la charge maximale qu'un acteur peut supporter pendant une période,  $LM_j$ . Le coté gauche représente la charge affectée totale (de toutes les tâches) d'un acteur. La **durée du travail estimée en cas de sous-qualification** ( $\gamma_{i\{kl\},j} \times L_{i\{kl\}}$ ) est une durée estimée pour réaliser la tâche particulière  $T_{i\{kl\}}$  de chaque acteur  $j$  dû à un manque de compétence. Cette durée est effectivement plus longue que la durée théorique  $L_{i\{kl\}}$ . Si l'acteur est parfaitement qualifié, cette durée est égale à la durée théorique  $L_{i\{kl\}}$ .

### 5.3 Fonction objectifs

Nous avons utilisé les trois critères suivants.

- Minimisation du coût supplémentaire dû au manque de maîtrise de l'acteur dans la discipline.
- Minimisation du coût supplémentaire du tuteur dans la discipline.
- Minimisation du coût lié à l'écart par rapport à l'objectif de compétences.

#### 5.3.1 Fonction de coûts liée au manque de maîtrise dans la discipline

Ce premier coût provient de la sous-qualification de l'acteur

$$\text{Minimiser } \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^P \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C_{i\{kl\}}^1 \times x_{i\{kl\},j} \right]$$

$$C_{i\{kl\},j}^1 = (\gamma_{i\{kl\},j} \times L_{i\{kl\}}) \times S_j$$

Ce coût est un produit entre le temps utilisé ( $\gamma_{i\{kl\},j} \times L_{i\{kl\}}$ ), le taux de salaire  $S_j$  et la variable de décision de l'affectation.

$x_{i\{kl\},j}$  La variable  $C_{i\{kl\},j}^1$  représente un coefficient de coût venant du salarié.

#### 5.3.2 Fonction de coûts liée au manque de maîtrise dans la discipline

Ce deuxième coût (le coût provenant du tuteur) vient du fait que les acteurs sous-qualifiés nécessitent des tuteurs afin de réaliser la tâche avec le niveau de compétence requis. Le rôle principal des tuteurs est donc d'accompagner et d'aider les acteurs sous-qualifiés dans la réalisation du travail. Cela permet également aux acteurs de développer leurs compétences au cours de la réalisation de la tâche. Généralement, les tuteurs consacrent leur temps selon le niveau de compétence acquis de l'acteur. C'est-à-dire que les tuteurs passent plus de temps avec les acteurs peu-qualifiés qu'avec ceux qui sont très qualifiés. Cette relation est en rapport avec le coefficient correcteur. Le coût du tuteur est calculé à partir du taux salaire du tuteur. Nous définissons le coût provenant du tuteur ci-dessous.

$$\text{Minimiser } \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^P \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N C_{i\{kl\},j}^2 \times x_{i\{kl\},j} \right]$$

$$C_{i\{kl\},j}^2 = (\gamma_{i\{kl\},j} - 1) \times L_{i\{kl\}} \times ST, \quad \gamma_{i\{kl\},j} \geq 1$$

Le **coût d'accompagnement** est le produit de la durée d'accompagnement ( $(\gamma_{i\{kl\},j} - 1) \times L_{i\{kl\}}$ ), du taux de salaire du tuteur ( $ST$ ) et de la contribution ( $x_{i\{kl\},j}$ ).

#### 5.3.3 Fonction de coût pénalisant

Elle est due à l'écart par rapport à l'objectif de compétences. Ce coût intègre le concept de compétence dans le pilotage des performances de l'entreprise. La fonction de coût liée à l'objectif de compétences est exprimée ci-dessous.

$$\text{Minimiser } \phi \sum_{i=1}^M (O_i - R_i)$$

Ce coût pénalise la fonction objectif global si on n'arrive pas à atteindre l'objectif de performance. Les variables suivantes sont utilisées dans la définition de ce coût global.

- L'**objectif de compétences**  $O_i$  ( $i=1, \dots, M$ ) décrit le nombre d'acteurs qualifiés, demandés par les tâches génériques.
- A la fin de l'affectation ( $k=K$ ), nous recevons le **nombre de personnes qualifiées à la fin de simulation**  $R_i$  ( $i=1, \dots, M$ ).
- Le **taux pénalisant** est défini par la constante  $\phi$  exprimée en euros par personne manquante.
- Les **seuils de performance**, ( $seuil_i$  ( $i=1, \dots, M$ )) permettent de déterminer si une personne est qualifiée ou non pour une tâche. La variable  $seuil_i$  définit le niveau de similarité minimum pour chaque couple tâche- personne.

#### 5.3.4 Fonction objectif global

Dans cette partie, nous regroupons les trois fonctions coûts expliquées dans les paragraphes précédents.

$$\text{Min } C_1 = \left[ \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^P \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (C_{i\{kl\},j}^1 + C_{i\{kl\},j}^2) x_{i\{kl\},j} \right] + \phi \sum_{i=1}^M (O_i - R_i)$$

avec les contraintes :

$$C_{i\{kl\},j}^1 = (\gamma_{i\{kl\},j} \times L_{i\{kl\}}) \times S_j$$

$$C_{i\{k,l\},j}^2 = (\gamma_{i\{k,l\},j} - 1) \times L_{i\{k,l\}} \times ST, \quad \gamma_{i\{k,l\},j} \geq 1$$

$$\sum_{j=1}^N L_{i\{kl\}} x_{i\{kl\},j} = L_{i\{kl\}}, \quad \forall i = 1, \dots, M, \forall l = 1, \dots, P, \forall k = 1, \dots, K$$

$$\sum_{i=1}^M \sum_{l=1}^P \gamma_{i\{kl\},j} L_{i\{kl\}} x_{i\{kl\},j} \leq LM_j, \quad \forall j = 1, \dots, N, \forall k = 1, \dots, K$$

$$x_{i\{kl\},j} \geq 0, \quad \forall i, j, k, l$$

La première équation est la fonction objectif de l'affectation multi-période. Elle est constituée de trois coûts : le coût provenant du temps de travail supplémentaire du salarié, le coût provenant de la participation du tuteur et le coût pénalisant dû à l'écart par rapport à l'objectif de compétences. La deuxième équation assure que toutes les tâches seront affectées. La troisième équation assure que tous les acteurs n'ont pas été affectés au delà de leurs capacités temporelles.

## 6 METAHEURISTIQUES POUR L'OPTIMISATION: RECUIT SIMULE

Lorsque l'on tient compte du caractère non linéaire de l'évolution de compétence et du caractère multi-périodes de l'affectation, le problème ne peut plus être résolu par la méthode de programmation linéaire. Nous allons donc utiliser une solution approchée en utilisant des métaheuristiques (recuit simulé). Le recuit simulé est un algorithme basé sur une heuristique permettant la recherche de solution d'un problème donné. Il permet notamment d'éviter les minima locaux. La méthode du recuit simulé a été développée par S. Kirkpatrick et al. (1983) et Cerny (1985). C'est une métaheuristique inspirée d'un processus utilisé en métallurgie. Elle est aujourd'hui utilisée en optimisation pour trouver les extrema d'une fonction. Selon [Teghem et Pirlot, 2002], le recuit simulé requiert normalement moins d'effort de programmation et de mise au point qu'un algorithme tabou qui lui-même demande moins qu'un algorithme génétique. Aussi, on peut montrer que, sous certaines conditions (refroidissement lent), une procédure de recuit converge (avec probabilité 1) vers une solution optimale.

## 7 ETUDE DE CAS

Nous avons appliqué notre modèle à l'affectation de ressource dans le cas de la conception de micro-produit. Le cas d'étude est structuré à partir de deux projets européens. Le projet 1 est un projet de capsules endoscopiques pour la thérapie de la tumeur intestinale. Le projet 2 concerne également la conception de capsules endoscopiques mais avec des technologies de capteur différentes

### 7.1 Données d'entrée

Les tâches génériques sont définies à partir des tâches communes entre 2 projets européens (tableau 3).

Les tâches génériques nécessitent la mise en œuvre de 23 disciplines (tableau 4). Nous pouvons classer ces 23 disciplines selon leurs natures en trois catégories: disciplines concernant des connaissances techniques, disciplines concernant des outils (modélisation et simulation, programmation) et disciplines concernant des connaissances managériels

**Tableau 3: Tâches génériques**

	Tâche générique
T1	Définir les spécifications du système
T2	Concevoir l'architecture du système
T3	Intégrer les sous-systèmes
T4	Management & coordination
T5	Concevoir le module « capteur »
T6	Concevoir le module de « vision »
T7	Concevoir le module de « traitement et manipulation des tissus »
T8	Concevoir le module de « locomotion »
T9	Concevoir le circuit intégré
T10	Concevoir le module de « contrôle »
T11	Concevoir le module de « stockage des énergies »
T12	Concevoir le module de « communication sans fils et télémetrie »
T13	Concevoir le module de « navigation à distance »
T14	Développer le module de « capteur nano-biotechnologique »
T15	Développer le module de « capteur micro-optique »

**Tableau 4 : Disciplines**

	Discipline
D1	Acoustique, Vibration
D2	Mécanique, Cinématique (mécanique du mouvement)
D3	Thermodynamique, Transfert thermique, Conversion énergie
D4	Mécanique des fluides, Dynamique des fluides
D5	Electromagnétisme
D6	Electronique
D7	Théorie commande
D8	Traitement image, Traitement signal, Télécommunication
D9	Optique et Vision
D10	Matériaux
D11	Biomédecine (biochimie)
D12	Informatique
D13	CAD, CAM
D14	LabVIEW, SPICE (domaine électronique)
D15	Matlab/Simulink/Dspace
D16	Analyse contrainte, Analyse éléments finis
D17	Modélisation et Simulation (UML, IDEF0, SysML)
D18	Comsol (simulation multi physique)
D19	Optimisation, Méthodes d'aide à la décision
D20	Sûreté fonctionnement (fiabilité, maintenabilité, sécurité)
D21	Ingénierie système
D22	Management de projet (Qualité, Délais, Coût, Risque)
D23	Marketing

### 7.2 Matrice d'affectation

La figure 3 présente l'optimisation par l'algorithme de recuit simulé. La solution initiale représentée par quatre matrices d'affectation (2 projets x 2 périodes) est l'entrée de l'algorithme de recuit simulé. Cette solution initiale respecte les contraintes de charge des tâches et des acteurs. A travers le processus de voisinage, nous obtenons la solution optimale représentant également par quatre matrices d'affectation.

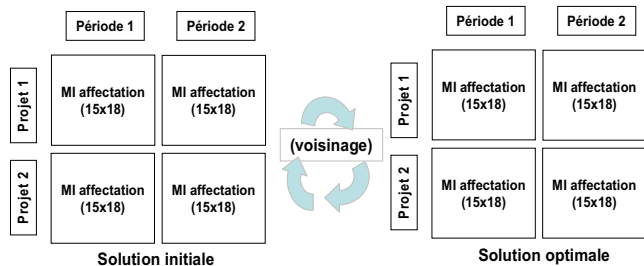


Figure 3 : Optimisation par le recuit simulé

Après deux périodes de simulation ( $k=2$ ), nous obtenons quatre matrices d'affectation optimales. Nous présentons dans le tableau 5 une matrice d'affectation finale représentant le projet 1 ( $p=1$ ) et la période 1 ( $k=1$ ).

Tableau 5 : Matrice d'affectation finale ( $k=1, p=1$ ), coût total=101k€

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18
T1	0,2	0,4	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0
T2	0,2	0	0	0	0	0,2	0,4	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0
T3	0,2	0	0,2	0	0	0	0,2	0	0	0	0	0,2	0,2	0	0	0	0	0
T4	0	0	0	0,2	0	0	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0
T5	0,2	0,2	0	0,2	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T6	0	0,2	0	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0,2	0
T7	0	0	0	0,6	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2
T8	0	0,4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0,2	0,2
T9	0	0	0	0	0	0,4	0	0	0,2	0	0,2	0	0	0	0	0	0,2	0
T10	0	0	0	0	0,2	0	0	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0
T11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,2	0	0,6	0	0	0	0	0	0,2
T12	0	0,2	0	0	0	0,2	0,2	0,2	0	0	0	0	0	0,2	0	0	0	0
T13	0	0	0,2	0	0	0	0	0	0	0	0	0,4	0,2	0,2	0	0	0	0
T14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

### 7.3 Axe financier

Après 4000 simulations, nous avons constaté une diminution de 10% du coût global du projet (de 112k€ à 101k€) à partir de la solution initiale. Le résultat est présenté dans la figure 4

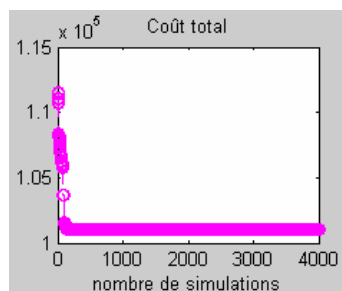


Figure 4 : Axe financier – Variation de coût global

### 7.4 Axe compétence

Nous présentons les résultats obtenus en 3 parties : l'évolution au niveau des disciplines, l'évolution au niveau des tâches et la réussite dans l'objectif de compétences.

#### 7.4.1 Niveau de discipline

La figure 5 présente l'évolution de compétence dans les disciplines. Elle montre le niveau de maîtrise acquis par l'acteur «1» après avoir passé 2 périodes d'affectation. Nous avons pu constater que ce niveau varie s'il s'agit de l'affectation des tâches et de la mise en œuvre dans la discipline considérée. Trois courbes de niveau de maîtrise de 23 disciplines acquises par l'acteur numéro «1» sont

représentées: celles acquises de la période initiale ( $k=0$ ), celles acquises après la première affectation ( $k=1$ ) et celles acquises après la deuxième affectation ( $k=2$ ). Des courbes semblables sont obtenues pour 18 acteurs.

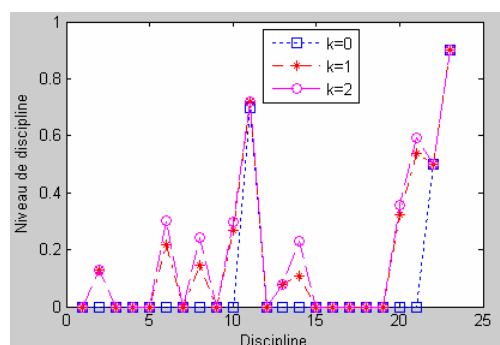


Figure 5: Evolution du niveau de maîtrise dans la discipline de l'acteur «1» pendant 2 périodes de simulation

#### 7.4.2 Niveau de tâche

Le niveau de maîtrise acquis dans les disciplines ayant évolué, l'indicateur de similarité entre tâche-acteur a également changé. L'indicateur de similarité tâche-acteur est considéré comme une mesure du niveau de compétence acquis lors de la réalisation de la tâche. La figure 6 présente le niveau de compétence acquis par l'acteur numéro «1». Trois courbes de variation ont été tracées: celles acquises de la période initiale ( $k=0$ ), celles acquises après la première affectation ( $k=1$ ) et celles acquises après la deuxième affectation ( $k=2$ ). Des courbes semblables sont obtenues pour 18 acteurs.

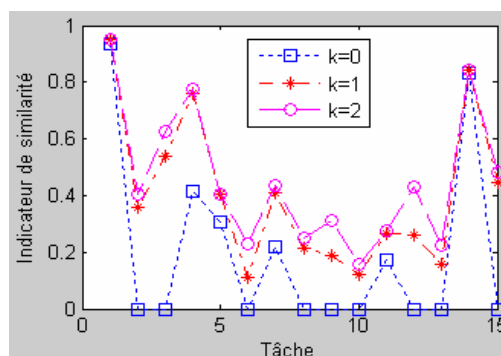


Figure 6 : Axe compétence - Evolution des compétences (tâches) acquis par l'acteur «1»

#### 7.4.3 Objectif de compétences

Concernant la fonction de coût pénalisant dû à l'écart entre le nombre d'acteurs qualifiés que l'on espère obtenir à la fin (objectif de compétence), et celui obtenu réellement à la fin de simulation.

L'objectif de compétences, ses seuils et le nombre des acteurs qualifiés au début de la simulation sont des données d'entrée (tableau 6). Nous constatons que, au début de la simulation, il manque 30 acteurs qualifiés (41-11) par rapport au nombre d'acteurs qualifiés fixés.

Après deux périodes de simulation, nous avons augmenté le nombre de personnes qualifiées, il nous manque 27 acteurs qualifiés (41-14) par rapport au nombre d'acteurs qualifiés fixés. Sachant que l'augmentation du nombre d'acteurs qualifiés dépend du nombre de tâches dans la planification, le fait qu'il n'y ait que 3 acteurs qualifiés supplémentaires après simulation peut être expliqué par le nombre de tâches dans la

planification insuffisant. Cela ne permet pas aux acteurs sous-qualifiés de mettre en œuvre et d'améliorer leurs compétences.

**Tableau 6 : Objectif de compétences et nombre d'acteurs qualifiés**

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	T13	T14	T15	Total
$Seuil_i$	0,8	0,7	0,7	0,8	0,7	0,7	0,7	0,8	0,8	0,8	0,7	0,8	0,7	0,8	0,8	-
$Q_i$ (personnes)	5	2	2	2	2	2	2	2	5	1	2	6	3	3	2	41
$R_i$ -début (personnes)	2	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	4	2	1	0	11
$R_i$ -fin (personnes)	2	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	5	2	1	0	14

## 8 CONCLUSION

Dans cet article, nous avons effectué l'affectation multi-périodes et multi-projets de tâches de conception à des ressources humaines à l'aide de la méthode de recuit simulé. Le modèle d'affectation prend en compte l'évolution des compétences des acteurs du projet pendant la réalisation des tâches. Dans le but de pilotage de compétence, le modèle nous permet de calculer et suivre les niveaux de compétence qui sont changés à chaque période d'affectation. Les compétences sont caractérisées à la fois sur les acteurs (niveau de compétence acquis) et sur les tâches (niveau de compétence requis). La modélisation des compétences est réalisée sur deux niveaux de granularité: niveaux « tâche » par le niveau de compétence de la tâche et niveau « discipline » par le niveau de maîtrise dans la discipline.

L'indicateur de similarité entre tâche-acteur est introduit dans le but de calculer la compatibilité entre tâches et acteurs selon l'attribut de « discipline ». Cet indicateur a pour but d'estimer le coût de sous-qualification dans le problème d'affectation.

En adoptant cette méthode d'optimisation, l'algorithme de recuit simulé cherche à trouver le compromis entre le coût de l'acteur sous-qualifiés (qui est peu élevé), le coût supplémentaire par les tuteurs dû à la sous-qualification des acteurs choisis et le coût pénalisant si on n'arrive pas à atteindre l'objectif de compétences.

Nous avons pu présenter un choix d'affectation qui donne la priorité à la formation des acteurs sous-qualifiés pour atteindre l'objectif de compétence en tenant compte des coûts supplémentaires dus à la sous-qualification. La solution obtenue apporte une diminution des coûts du projet en augmentant 3 acteurs qualifiés après l'affectation, Cela prouve l'hypothèse que l'affectation peut être considérée comme un outil pour améliorer la compétence des acteurs.

Concernant le pilotage des compétences, nous avons montré la courbe d'évolution de niveau de compétence acquis par les acteurs pendant la simulation, à la fois sur les 23 disciplines et les 15 tâches génériques.

En perspective, la finalité attendue de la démarche globale est non seulement de connaître le pourcentage de contribution des participants (ou matrice d'affectation) mais aussi de connaître le groupement des acteurs ou l'architecture du projet (organisation du projet). La matrice d'affectation et l'architecture du projet sont deux informations complémentaires pour la conception des organisations du projet de conception. Une démarche orientée sur l'aspect de produit permettant de prendre en compte la propagation de domaine du produit à domaine de l'organisation dans le but de concevoir une architecture du projet peut être envisagée.

## 9 REFERENCES

Caron, G., Hansen, P., Jaumard, B., (1999) The assignment

problem with seniority and job priority constraints, *Operations Research* 47, vol 3, pp. 449–454.

Zakarian, A., Kusiak, A., (1999) Forming teams: an analytical approach, *IIE Transactions*.

Tseng, T-L., Huang, C-C., Chu, H-W., Gung, R.R., (2004) Novel approach to multi-functional project team formation, *International Journal of Project Management*, vol. 22, p. 147–159.

Hadj-Hamou, K., Caillaud, E., (2004) Cooperative design -A framework for a competency-based approach, 5th International Conference on Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering- IDMME'04.

Fitzpatrick, E.L., Askin, R.G., (2005) Forming effective worker teams with multi-functional skill requirements, *Journal of Computers & Industrial Engineering*, vol. 48, p. 593–608.

Chen, S.J., (2005) An Integrated Methodological Framework for Project Task Coordination and Team Organization in Concurrent Engineering, *Concurrent Engineering*, vol.13, N°3, pp. 185-197.

Rose, B., Robin, V., Caillaud, E., Girard, P., (2006) Comment répondre aux challenges de la gestion des compétences en conception collaborative de produits?, Séminaire "Semaine de la connaissance", Groupe C2EI, Nantes, 26-30 juin.

Sayin, S., Karabati, S., (2007) Assigning cross-trained workers to departments: A two-stage optimization model to maximize utility and skill improvement, *European Journal of Operational Research*, pp. 1643–1658.

Bellenguez-Morineau, O., (2007) Méthode de résolution pour un problème de gestion de projet multi-compétence, Thèse de doctorat, Université de François Rabelais

Gutjahr, W.J., Katzensteiner, S., Reiter, P., Stummer, C., Denk, M., (2008) Competence-driven project portfolio selection, scheduling and staff assignment, *Central European Journal of Operations Research*, vol. 16, No. 3, pp. 281-306

Le Boterf, G., (2002) Ingénierie et évaluation des compétences, éd. d'Organisation (4<sup>ième</sup>), Paris.

Teghem, J., Pirlot, M., (2002) Optimisation approchée en recherche opérationnelle- Recherches locales, réseaux neuronaux et satisfaction de contraintes, Paris, Hermès.