

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <http://www.researchgate.net/publication/283292481>

# Évaluation de la complexité des projets basée sur une analyse en composantes principales

CONFERENCE PAPER · JUNE 2013

3 AUTHORS, INCLUDING:



[El-Awady Attia](#)

Benha University

11 PUBLICATIONS 4 CITATIONS

SEE PROFILE

# ÉVALUATION DE LA COMPLEXITÉ DES PROJETS BASÉE SUR UNE ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

EL-AWADY ATTIA<sup>1</sup>, PHILIPPE DUQUENNE<sup>2</sup>, JEAN-MARC LE-LANN<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>UNIVERSITÉ DE TOULOUSE/ INPT/ ENSIACET/ LGC-UMR-CNRS 5503/PSI/ GÉNIE INDUSTRIEL

4 allée Emile Monso – BP 44362, 31030 Toulouse cedex 4.

{elawady.attia,Philippe.Duquenne,JeanMarc.Lelann}@ensiacet.fr

**Résumé** – Évaluer la complexité d'un projet est important pour apprécier l'effort lié à sa planification ou à son suivi. L'évaluation de cette complexité semble difficile : dans cet article, nous présentons un ensemble de mesures différentes qui peuvent être utilisées pour quantifier les nombreuses caractéristiques d'un projet et de ses besoins en ressources. Des quantificateurs principaux du réseau logique, concernant sa taille, les liens de dépendances, sa forme, son asymétrie et ses goulots d'étranglement seront présentés. D'autres quantificateurs, relatifs aux caractéristiques temporelles, aux charges de travail, et à la disponibilité des ressources seront également analysés. En s'appuyant sur des valeurs normalisées de ces différentes mesures, et en utilisant une base de données de projets différents par les charges de travail et les disponibilités des ressources, des indices agrégés de la complexité du projet seront produits. Les agrégations linéaires de ces indices ont été réalisées en utilisant l'analyse en composantes principales. Par la suite, ces indices ont été utilisés pour évaluer la performance et la robustesse d'une approche méta-heuristiques de planification utilisant des algorithmes génétiques. L'analyse des résultats a montré l'efficacité de certains des indices proposés pour expliquer les variances des résultats d'un ensemble de 400 projets. Par ailleurs, l'un de ces indices que nous avons appelé «indice de densité de projet», peut être utilisé efficacement pour prédire le risque de retards, ou démontrer l'impossibilité de réaliser le projet avec les ressources fixées dans un temps alloué.

**Abstract** – The assessment of project complexity is important in order to predict the outcome of a project scheduling and/or its monitoring. The evaluation of this complexity seems difficult especially with the presence of working time flexibilities as well the multi-skilled workforce with heterogeneous productivity level that differs from skill to another. In this paper, we present a group of different measures that can be used to quantify the numerous characteristics of a project and the required resources. Therefore, the most significant quantifiers of the network regarding to its size, dependencies, shape, asymmetry, and its bottlenecks will be presented. Moreover, the quantifiers related to the temporal characteristics, work-content, and availability of resources will also be discussed and presented. Relying on the normalised version of these measures and using a data set of projects with different descriptions of work-contents and resources availabilities, the smallest number of project complexity indices will be produced. Linear aggregations of these indices were conducted using the principal components analysis. Subsequently, these indices were used in evaluating the performance and robustness of a metaheuristics approach that used genetic algorithms. The result analysis showed the effectiveness of some of the proposed indices to explain the most variance of different outcomes from a data set of 400 projects. Moreover, one of these indices that we called “project weight index”, can be used efficiently to predict the presence of lateness penalties or the un-capability to realise the project with the specified resources during a given specified duration.

**Mots clés** – Gestion du projet, Ressources humaines, évaluation de la complexité, analyse en composantes principales.

**Keywords** – Project management, Human resources, complexity assessment, principal component analysis.

## 1 INTRODUCTION

Les projets complexes rendent délicats les processus de planification et de coordination des activités, et la mesure de cette complexité est vitale pour apprécier les efforts de pilotage et d'amélioration (Bashir et Thomson, 1999). Par ailleurs, on se réfère souvent à la complexité, mais elle n'est pas toujours comprise chez tous de la même manière (Ireland, 2007) ; pire, on assiste souvent à une confusion entre la complexité du réseau et la complexité du projet lui-même (Nassar et Hegab, 2008). (Ireland, 2007) définit le mot “complexe” comme venant du latin “complexus”, qui signifie imbriqué, enlance, et sous-entend une agrégation de sous-parties. Cette interprétation de la complexité rejoint celle de (Nassar et Hegab, 2008) : la complexité globale d'un projet est l'agrégation d'un ensemble de mesures, liées au planning, aux ressources, aux coûts, aux enjeux techniques, technologiques et sociaux, etc.

En dépit des difficultés d'évaluation de la complexité de planification, cette mesure peut s'avérer utile dans plusieurs domaines : comparaison entre algorithmes de planification et évaluation de leurs performances ; l'appréciation de la complexité du réseau logique sert à la chaîne de soutien logistique (Modrak et Semanco, 2011), en ingénierie concourante (Haberle *et al.*, 2000), en maîtrise des procédés industriels (Modrak, 2006), et, d'une manière plus générale, pour toute application utilisant les graphes.

En ce qui concerne la planification de projets avec contraintes de ressources, la difficulté du problème repose sur des caractéristiques liées aux activités et aux ressources. Apprécier la faisabilité d'un programme d'activités passe par la quantification de ces caractéristiques : elles peuvent ensuite être regroupées selon les dimensions du projet. En général, elles sont réparties en trois groupes : le premier ne concerne que le projet, le second rassemble les données relatives aux ressources, et le troisième les interactions entre le projet et les disponibilités des ressources. Nous avons formé trois familles

de variables, dédiées respectivement au réseau logique, aux contraintes temporelles, et aux charges de travail ; cependant, d'autres classifications existent, on pourra utilement se référer aux travaux de (Patterson, 1976), (Browning et Yassine, 2009). Comment caractériser une mesure pertinente? (Latva-Koivisto, 2001) a analysé quelques caractéristiques des mesures de la complexité d'un réseau logique, parmi lesquelles : la validité, la fiabilité, la « programmabilité » (un programme de calcul peut déterminer la valeur de la mesure en un temps fini – de préférence court), facilité d'emploi, intuitivité, et l'indépendance vis-à-vis d'autres mesures. De plus, en nous basant sur les travaux de (Thesen, 1977), nous avons ajouté d'autres caractéristiques, telles que la sensibilité aux changements ou la « normalité » : la normalité signifie que la mesure doit être normalisée sur une période donnée, la limite basse représentant l'instance la plus facile d'un problème, la haute correspondant à la plus délicate.

Dans ce travail, la plupart des mesures de complexité publiées sur les projets sont présentées ; cependant, certaines d'entre elles ont été développées pour caractériser les problèmes d'affectation flexible de ressources humaines. Ces problèmes mettent en avant deux axes de flexibilité : le premier est la polyvalence de la main d'œuvre avec des productivités hétérogènes et variables : pour un opérateur donné, l'efficacité varie de l'une à l'autre des compétences qu'il maîtrise, et son efficacité pour une compétence donnée peut varier avec le temps, en fonction de la pratique qu'il en fait. Le second axe de flexibilité résulte de l'annualisation du temps de travail, qui autorise des fluctuations appréciables des disponibilités individuelles sur un horizon court terme, l'objectif étant le respect d'un quota annuel – et de quelques dispositions réglementaires sur des échelles de temps plus restreintes.

Comme mentionné plus haut, la complexité des projets résulte a priori de l'examen de différents aspects : nous avons donc imaginé des mesures composites pour la quantifier. En nous basant sur une analyse en composantes principales (ACP), nous avons rassemblé les différentes variables inter-corrélées sous le nombre minimum d'indices indépendants. Les résultats de cette ACP ont été appliqués à l'évaluation de la complexité des projets, selon leurs différentes dimension (réseau, charges de travail et ressources) ; de cette application, nous déduisons les indicateurs pertinents de cette complexité.

Ce travail est présenté comme suit : la section suivante présente le problème ; les parties 3 à 7 analysent successivement les mesures liées au réseau, à la chronologie, aux charges de travail, aux ressources et à la distribution des charges de travail. Les sections 8 et 9 présentent la méthode d'agrégation des variables selon l'ACP, et sa mise en application. Enfin, les conclusions et développements de ce travail seront l'objet de la dernière partie.

## 2 PRÉSENTATION DU PROBLÈME

Nous nous sommes intéressés à apprécier la complexité d'un projet sous contrainte de ressources qui peut se présenter comme suit : un programme d'activités, que nous appellerons *projet* par la suite est un ensemble  $I$  de tâches a priori uniques et originales, ordonnancées entre elles ; cette appellation de « projet » est générique, et n'exclut pas un programme de fabrications, par exemple. Nous ne considérons qu'un projet à la fois. L'exécution de chaque tâche  $i \in I$  requiert un certain nombre de compétences comprises dans l'ensemble  $K$  de toutes les compétences représentées dans l'entreprise en charge de réaliser le projet. La durée de toute tâche  $i$  n'est pas prédéterminée de manière figée : elle est estimée à une durée standard  $D_i$ , et doit rester comprise entre deux bornes minimale

et maximale  $[D_i^{min}, D_i^{max}]$ . Par ailleurs, les ressources sont un ensemble  $A$  d'individus (nous ne prenons en compte que les ressources humaines) que nous appellerons *acteurs*, là encore sans préjuger de sa nature : l'acteur peut tout aussi bien être un ingénieur d'études, un acheteur ou un opérateur en atelier. Chacun de ces acteurs «  $a$  » est supposé polyvalent, c'est-à-dire apte à mettre en œuvre différentes compétences ; cette aptitude de l'acteur  $a$  à pratiquer la compétence  $k$  est traduite par une efficacité  $\theta_{a,k}$  comprise dans l'intervalle  $[0,1]$ . Si cette efficacité est de 1, l'acteur est pleinement compétent sur cette compétence  $k$  : il exécutera toute tâche sur laquelle il sera affecté pour cette compétence dans la durée standard  $D_i$  – alors que tout autre acteur de compétence non nominale (c'est-à-dire inférieure à 1) demandera un temps plus long, augmentant le coût de réalisation (nous supposons que les coûts des différents acteurs sont égaux).

Cette influence de l'efficacité sur le temps d'exécution explique l'impossibilité de prédéfinir une durée pour une tâche : cette durée résultera des choix d'affectation des acteurs. Dans notre cas, on considérera qu'il existe pour chaque compétence  $k$  une efficacité minimale  $\theta_k^{min}$  en dessous de laquelle un acteur ne pourra pas être affecté, pour des raisons économiques ou liées à des exigences de qualité du travail : pour chaque acteur affecté sur une tâche pour sa compétence  $k$ ,  $\theta_{a,k} \in [\theta_k^{min}, 1]$ . De plus, l'efficacité varie avec le temps pour tout individu et pour chacune de ses compétences : elle peut s'accroître avec l'accumulation de la pratique, ou au contraire régresser si la compétence est mise en sommeil trop longtemps.

Par ailleurs, nous considérons que l'entreprise a adopté une politique de modularité de temps de travail : les horaires des employés peuvent varier en fonction des charges prévues ; chaque acteur est astreint à un quota annuel, dont la distribution peut être irrégulière selon les jours ou les semaines, indépendamment des autres acteurs. Ces variations peuvent être limitées par des contraintes réglementaires (maxima journalier, hebdomadaire, ou sur un horizon glissant : période de 12 semaines consécutives, conformément à la loi du travail en France), ou internes à l'entreprise (par exemple, décision de ne pas mobiliser un salarié pour une journée de moins de trois heures). Pour plus de détail, on peut se référer à (Attia *et al.*, 2011)(Attia *et al.*, 2012c).

## 3 PARAMÈTRES LIÉS AU RÉSEAU

### 3.1 Taille du réseau

Le nombre de tâches et/ou de nœuds du réseau est un des paramètres essentiels, mentionné dans quasiment toutes les publications antérieures, notamment dans les problèmes de planification sous contraintes de ressources RCPSP (Kolisch *et al.*, 1995), (Valadares Tavares *et al.*, 1999), (Mendes *et al.*, 2009), les problèmes d'équilibrages de chaînes d'assemblage, (Otto *et al.*, 2011), les problèmes de transport ou de chaîne de soutien logistique, etc. Nous l'avons donc utilisé comme l'un des marqueurs de la taille du projet. Afin de normaliser ce paramètre sur  $[0,1]$ , nous pouvons le définir comme  $P_t = (2 / (1 + e^{-\log(t)})) - 1$ ,  $I$  étant le cardinal de l'ensemble des tâches du projet :  $P_t$  a une valeur de zéro quand le projet ne comprend qu'une tâche, et tend vers 1 quand  $I$  tend vers l'infini.

### 3.2 Topologie du réseau

Le mot « topologie » désigne ici l'étude de la continuité et de la connectivité ; il se réfère aussi à la structuration du réseau. La détermination de ce facteur relatif au réseau logique du projet retient l'attention des chercheurs depuis le milieu des

années 60, où il était utilisé pour représenter le degré d'interconnexion ou d'interdépendance entre les activités du projet. Il reflète également le degré de complexité dans la planification du projet exprimée par la complexité combinatoire du graphe de ses tâches ; il peut donc être utilisé pour percevoir la difficulté d'analyse d'un réseau donné.

De nombreuses corrélations ont été établies qui tenaient compte de la structure du graphe. Nous discuterons et comparerons ici quelques mesures concernant les graphes des potentiels – tâches, ce mode de représentation du réseau logique des projets étant maintenant le plus répandu.

### 3.2.1 Complexité du réseau

Une mesure de la complexité du réseau  $C_r$  a été proposée par (Kaimann, 1974), qui la définit en fonction des nombres d'arcs  $N_a$  et de sommets  $N_t$  comme  $C_{NC} = N_a^2 / N_t$ . Cette mesure s'applique d'ailleurs aussi bien en potentiels – tâches qu'en potentiels – étapes. En dépit de son peu de sensibilité, et de ce que des arcs redondants ne doivent pas accroître la complexité d'un réseau (alors qu'ils accroissent  $C_{NC}$ ), une évaluation similaire a été retenue par (Kolisch *et al.*, 1995) pour leur générateur de projets « *PROGEN* », en ne retenant que les arcs non redondants : ces derniers proposaient le rapport  $C = N_a / N_t$ , dans lequel le nombre d'arcs est restreint aux liens non redondants, et le nombre de tâches  $N_t$  inclut les jalons de début et de fin. Ce rapport a été retenu par (Nassar et Hegab, 2008) comme mesure de la complexité du réseau, développée pour un compagnon du logiciel commercial « *MS Project* » ; ils ont proposé de déterminer les nombres minimal et maximal d'arêtes dans un réseau comprenant un nombre donné de tâches : la complexité de tout réseau peut alors être appréciée par référence à ces bornes, puis ramenée dans l'intervalle [0,100] par projection logarithmique. Sur ce même rapport, une autre projection linéaire a été proposée, « connu ici comme *CNC* » : selon eux, la principale limite de cette mesure pour comparer et évaluer différentes planifications d'un seul et même projet. Par ailleurs, ils soulignent que les contraintes redondantes doivent être supprimées avant le calcul du critère. A ce sujet, (Bashir, 2010) a proposée une méthode adaptée de l'*ISM - Interpretive Structural Modeling* qui transforme le réseau logique du projet en un graphe à arêtes minimales sans contraintes redondantes.

### 3.2.2 Nombre maximal d'arbres

(Temperley, 1981) a envisagé une classification des graphes basée sur la complexité des connexions qu'il présente. Il a proposé une quantification de cette complexité par le nombre  $NT$  d'arbres distincts que le graphe peut contenir ; ce nombre est déterminé en utilisant ce qu'il appelle le « déterminant de génération d'arbres »  $Det_{ii}$ , qui peut être défini pour tout graphe ne comportant ni liens redondants ni cycles. Selon (Latva-Koivisto, 2001), cette méthode est applicable aux graphes orientés, et  $NT$  est calculé comme :

$$NT = \sum_{i \in \{Les\ puits\}} Det_{ii}$$

### 3.2.3 Restrictions imposées par les contraintes

Cette mesure a été introduite à l'origine par (Thesen, 1977) pour apprécier combien dans un projet les contraintes d'antécédence entre tâches restreignaient les ordonnancements possibles. Les difficultés liées à la détermination des ordonnancements possibles ont suggéré d'autres manières de quantifier ce phénomène, toujours en veillant à ne travailler que sur des graphes ne présentant pas d'arcs redondants. En partant des travaux de Thesen, (Schwindt, 1995) a présenté un estimateur de restriction utilisé dans le contexte des *RCPSP* :

$$RT = \frac{2 \sum_{i,j} \varphi_{i,j} - 6(I-1)}{(I-2)(I-3)} \quad (1)$$

où les  $\varphi_{i,j}$  sont les éléments de la matrice de connectivité, matrice définie comme la fermeture réflexive transitive de la matrice d'adjacence ( $I \times I$ ), pour laquelle les éléments  $i,j$  sont égaux à 1 s'il existe un arc  $\langle i,j \rangle$  dans le graphe, et à zéro sinon. Du coup,  $\varphi_{i,j} = 1$  s'il existe dans le graphe un chemin partant de  $i$  et reliant le sommet  $j$  (ou si  $i=j$ ).  $RT$  est défini de manière à être compris dans l'intervalle [0,1] : il prend la valeur 0 si toutes les tâches sont en parallèle, et 1 si elles sont toutes séquentielles.

### 3.2.4 Robustesse du réseau

En raison de la similitude entre les *RCPSP* et les problèmes de cadencement de lignes d'assemblage (*assembly line balancing problem - ALBP*) (De Reyck et Herroelen, 1996), des outils de mesure ont été adoptés à partir des *ALBP* pour être utilisés dans les *RCPSP* et vice-versa. Par exemple, la robustesse « order strength - *OS* » a été introduite par (Mastor, 1970) pour caractériser les problèmes *ALBP* :  $OS = 2N_a / [N_t \times (N_t - 1)]$  L'utilisation de la mesure de la robustesse du réseau afin de caractériser la topologie du projet a été adoptée par (Demeulemeester *et al.*, 1996) pour leur générateur de projets "RanGen". En utilisant l'*OS* et une mesure de la complexité modifiée par (Kolisch *et al.*, 1995), (Browning et Yassine, 2009) ont introduit une nouvelle mesure  $CI$  de la complexité d'un réseau, normalisée sur [0, 1], et présentée comme :

$$CI = \frac{E^n - E_{min}^n}{E_{max}^n - E_{min}^n} \quad (2)$$

Dans cette expression,  $E^n$  est le nombre d'arcs non redondants et  $E_{min}^n$  est la borne inférieure de  $E^n$  : pour un réseau de  $N_t$  sommets,  $E_{min}^n = N_t - 1$  (le cas d'un réseau intégralement linéaire).  $E_{max}^n$  est une borne sup de ce même réseau – sans tenir compte des jalons de début et de fin.

### 3.2.5 Paramètres significatifs de la topologie du réseau

Nous avons procédé à une étude comparative entre les différents paramètres énumérés ci-dessus pour apprécier leurs poids respectifs. Ils ont tous été normalisés dans l'intervalle [0,1] – (et rebaptisés *S-C*, *S-CNC*, *S-NT*, *S-RT*, *S-CI*). Ces paramètres ont d'abord été calculés pour un échantillon de 400 projets adoptés de la bibliothèque (PSPLib, 1996), puis adaptés (Attia *et al.*, 2012a). Les 100 premiers projets (de 1 à 100) comprennent 30 tâches, les 100 suivants, 60, les projets de 201 à 300 comptent 90 tâches ; enfin, les 100 derniers en comptent 120 tâches. Chacune de ces catégories est divisée en 3 groupes de nombres de liens (non redondants) croissant. A l'intérieur des ces groupes, la topologie du réseau évolue.

La figure 1 décrit la sensibilité de ces paramètres normalisés face à des changements de topologie. Pour un nombre de tâches fixé, *S-CNC* et *S-C* gardent des valeurs constantes – et l'un comme l'autre restent constants à nombre de tâche et nombre de liens fixés. Même si *S-C* est insensible au nombre de tâches, ce qui n'est pas le cas de *S-CNC*, nous retombons sur les mêmes conclusions que (Elmaghraby et Herroelen, 1980) et (Latva-Koivisto, 2001) : ces deux paramètres ne reflètent pas la topologie du réseau.

Le nombre de sous-arborescences  $NT$ , très sensible avant standardisation, a posé des problèmes d'ordres de grandeur :  $NT$  croît exponentiellement avec le nombre de liens. Par exemple, pour le groupe de 30 tâches, les valeurs retournées allaient de  $1,2 \times 10^4$  à  $2,4 \times 10^9$  ... et de  $3,5 \times 10^{15}$  à  $2,8 \times 10^{34}$  pour 120 tâches : les écarts sont tels qu'après normalisation, ce paramètre semble insensible. Les valeurs de *S-NT* que nous

présentons ici sont en fait, afin d'atténuer cet effet d'écrasement, les valeurs normalisées du paramètre  $NT' = \log(NT)$ .

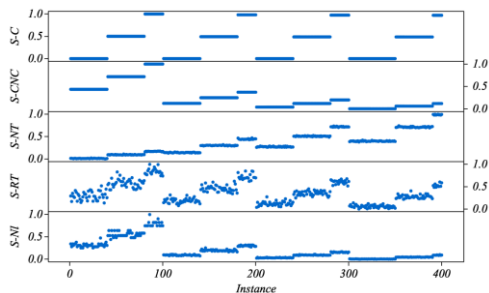
Selon la figure 1,  $S-NT$  semble positivement sensible à l'accroissement du nombre de tâches, inversement à  $S-CNC$ . En étudiant les corrélations respectives de  $NT'$  et  $CNC$  avec le nombre d'activités  $P_i$ , nous avons trouvé pour  $NT'$  un coefficient de corrélation de Pearson de  $r = 0,756$ , ce coefficient étant de  $r = -0,513$  pour  $CNC$ . Cette faible sensibilité rend le paramètre  $NT'$  peu apte à exprimer efficacement la complexité de la topologie du réseau.

En ce qui concerne  $CI$ , il affiche un peu plus de sensibilité vis-à-vis de la topologie que  $CNC$  et  $NT'$ , même s'il leur est fortement corrélé ( $r = 0,991$  et  $-0,490$ ), ainsi qu'avec  $P_i$  ( $r = -0,869$ ).

Selon la figure 1, le paramètre le plus sensible aux changements de topologie du réseau s'avère  $RT$  : il réagit peu aux changements de nombre de tâches, mais est fortement influencé par les modifications de topologie à nombre de relations constant, et encore plus lorsque ce nombre évolue. Il se montre plus intéressant que  $NT$  ou  $CI$ , d'autant plus que :

- la multiplication de  $RT$  avec le nombre de tâches ( $RT \times I$ ) est très fortement corrélée avec  $NT'$  ( $r = 0,969$ ),
- La division de  $RT$  par le nombre de tâches ( $RT / I$ ) est très fortement corrélée avec  $CI$  ( $r = 0,987$ ).

Nous adopterons donc le paramètre  $RT$  pour caractériser la topologie du réseau pour un projet. Il offre de plus l'avantage d'être le plus souvent déjà normalisé.



**Figure 1.** les valeurs normalisées de ( $C$ ,  $CNC$ ,  $NT$ ,  $RT$ , et  $CI$ )

### 3.3 Forme du réseau

La forme est une caractéristique du réseau basée sur ses contours. Elle peut être définie sur les considérations de la longueur du réseau, sa largeur, ou le rapport entre les deux (Boushaala, 2010); on peut leur ajouter un examen de l'asymétrie du réseau.

#### 3.3.1 La longueur et la largeur du réseau

Le *facteur de longueur* du réseau est défini par (Valadares Tavares et al., 1999) à partir de son chemin le plus long en termes de rangs. A partir du rang maximal  $NL$  du réseau, ce facteur est déterminé par  $NS = (NL - 1) / (I - 1)$ ; il est normalisé sur  $[0,1]$ , une valeur  $NS = 0$  désigne un réseau complètement parallèle, alors que  $NS = 1$  révèle un réseau intégralement linéaire.

Le facteur de longueur examine l'étirement du réseau sur l'axe horizontal : le *facteur de largeur* s'intéresse à son étalement vertical, et se base sur les nombres  $WL(l)$  d'activités présentes à chacun des rangs  $l \in [1, NL]$ . La largeur maximal est désignée par  $MW = \text{Max}\{WL(l), l \in [1, NL]\}$ .

Le rapport de forme ( $AR$ ) est une mesure adimensionnelle courante pour exprimer les rapports largeur/longueur de formes planes, d'images, ... (Pascue, 1996) a proposé de l'utiliser pour des réseaux, en définissant dans ce contexte ce rapport de forme par  $AR = NS / MW$ ; selon cette convention,

plus le réseau est linéaire, plus le rapport de forme augmente ; au contraire, plus le réseau est compact et concerne un faible nombre de rangs, plus  $AR$  tend vers zéro : comme nous recherchons une appréciation de la complexité des réseaux, et qu'un réseau est plus délicat à traiter lorsqu'il est fortement ramifié que s'il est majoritairement linéaire, nous retiendrons comme indicateur l'inverse de ce rapport de forme.

#### 3.3.2 Asymétrie

Pour illustrer une distribution asymétrique des tâches du réseau au long des  $NL$  rangs, nous proposons d'avoir recours à une description statistique  $Asym$  de cette asymétrie de la répartition des tâches rang par rang. La valeur de  $Asym$  peut être positive, négative ou nulle. Pour normaliser cette mesure, nous avons recours à la valeur standardisée  $S-Asym = 1 / (1 + e^{Asym})$ . Cette valeur normalisée tend ainsi vers zéro lorsque les tâches se concentrent au début (sur la gauche) du réseau ; lorsque les activités sont massées en aval du réseau (à droite),  $S-Asym$  tend vers un et reflètent le risque d'un projet dans laquelle le plus grand nombre des activités a lieu à proximité de la date d'achèvement.

#### 3.4 Goulots d'étranglement

Comme dans l'étude des systèmes productifs ou logistiques, les goulots d'étranglement en ordonnancement peuvent mettre en évidence un point faible du réseau, avec les mêmes risques associés de saturation en amont de ce goulot, et d'inactivité en aval. Ces goulots d'étranglement dans la structure du réseau sont déterminés par l'examen, pour une tâche donnée de ses antécédents et successeurs immédiats. Les travaux de (Johnson, 1967), ou encore (Boushaala, 2010) concordent sur l'étude, pour toute tâche  $i \in I$  de l'ensemble ( $PR_i$ ) de ses antécédents et/ou de ses successeurs ( $SU_i$ ). Le degré de la tâche a été présenté (Otto et al., 2011) comme une manière de rendre plus pertinente cette approche : le degré de la tâche  $i$  est tout simplement, la somme de ses antécédents et successeurs directs :  $TD_i = \{PR_i + SU_i\}$ . Leur valeur maximale  $TD_{max} = \text{Max}(TD_i), i \in I$ , peut être considérée comme la mesure de la fragilité du réseau sur cet aspect.

## 4 PARAMÈTRES RELATIFS AU TEMPS

### 4.1 Durées des tâches:

Les caractéristiques temporelles du projet ont déjà été utilisées dans l'analyse de la performance des méthodes heuristiques par (Patterson, 1976). Certains indicateurs temporels qui s'appuient sur les durées peuvent être utilisés, comme la somme de durées des activités, ou la moyenne, ou encore la variance de ces valeurs. Dans le problème qui nous occupe, toute tâche  $i$  n'est pas définie par une durée fixe, mais par une durée indicative comprise entre deux bornes,  $D_i \in [D_i^{min}, D_i^{max}]$ . Des descriptions similaires basées sur une distribution des probabilités de durée selon une loi bêta permettent de calculer la valeur moyenne de la durée  $\mu d_i = (D_i^{min} + 4 \times D_i + D_i^{max}) / 6$  et sa variance  $vd_i = (D_i^{max} - D_i^{min})^2 / 36$  - ce sont les grandeurs que nous avons retenues. Il est dès lors aisé de calculer la moyenne des durées des tâches ( $ATMD = \sum \mu d_i / I$ ), et/ou leur écart-type ( $ATSD$ ).

### 4.2 Durée contractuelle du projet

La durée contractuelle  $L$  du projet résulte d'un agrément entre maître d'ouvrage et maître d'œuvre - elle est généralement assortie d'une période de grâce (tolérance) également négociée au-delà de laquelle le montant du contrat peut être diminué de pénalités de retard. On peut également prendre en compte qu'un achèvement anticipé du projet peut entraîner pour le

maître d'œuvre des coûts de stockage – ou des coûts d'immobilisation de trésorerie (Vidal *et al.*, 1999). Une des difficultés de planifier le projet viendra de la confrontation de cette durée contractuelle  $L$  avec la durée du chemin critique ; dans notre cas, où chaque tâche a une durée non prédéterminée  $D_i \in [D_i^{min}, D_i^{max}]$ , nous proposons d'apprécier cette difficulté via un *facteur de durée contractuelle du projet* :

$$PCDF = 1 - (L - CP^{min}) / (\sum_{i=1}^I D_i^{max} - CP^{min}) \quad (3)$$

Dans cette équation,  $CP^{min}$  est la durée du chemin critique déterminé lorsque toutes les tâches du réseau ont pour durée la valeur minimale ( $D_i^{min}$ ). Si on a vérifié que  $L \leq \sum D_i^{max}$ , la valeur de  $PCDF$  sera dans l'intervalle  $[0,1]$  : une valeur proche de zéro indique un cas où le délai contractuel s'avère peu contraignant – mais plus  $L$  tendra vers la valeur de  $CP^{min}$ , plus cet indicateur  $PCDF$  s'approchera de 1.

#### 4.3 Paramètres liées au temps et le réseau du projet

Cette catégorie présente des paramètres qui reflètent d'une certaine manière la prise en compte simultanée de la topologie du réseau du projet et des durées des activités. Selon (Davies, 1973), la *densité du réseau* est basée sur l'examen des marges libres ; considérant qu'une marge libre peut absorber un peu de retard sans conséquences, une corrélation pour quantifier la densité du réseau sur la base de ces marges libres (*Density-based free floats* :  $DFF$ ) a été présentée par (Pascoe, 1966) :

$$DFF = (\sum_{i=1}^I \mu d_i) / (\sum_{i=1}^I \mu d_i + \sum_{i=1}^I \text{ff}_i) \quad (4)$$

$DFF$  est toujours dans l'intervalle  $[0, 1]$  : des valeurs élevées indiquent une très petite marge libre moyenne, entraînant moins de latitude dans la planification du projet du projet. Dans notre problème, nous avons calculé ces marges en nous basant uniquement sur les durées standard  $D_i$  des tâches. Notons que selon (Patterson, 1976), le nombre moyen de tâches possédant de la marge libre " (*average number of tasks processing free float -ATFF*) peut également être utilisé.

## 5 ANALYSE DU TRAVAIL

### 5.1 Besoins en ressources des activités

Les besoins en ressources peuvent être représentés par la mesure de la densité de la matrice tâches-compétences, en considérant que les ressources sont des opérateurs avec des compétences différentes. La densité de cette matrice binaire peut être mesurée à l'aide du facteur de ressources ( $RF$ ), développé par (Pascoe, 1966) pour refléter la relation travail/besoin en ressources, défini comme le rapport entre le nombre moyen des différentes ressources mobilisées par les tâches sur le nombre de total des ressources disponibles.

$$RF = \frac{1}{I \times K} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K \begin{cases} 1 & \text{If } \Omega_{ik} > 0 \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

Dans cette équation,  $\Omega_{i,k}$  désigne la quantité de travail (en heures) requise dans la compétence  $k \in K$  pour l'exécution de la tâche  $i \in I$ .  $RF$  est normalisé sur  $[0,1]$  ; si  $RF$  tend vers 1, cela signifie que toutes les activités nécessitent l'intégralité des ressources disponibles pour leur exécution – avec toutes les difficultés de planification que ça laisse envisager.

### 5.2 Quantité de travail

Ce paramètre peut être utilisé pour mettre en évidence les compétences les plus chargées du projet, donc les plus susceptibles d'introduire des contraintes de disponibilités. Nous avons retenus les valeurs maximale  $MaxWC$  et minimale  $MinWC$  parmi toutes les compétences identifiées. Par ailleurs, la quantité totale de travail  $W$  du projet peut servir d'indicateur

du besoin global en ressources du projet, pour en aider le dimensionnement.

### 5.3 Profil des plans de charge

L'examen du plan de charge d'une ressource fait apparaître les valeurs maximale, minimale, moyenne ou encore variance du besoin ; ou encore, le barycentre de cette demande. Les caractéristiques du profil d'un plan de charge concernent les deux axes, temporel et amplitude de la demande. En ce qui concerne l'axe temporel, on peut construire le vecteur du besoin en compétences à partir du réseau logique du projet planifié au plus tôt :  $\overrightarrow{RR}_k = \{RR_{k,1}, RR_{k,2}, RR_{k,3}, \dots, RR_{k,CP}\}, \forall k \in K$ . Ce vecteur permet (Davis, 1975) une mesure appelée « Product moment » qui permet d'indiquer la position des périodes de principales demandes de ressources du projet ; il a servi (Kurtulus et Davis, 1982) à proposer un facteur de charge des ressources utilisé en planification multi projets (Browning et Yassine, 2009). Un examen simultané de la position et de l'amplitude de charge maximale a été proposé par (Kurtulus et Narula, 1985), mesure combinée appelée facteur de charge maximal.

Comme mentionné précédemment, nous avons adopté un examen séparé de l'amplitude et de la localisation. Par conséquent, pour les variables de localisation, nous proposons une mesure adimensionnelle, « *profile central factor - PCF* », il s'agit simplement du centre de l'aire d'un profil de charge donné. Il peut être calculé en fonction du moment de produit de (Davis, 1975) donné par l'équation (6) :

$$PCF_k = \frac{\sum_{t=1}^{CP} [RR_{k,t} (t-1/2)]}{CP \times \sum_{t=1}^{CP} RR_{k,t}} \quad (6)$$

Cette formule détermine le centre de l'aire du profil de charge par rapport à la date de début du projet. Cette mesure est normalisée sur la longueur du chemin critique du projet, il trouve toujours à l'intérieur de l'intervalle de  $[0, 1]$  et désigne le point (date) sur le chemin critique à laquelle la charge de travail nécessaire est exactement divisée en deux. La valeur moyenne de tous les profils de ressources peut être utilisée pour indiquer le  $PCF$  d'un projet. D'autres mesures purement orientées « dates » peuvent être proposées, telles que l'emplacement de la charge maximale requise – « *resource-bottlenecks location - RBL* » :  $RBL_k = \frac{\sum_{z=1}^E t_z}{\sum_{z=1}^E t_z} (CP \times E_o)$ , où les  $t_z$

représentent les périodes de temps sur lesquelles des pics de charge sont observés, et  $E_o$  le nombre de ces pics. Cette mesure est normalisée sur  $[0,1]$ , une valeur proche de 0 indiquant des pics de consommation de ressources proches du début du projet. Une mesure plus globale pour l'ensemble des compétences peut être exprimé par la valeur moyenne

$$RBL = \frac{\sum_{k=1}^K RBL_k}{K} \cdot$$

En ce qui concerne l'amplitude des profils de charge, nous proposons de recourir au facteur du profil moyen des charges - average resources profile factor :  $ARPF = \frac{\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^{CP} RR_{k,t}}{K \times CP}$ , qui représente la demande quotidienne moyenne sur le projet. Nous nous proposons également d'examiner les valeurs maximales du plan de charge pour chaque compétence  $RR_k^{max}$ , ainsi que leur moyenne – *average resources bottleneck ARB* =

$$\frac{\sum_{k=1}^K RR_k^{max}}{K} \cdot$$

Pour ce qui est de la distribution des profils de charge, on peut recourir à un coefficient de variation défini comme :

$$CV_k = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^{CP} (RR_{k,t} - \overline{RR}_k)^2}{(CP-1) \overline{RR}_k}} \quad (7)$$

Ce coefficient est le rapport pour une compétence donnée entre l'écart type de la demande et sa moyenne  $\overline{RR}_k$ . On peut également s'intéresser à la moyenne de ces coefficients de variations pour l'ensemble des compétences :  $CV = \frac{\sum_{k=1}^K CV_k}{K}$ .

Concernant la complexité technique, dans cette étude, nous proposons d'intégrer uniquement le degré de similarité  $SD$  entre les compétences présenté dans (Attia, *et al.*, 2012a).

## 6 DISPONIBILITÉ DES RESSOURCES

Les besoins en ressources sont toujours mesurés par rapport aux disponibilités. L'effort de calcul nécessaire à la résolution d'un problème donné est logiquement fonction du nombre et de la disponibilité des ressources ; certains auteurs tels que (Elmaghraby et Herroelen, 1980) ont fait valoir qu'il existe une relation en cloche entre l'effort de calcul et la disponibilité des ressources. Cette conjecture est confirmée par (De Reyck et Herroelen, 1996) en utilisant le degré de contrainte des ressources ( $RC$ ) introduit par (Patterson, 1976). Pour mesurer seulement la disponibilité des ressources, indépendamment de la demande des activités, on peut construire pour chaque compétence un vecteur de l'effectif réel représentant l'ensemble de la main-d'œuvre disponible par période :  $A_{k,t}$ . A partir de ce vecteur, la disponibilité moyenne liée à la longueur du chemin critique peut être déterminée :  $\overline{RA}_k = \frac{\sum_{t=1}^{CP} |A_{k,t}|}{CP}$

Si l'effectif disponible est constant quelle que soit la période ( $A_{k,t} = A_k \forall t \in CP$ ), l'effectif réel moyen peut être déterminé :

$$ARW = \frac{\sum_{k=1}^K |A_k|}{K}$$

En raison de la nature hétérogène des productivités d'une main-d'œuvre par ailleurs polyvalente, nous proposons d'utiliser la *productivité globale moyenne* des opérateurs. Comme la productivité de chaque opérateur dans la pratique d'une compétence donnée est déjà normalisée sur l'intervalle  $[0, 1]$ , la productivité globale moyenne  $\Theta$  est également normalisée, et peut être calculée ainsi :

$$\Theta = \frac{1}{K} \times \sum_{k=1}^K \sum_{a=1}^A \theta_{a,k} / \sum_{k=1}^K |A_k| \quad (8)$$

Quand la valeur de  $\Theta$  approche l'unité, elle indique que la plupart des personnels mobilisés sont des experts dans la pratique des compétences requises. Afin de prédire les capacités de travail disponibles, nous proposons d'utiliser ce paramètre comme un indicateur de la capacité globale, en l'intégrant au nombre réel des ressources de chaque type. Cette capacité disponible peut être calculée soit par le nombre d'heures de travail ou le nombre de personnes compétentes. La capacité totale disponible (*overall available capacity – OAC*) du personnel (en nombre équivalent de personnes) peut être calculée et définie par :  $OAC = \Theta \times A$ .

## 7 INTERACTIONS ACTIVITÉS / RESSOURCES

L'interaction entre les activités du projet et les ressources peut présenter des obstacles liés à la rareté des ressources, rareté définie comme le risque de voir la demande pour ces ressources excéder la disponibilité. Comme l'a montré Pascue (1966), la rareté des ressources est le point délicat des problèmes d'affectation de ressources. Une augmentation de la complexité des réseaux ou des ressources nécessaires est susceptible de gêner considérablement la résolution d'un problème donné. Pour ces raisons, la mesure de la rareté des ressources est très importante, donc par la suite, nous présentons certaines de ces méthodes de mesure.

### 7.1 Robustesse des ressources

Afin de quantifier la relation entre les besoins en ressources et leurs disponibilités, un facteur de robustesse des ressources (*Resource Strength – RS*) a été proposé par (Cooper, 1976). Il est défini comme le rapport entre les quantités disponibles de ressources de compétence  $k$  aux besoins moyens de cette compétence par les activités. Deux inconvénients peuvent être reprochés à ce paramètre :  $RS$  n'est pas normalisé sur  $[0, 1]$ , et une petite valeur de  $RS$  ne garantit pas une solution réalisable. (Kolisch *et al.*, 1995) ont modifié la corrélation précédente pour les « *RCPS* multi-mode ». En partant de ces modifications, et en les adaptant à notre contexte, nous avons défini un besoin minimum en ressources, calculé pour chaque compétence dans le cas où toutes les tâches du projet ont pour durée leur durée maximale :  $R_k^{\min} = \max_{i=1}^I [\Omega_{i,k} / D_i^{\max}]$ .

Réciproquement, un engagement maximum des ressources  $R_k^{\max}$  peut être déterminé lorsque toutes les tâches sont « comprimées » à leur durée minimale. En considérant une capacité maximale disponible par période  $Q_k$  calculée sur la base de la réglementation française, avec des heures normales de travail  $C_{SO} = 35$  heures par semaine, pour  $NJS = 5$  jours par semaine, le facteur de robustesse des ressources peut être exprimé par :

$$RS_k = \frac{Q_k - R_k^{\min}}{R_k^{\max} - R_k^{\min}}, \text{ où } Q_k = \Theta \times |A_k| \times \frac{C_{SO}}{NJS} \quad (9)$$

$RS$  ainsi calculé donne la facilité de planification d'un projet, et non sa complexité liée à la rareté des ressources. Par conséquent, afin d'utiliser une échelle traduisant la difficulté du problème, nous nous proposons de le normaliser. Nous appellerons  $RSI$  la nouvelle mesure de la rareté des ressources : elle est calculée à partir de la robustesse moyenne des ressources pour toutes les compétences ( $\overline{RS}$ ) :

$$RSI = 2 / (1 + e^{-\frac{1}{\overline{RS}}}) - 1 \quad (10)$$

### 7.2 Taux de contrainte sur les ressources

La mesure du taux de contrainte sur les ressources a été développée par (Patterson, 1976) pour être utilisée comme paramètre représentatif des ressources lié à son étude sur la performance heuristique en fonction des caractéristiques du projet. Comme l'ont établi (De Reyck et Herroelen, 1996), cette mesure peut être considérée comme une mesure de la seule disponibilité des ressources, indépendante des données du réseau. Pour la considération de ces ressources, nous proposons l'expression (11), où  $\overline{TR}_k$  est une exigence moyenne de la tâche pour la compétence  $k$  (en heures de travail par jour) :

$$RC_k = \overline{TR}_k / Q_k ; \overline{TR}_k = \sum_{i=1}^I \left( \frac{\Omega_{i,k}}{\mu d_i} \right) / \sum_{i=1}^I \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ If } \Omega_{i,k} > 0 \\ 0 \text{ Otherwise} \end{array} \right\}, \forall k \in K \quad (11)$$

La complexité du projet liée au niveau de contrainte sur les ressources peut être estimée sur la base d'une valeur moyenne :  $RC = \frac{\sum_{k=1}^K RC_k}{K}$

En intégrant  $RC$  et les dimensions temporelles du projet, nous avons modifié le modèle de (Patterson, 1976), de sorte que le taux périodique de contraintes sur les ressources, « *temporal resource constrainedness – TLC<sub>k</sub>* » puisse mesurer le rapport entre la charge de travail de la compétence  $k$  et le nombre total d'heures disponibles dans cette compétence pour la durée du projet. Cette durée tient compte de la durée contractuelle  $L$ , assortie d'une période de grâce  $\beta$  :

$$TRC_k = \sum_{i=1}^I \Omega_{i,k} / \left[ \sum_{i=1}^I \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ If } \Omega_{i,k} > 0 \\ 0 \text{ Otherwise} \end{array} \right\} \right] \times \left[ \Theta \times |A_k| \times \frac{C_{SO}}{NJS} \times (L + \beta) \right], \forall k \in K \quad (12)$$



La valeur moyenne  $TRC = \frac{\sum_{k=1}^K TRC_k}{K}$  peut être utilisée pour exprimer la complexité liée à toutes les compétences.

### 7.3 Facteur d'obstruction

Le facteur d'obstruction a d'abord été proposé par (Davis, 1975) sur l'examen de quatre attributs: la typologie du réseau, les caractéristiques temporelles imposées par la durée du planning, la mobilisation des ressources par les activités, et la disponibilité de ces ressources. Ce «*O-facteur*» est le rapport entre les surcharges des ressources sur la charge totale de travail. Sa détermination repose sur deux étapes: d'abord, le «*O-facteur*» doit être calculé pour chaque compétence :

$$O_k = \sum_{i=1}^{CP} \text{Max}\{0; RR_{k,i} - A_{k,i}\} / W_k, \forall k \in K, OF = \sum_{k=1}^K O_k \quad (13)$$

Toutes les valeurs sont ensuite agrégées à une seule valeur moyenne *OF*.

### 7.4 la densité de charge du projet

(Davies, 1973) a présenté une mesure basée sur l'intégration, sur la durée du projet, de l'utilisation des ressources et leur disponibilité. Cette mesure intègre principalement les quatre attributs : besoins en ressources, durées des activités, disponibilité des ressources, et longueur du chemin critique (*CP*). Il l'a appelé l'utilisation des ressources *k*. En accord avec cette mesure, nous en proposons une qui représente la densité de charge du projet par compétence, obtenue par le rapport entre la charge de travail totale nécessaire pour une compétence donnée et la capacité standard probable des opérateurs sur cette compétence. Ces densités de charge du projet «*Project load density – PLD<sub>k</sub>*» peuvent être représentées par les éléments suivants :

$$PLD_k = \sum_{i=1}^I \Omega_{i,k} \sqrt{\left[ \frac{C_{so}}{NJS} \times (L + \beta) \times \sum_{a=1}^A \frac{\theta_{a,k}}{nk_a} \right]} \text{ pour tout } k \in K \quad (14)$$

où  $nk_a$  est le nombre de compétences que l'opérateur *a* peut maîtriser avec un niveau de productivité acceptable. Nous proposons la valeur moyenne des différents  $PLD_k$  pour représenter la densité de charge globale du projet  $PLD$ .

## 8 CONSTRUCTION DES INDICES DE COMPLEXITÉ

De tous les quantificateurs présentés ci-dessus, nous avons cherché à déterminer les plus pertinents pour exprimer la complexité sur chacune des dimensions du projet ; ces dimensions sont au nombre de cinq : le réseau, les caractéristiques temporelles, le contenu du travail, les ressources, et le poids de la charge de travail sur les ressources. Nous nous proposons maintenant de réduire le nombre de ces descripteurs en recourant à l'*analyse en composantes principales – ACP*. L'*ACP* est une méthode d'extraction de données qui utilise l'analyse factorielle pour réduire l'explication d'un ensemble d'observations par un grand nombre de variables éventuellement corrélées, en un ensemble restreint de variables non corrélées linéairement appelées composantes principales (Jolliffe, 2002). Pour mener cette étude, nous avons construit la matrice de données  $M = [MI \times NV]$  rassemblant les *NV* valeurs des descripteurs énumérés ci-dessus (*P<sub>i</sub>, RT, 1/AR, S-ASym, TDmax, ATMD, ATSD, PCDF, DFF, ATFF, RF, MinWC, MaxWC, W, ARPF, PCF, ARB, RBL, CV, SD, OCW, @, RSI, RC, TRC, OF, et PLD*) pour les *MI* exemples de projets étudiés – les 4 ensembles de 100 projets chacun.

Selon (Pallant, 2010), l'applicabilité de l'analyse factorielle doit être validée, en vérifiant : - la matrice de corrélation entre les variables (éléments supérieurs à 0,3 entre toute paire de variables), - le test de sphéricité de Bartlett (valeur prédictive

doit être < 0,05 ; dans notre cas = 0) - mesure de Kaiser-Meyer-Olkin pour l'adéquation d'échantillonnage (*KMO* doit être supérieur à 0,6 ; pour nous,  $KMO = 0,760$ ) ; pour plus de détails voir (Jolliffe, 2002). Par conséquent, la pertinence de l'utilisation de l'*ACP* sur nos données est justifiée.

L'*ACP* a été menée en utilisant le logiciel XLSTAT et a produit un jeu de facteurs de taille maximale  $[NV]=[F_1, F_2, \dots, F_{27}]$ , chacun de ces facteurs ayant sa valeur propre qui quantifie sa contribution à la variance des données d'origine. La figure 2 présente ces facteurs par ordre d'importance décroissante, ainsi que le cumul de leurs contributions.

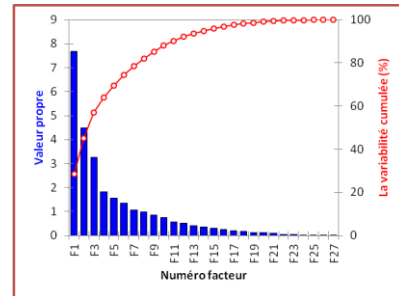


Figure 2. Tracé des valeurs propres et de leur cumul

Pour déterminer le nombre de composants (Franklin *et al.*, 1995) et (Pallant, 2010) ont utilisé l'analyse parallèle. L'analyse parallèle consiste à comparer l'amplitude des valeurs propres des facteurs précédents avec celles obtenues à partir d'un jeu de données de même taille, généré aléatoirement. Si la valeur propre d'un facteur principal donné est supérieure à celle des données aléatoires, il est jugé représentatif – sinon, il est écarté. Les résultats de cette analyse parallèle, obtenus via le logiciel «*Monte Carlo PCA for parallel analysis*» développé par (Watkins, 2000): ils montrent que les 6 premiers facteurs  $F_1, \dots, F_6$  peuvent être retenus, qui expliquent à eux tous 75% du comportement des données d'origine.

Nous avons ensuite déterminé la constitution des six composantes principales  $PC_1, \dots, PC_6$ : ces nouveaux composants ont été construits à partir de la projection des différents quantificateurs sur les axes des facteurs principaux en utilisant la «*rotation Varimax*» (Pallant, 2010). La figure 3 illustre la projection de nos descripteurs de complexité sur les axes F1 et F2.

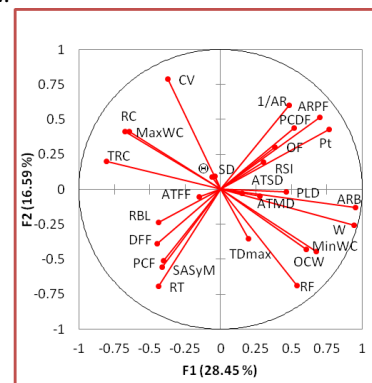


Figure 3. Contributions des descripteurs sur les axes F1 et F2

Afin de comprendre la composition des nouveaux composants principaux, nous avons réalisé une classification hiérarchique de tous les quantificateurs comme le montre la figure 4. Cette analyse typologique regroupe des ensembles de variables similaires. Au niveau de similitude 0,30, nous trouvons dix regroupements :

A partir des résultats, des groupes identifiés sur la figure 4, et de la signification des critères de complexité, nous avons construit nos six composantes principales :



- La première composante principale rassemble les paramètres des groupes #2 et #10 et traduit l'envergure du projet ; nous l'avons donc désigné par *PSI : project scale index* :

$$PSI = [0,192 \times RF + 0,139 \times MinWC + 0,114 \times W + 0,123 \times ARB + 0,150 \times OCW] - [0,142 \times RC + 0,090 \times TRC + 0,135 \times MaxWC + 0,158 \times CV] \quad (15)$$

- La seconde, qui assemble les éléments du groupe #4 et un (RT) du groupe #5 exprime la flexibilité du réseau ; d'où le *NFI – network flexibility index* :

$$NFI = [0,162 / AR + 0,306 \times PCDF + 0,222 \times P\_size + 0,265 \times ARPF] - [0,104 \times RT] \quad (16)$$

- La troisième composante principale regroupe les paramètres liés à la rareté des ressources, au facteur d'obstruction, et à la densité de charge ; il exprime la densité du projet *PWI – project weight factor* :

$$PWI = [0,267 \times RSI + 0,271 \times OF + 0,249 \times PLD] \quad (17)$$

- Nous avons ensuite rassemblé les descripteurs géométriques des charges de travail dans le projet pour la quatrième composante *PLLI - Project load location index* :

$$PLLI = [0,289 \times SASyM + 0,278 \times DFF + 0,324 \times PCF + 0,302 \times RBL] \quad (18)$$

- La cinquième composante principale peut être composée des groupements #1, #7 et #8, qui représentent respectivement les caractéristiques de durée des tâches *ATMD* et *ATSD*, le degré de similitude entre les compétences *SD* et les productivités des opérateurs. Mais comme on peut le voir sur, les contributions de *SD* et  $\Theta$  à cette composante principale sont petites devant celles de *ATMD* et *ATSD*. Ce paramètre est donc désigné par indice de durée des tâches : *tasks durations index TDI* :

$$TDI = [0,507 \times ATMD + 0,559 \times ATSD] - [0,088 \times SD + 0,157 \times \Theta] \quad (19)$$

- enfin, la dernière composante principale décrit les goulots d'étranglement du réseau, d'où le *NBI – network bottleneck index* :

$$NBI = [0,520 \times TDmax + 0,321 \times ATFF] \quad (20)$$

## 9 PERTINENCE DES INDICES PROPOSÉS

Les 400 projets à la base de cette étude, répartis en 4 groupes de respectivement 30, 60, 90 et 120 tâches, ont été planifiés à l'aide d'un outil numérique basé sur les algorithmes génétiques (Attia et al. 2012b) ; cet outil recherche une programmation du projet qui optimise une fonction – objectif prenant en compte différents critères de performance : la minimisation des heures de travail effectuées en horaires standard, la minimisation du recours aux heures supplémentaires, la minimisation de la perte de réactivité future de l'entreprise (induite par une consommation excessive de la flexibilité du temps de travail), la minimisation des pénalités de retard ou

des frais de stockage, ainsi que la maximisation de la polyvalence des opérateurs. En marge de ces critères « opérationnels », la qualité de la solution trouvée est également appréciée par le temps de calcul nécessaire.

Pour chaque groupe de projets, et pour chacun des critères de performance énumérés ci-dessus, le tableau 1 présente la capacité des différents indices de complexité du projet à expliquer les évolutions des critères. La présentation des indices dans le tableau est progressive, et basée sur le test de Student : l'indice le plus significatif est présenté en premier, avec le coefficient de détermination  $R^2$  ; le second indice le plus pertinent est ensuite ajouté – avec ajustement des coefficients de détermination. Et ainsi de suite, les indices sont ajoutés tant qu'ils contribuent à améliorer la corrélation.

Les résultats révèlent une bonne aptitude de nos indices à exprimer les performances du projet, et une bonne cohérence de ces indices groupe par groupe. Plus encore, l'apparition de pénalités de retard peut-être prédite via l'indice de densité du projet *PWI*. La durée contractuelle étant calculée à partir du projet planifié avec les durées standard des tâches, cela offre une certaine latitude pour une augmentation de la charge de travail des ressources ou de leur rareté, exprimées par une augmentation de *PWI*, jusqu'à une certaine limite *PWI<sub>critique</sub>* au-delà de laquelle la durée du projet excèdera cette durée contractuelle ; nous avons exploré cette valeur dont les résultats sont présentés dans la cinquième ligne du tableau 1 : dans tous les cas de figure, une valeur de *PWI<sub>critique</sub>* d'environ 0,45 semble représentative de l'apparition de pénalités de retard. De même, nous avons exploré la valeur limite de *PWI* à partir de laquelle la planification du projet ne trouve aucune solution avec les ressources disponibles, cette limite étant de l'ordre de 0,55. Cet indice de densité du projet *PWI* semble donc avoir une importance décisionnelle particulière pour apprécier la faisabilité d'un projet sous contrainte de dates avec des ressources limitées. Du reste, l'examen de l'ensemble du tableau paraît accorder des rôles prépondérants à cet indice de densité comme à l'indice d'envergure du projet *PSI*.

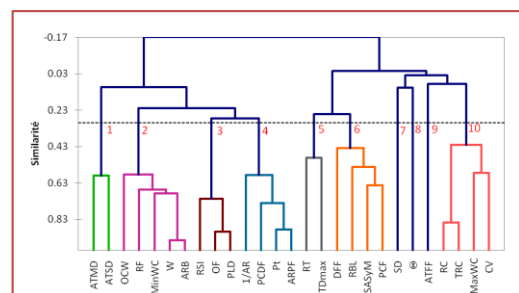


Figure 4. Classification hiérarchique des quantificateurs

Tableau 1 Les indices significatifs pour chaque critère de performance

Critères de performance	Prédicteurs significatifs			
	Groupe I	Groupe II	Groupe III	Groupe IV
Temps de calcul par génération % $R^2 =$	PSI, NFI, PWI, TDI 62.9, 71.7, 76.9, 82.1	PSI, NFI, TDI 82.3, 84.6, 87.0	PSI, NFI, PLLI, TDI 76.3, 77.9, 80.2, 81.3	PSI, TDI, NFI 92.7, 94.2, 95.4
Heures de travail normal % $R^2 =$	PSI, PWI, TDI 89.8, 92.4, 93.7	PSI, PWI, TDI 90.9, 94.6, 95.5	PSI, PWI, TDI 92.8, 96.6, 97.1	PSI, PWI, TDI, NFI 96.3, 97.4, 97.7, 97.9
Heures supplémentaires % $R^2 =$	PSI, PWI 65.1, 75.5	PSI, PWI, NBI 63.6, 76.5, 77.6	PSI, PWI, NFI 66.5, 85.2, 86.6	PSI, PWI, TDI 81.9, 90.7, 91.3
Perte de flexibilité future % $R^2 =$	PSI, NFI, PWI 85.5, 90.5, 91.6	PSI, NFI 89.2, 92.7	PSI, NFI 86.2, 93.0	PSI, NFI, PWI 89.7, 91.2, 91.8
Pénalités / coûts de stockage % $R^2 =$	Max(PWI-0.455; 0), TDI 56.9, 59.4	Max(PWI-0.48; 0), TDI 84.3, 85.9	Max(PWI - 0.48; 0) $R^2=85.8\%$	Max(PWI-0.44; 0), PSI, PLLI 76.0, 82.7, 83.4
Développement de la polyvalence % $R^2 =$	PSI, NFI, PLLI, PWI, TDI 59.3, 64.3, 68.1, 70.7, 72.6	PSI, PWI 72.1, 75.3	PSI, TDI, NFI, PLLI 62.5, 65.9, 67.6, 70.0	PSI, NFI, TDI 45.5, 63.5, 70.7

## 10 CONCLUSION:

A partir d'un ensemble de descripteurs de la complexité des projets relevés dans la littérature, l'analyse en composantes principales nous a permis d'identifier 6 indices qui, confrontés à une base de projets substantielle, se sont avérés aptes à traduire cette complexité. Les perspectives de ce travail s'orientent vers l'élaboration d'un outil de mesure générique destiné à quantifier la complexité technique d'un ensemble de travaux.

## 11 RÉFÉRENCES

- Attia, E.-A., Dumbrava, V., Duquenne, P., 2012a. Factors affecting the development of workforce versatility, in: 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing. Bucharest, Romania - May 23-25.
- Attia, E.-A., Duquenne, P., Le Lann, J.-M., 2012b. Decision-based genetic algorithms for solving multi-period project scheduling with dynamically experienced workforce, Dans: Proceedings of MOSIM'12. Bordeaux, France.
- Attia, E.-A., Duquenne, P., Le-Lann, J.-M., 2011. Prise en compte des évolutions de compétences pour les ressources humaines. Dans CIGI-2011, 12-14 octobre 2011, Saint-Sauveur, Québec, Canada.
- Attia, E.-A., Edi, H.K., Duquenne, P., 2012c. Flexible resources allocation techniques: characteristics and modelling. *Int. J. Operational Research* 14, 221–254.
- Bashir, H.A., 2010. Removal of redundant relationships in an AoN Project Network for Evaluating Schedule Complexity. *J. Constr. Engrg. and Mgmt.* 136, 787.
- Bashir, H.A., Thomson, V., 1999. Metrics for design projects: a review. *Design Studies* 20, 263–277.
- Boushaala, A.A., 2010. Project Complexity Indices based on Topology Features. *World Academy of Science, Engineering and Technology* 69.
- Browning, T.R., Yassine, A.A., 2009. A random generator of resource-constrained multi-project network problems. *Journal of Scheduling* 13, 143–161.
- Davis, E.W., 1975. Project Network Summary Measures Constrained- Resource Scheduling. *IIE Transactions* 7, 132–142.
- De Reyck, B., Herroelen, W., 1996. Assembly line balancing by resource-constrained project scheduling techniques - A critical appraisal. Poznan Polytechnic University: Poznan, Poland, pp. 79 – 83.
- Elmaghraby, S.E., Herroelen, W.S., 1980. On the measurement of complexity in activity networks. *European Journal of Operational Research, European J. of Operational Research* 5, 223–234.
- Haberle, K.R., Burke, R.J., Graves, R.J., 2000. A note on measuring parallelism in concurrent engineering. *International J. of Production Research* 38, 1947–1952.
- Ireland, L., 2007. PrezSez: Project Complexity: A brief exposure to difficult situations, by Lew Ireland [www Document]. asapm “the American Society for the Advancement of Project Management”. URL <http://www.asapm.org/asapmag/resources/2007-Oct.htm>
- Jolliffe, I.T., 2002. *Principal Component Analysis*. Springer.
- Kaimann, R.A., 1974. Coefficient of Network Complexity. *Management Science* 21, 172–177.
- Kolisch, R., Sprecher, A., Drexl, A., 1995. Characterization and generation of a general class of resource-constrained project scheduling problems. *Management Science* 41, 1693–1703.
- Kurtulus, I., Davis, E.W., 1982. Multi-Project scheduling: categorization of heuristic rules performance. *Management Science* 28, 161–172.
- Latva-Koivisto, A.M., 2001. Finding a complexity measure for business process models. Research Rep. prepared for Helsinki University of Technology, Systems Analysis Laboratory, Espoo, Finland.
- Mendes, J.J.M., Gonçalves, J.F., Resende, M.G.C., 2009. A random key based genetic algorithm for the resource constrained project scheduling problem. *Computers & Operations Research* 36, 92–109.
- Modrak, V., 2006. Comparison of process structure complexity in manufacturing before and after redesign, in: Dolgui, A. (Ed.), pp. 467–472.
- Modrak, V., Semanco, P., 2011. A comparative study of complexity metrics for supply chains. Presented at the 2011 3rd IEEE International Symposium on Logistics and Industrial Informatics (LINDI), IEEE, pp. 235–239.
- Nassar, K.M., Hegab, M.Y., 2008. Closure of “Developing a Complexity Measure for Project Schedules” by Khaled M. Nassar and Mohamed Y. Hegab. *Journal of Construction Engineering and Management* 134, 230–232.
- Otto, A., Otto, C., Scholl, A., 2011. SALBPGen - A systematic data generator for (simple) assembly line balancing (Jena Research Papers in Business and Economics - Working and Discussion Papers No. 05/2011). Friedrich-Schiller-University Jena, School of Economics and Business Administration.
- Pascoe, T.L., 1966. Allocation of resources C.P.M. *Revue Francaise de Recherche Operationelle* 38, 31–38.
- Patterson, J.H., 1976. Project scheduling: The effects of problem structure on heuristic performance. *Naval Research Logistics Quarterly* 23, 95–123.
- PSPLib, 1996. PSPLIB: library for project scheduling problems [www Document]. URL <http://129.187.106.231/psplib/> (accédé 16/5/2011).
- Temperley, H.N.V., 1981. *Graph theory and applications*. Ellis Horwood Limited.
- Thesen, A., 1977. Measures of the restrictiveness of project networks. *Networks* 7, 193–208.
- Valadares Tavares, L., Antunes Ferreira, J., Silva Coelho, J., 1999. The risk of delay of a project in terms of the morphology of its network. *European J. of Operational Research* 119, 510–537.
- Vidal, E., Duquenne, A., PINGAUD, H., 1999. Optimisation des plans de charge pour un flow-shop dans le cadre d'une production en Juste A Temps: 2- Formulation mathématique. Dans 3ème Congrès Franco-Quebequois de Génie Industriel, Montréal, Québec, Canada, 1175–1184.
- Watkins, M.W., 2000. Monte Carlo PCA for parallel analysis [computer software]. State College, Psych Associates.