



HAL
open science

SMACC : Gestion des risques dans les projets de construction par simulation multi-agent

Franck Taillandier, Patrick Taillandier

► **To cite this version:**

Franck Taillandier, Patrick Taillandier. SMACC : Gestion des risques dans les projets de construction par simulation multi-agent. Masyco 2013, 2013, France. hal-00850272

HAL Id: hal-00850272

<https://hal.science/hal-00850272>

Submitted on 6 Aug 2013

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

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

SMACC : Gestion des risques dans les projets de construction par simulation multi-agent

F. Taillandier^a

franck.taillandier@u-bordeaux1.fr

P. Taillandier^b

patrick.taillandier@gmail.fr

^aUMR 5395 I2M
Université de Bordeaux, France

^bUMR IDEES - MTG,
Université de Rouen, France

Résumé

Ces dernières années ont connu un fort développement de la recherche sur la gestion des risques dans les projets de construction. Les projets de construction impliquent de nombreux acteurs dont les intérêts et les besoins doivent être considérés dans les décisions stratégiques, afin d'assurer le succès du projet. Chaque acteur a ses propres risques et sa propre vision des risques. Pour ces raisons, il peut être difficile de modéliser les risques du projet et ainsi de les maîtriser. Dans cet article, nous proposons une approche basée sur l'utilisation conjointe d'un modèle à base d'agents, appelé SMACC, et d'une méthode de décision multicritère pour évaluer les conséquences des risques sur le projet. Les simulations réalisées à partir de SMACC permettent d'établir des indicateurs qui sont ensuite utilisés comme critères dans le cadre d'un processus d'aide à la décision multicritère (via ELECTRE III) ayant pour objectif d'aider un gestionnaire de projet à choisir la stratégie la plus pertinente pour la conduite du projet.

Mots-clés : *Projet de construction, Gestion des risques, Simulation multi-agent, Décision multicritère*

Abstract

In recent years, intensive research and development have been done in the area of construction project risk management.

Construction projects involve numerous stakeholders whose interests and demands need to be considered in the managerial decision-making, to ensure the success of the project. Each stakeholder has his/her own risks and perspective on project risks. For these reasons, it could be difficult to model project risk in order to manage them. In this paper, we propose an approach based on the coupling of an agent-based model, called SMACC, with a multi-criteria decision-making approach to evaluate the risk impacts for the project. The simulations carried out from SMACC allow to establish indicators that are used in the context of a multi-criteria decision making process (via ELECTRE III) aiming at helping decision makers to choose the most pertinent strategies to carry out the project.

Keywords: *Construction project, Risk management, Multi-agent simulation, Multi-criteria decision-making*

1 Introduction

Les projets de construction sont soumis à de nombreux risques, qu'ils soient d'ordre organisationnel, humain ou économique [6]. Ces risques peuvent être déterminants quant à la réussite du projet en ayant des conséquences importantes sur les aspects économiques et temporels. La maîtrise de ces risques est l'un des enjeux centraux de la gestion de projet [4]. Pour répondre à cet enjeu, de nombreux travaux de recherche ont

tenté d'apporter des méthodes ou des outils pour identifier et évaluer ces risques [5]. Cependant la complexité inhérente aux projets de construction (multiplicité des acteurs, variété des risques, etc.) rend la gestion globale de ces risques extrêmement difficile. La complexité est en partie due au grand nombre d'acteurs ayant chacun leur rôle, leur objectif et leur motivation vis-à-vis des risques et du projet lui-même. Ainsi, les facteurs organisationnels et humains ont un rôle clef pour la gestion des risques du projet [17]. Il faudrait ainsi faire appel à une modélisation des risques prenant en compte la multiplicité des regards et l'aspect dynamique des risques (en tenant compte des phénomènes d'interaction et de la capacité de réaction des acteurs) pour avoir un modèle réellement pertinent [8].

L'analyse de risque n'a pas qu'un rôle d'apport de connaissances, elle doit aussi permettre d'établir des stratégies de maîtrise des risques ; cela peut par exemple consister à réaliser des études de sol supplémentaires (essais géophysiques) pour limiter les risques liés au sol ou à organiser des formations sécurité pour les ouvriers afin de limiter les risques d'accident sur le chantier. Pour répondre à cet enjeu de maîtrise des risques, cet article propose une approche d'aide à la décision basée sur un modèle à base d'agents appelé SMACC (Stochastic Multi-agent simulation for Construction projeCt) et sur une méthode de décision multicritère. SMACC permet de simuler le déroulement des projets en prenant en compte les incertitudes (risques) et le point de vue des différents acteurs. Ainsi, il fournit une évaluation des impacts des aléas sur le projet. En reproduisant un grand nombre de fois la simulation, SMACC permet d'avoir une vision statistique des risques et de fournir des indicateurs sur le projet. Ces indicateurs sont alors intégrés dans le cadre d'un processus d'aide à la décision ayant pour but de définir la stratégie la plus adaptée pour répondre aux risques du projet.

2 Approche

2.1 Principe

L'objectif de notre approche est de proposer une hiérarchisation des stratégies. Les stratégies sont définies préalablement ; leur définition ne fait pas partie du processus

d'aide à la décision ici présenté, qui s'intéresse à leur évaluation et à leur comparaison. L'approche fonctionne en deux étapes. Dans un premier temps, les différentes stratégies sont simulées par SMACC afin de déterminer leurs impacts respectifs. SMACC permet en particulier d'établir des estimations sur la qualité du projet, son coût et le temps mis pour le réaliser. Ces estimations sont utilisées pour établir une hiérarchisation des stratégies. Cette hiérarchisation est obtenue par l'utilisation de la méthode d'aide à la décision multicritère ELECTRE III [14].

2.2 SMACC

2.2.1 Simulation Multi-Agents et Projets de construction

Certains travaux ont déjà proposé d'utiliser des systèmes multi-agents (SMA) pour l'aide à l'étude et à la gestion de projets de construction. En effet, ce type d'approche est particulièrement adapté à ce domaine qui implique de nombreux acteurs avec des intérêts et des objectifs pouvant être contraires. Parmi ces travaux, certains ont proposé des méthodes pour la conception de projets [1, 2]. D'autres travaux ont proposé des méthodes pour aider les gestionnaires de projets à choisir des produits, matériaux ou méthodes de construction [7, 9]. Enfin, des travaux ont proposé des outils pour la gestion de l'approvisionnement [18]. Ces différents SMA ne s'intéressent pas au projet de construction dans son ensemble mais juste à des étapes spécifiques de celui-ci. De plus ils ne permettent pas de prendre en compte l'incertitude et les risques.

Il existe par contre d'autres SMA qui intègrent des incertitudes et/ou des risques. Par exemple MASCOT [10] permet de simuler les négociations entre les concepteurs, les entreprises de construction et les clients en intégrant des risques.

Enfin, [11, 12, 13] proposent des SMA permettant de simuler un projet de construction dans son ensemble avec un objectif pédagogique : il permet aux étudiants ou jeunes ingénieurs de comprendre les enjeux des différentes étapes du processus de construction et des décisions prises. Dans ce SMA, les décisions relatives au projet ne sont pas prises automatiquement par les agents, mais elles sont laissées à l'utilisateur ; seul

leur impact est simulé.

SMACC a pour objectif de simuler les projets de construction durant tout le cycle de vie du projet, depuis la phase de faisabilité jusqu'à la phase d'exploitation. Il intègre les processus de décision des différents acteurs et permet de prendre en compte les risques et les incertitudes.

SMACC propose une vision neutre des risques, c'est-à-dire que l'on prend en compte les risques s'appliquant dans le projet sur tous les acteurs et à toutes les phases du projet (aucune perspective n'est privilégiée par rapport aux autres). En sortie, SMACC propose d'évaluer la durée du projet, la qualité du projet (correspondance entre l'ouvrage réalisé et les attentes du client), le coût financier du projet et le bilan financier (bénéfice-coût) de chaque acteur.

2.2.2 Description des agents

Nous avons choisi pour SMACC de

représenter toutes les entités (acteurs, ressources...) composant un projet de construction sous la forme d'agents.

SMACC est ainsi composé de 9 espèces d'agents (détaillées dans le tableau 1) appartenant à 4 catégories :

Projet : Agent projet (agent global),

Descripteurs du projet : les acteurs (maitre d'ouvrage, gestionnaire de projet, etc.) et les tâches (études, gros œuvre, etc.),

Obligations : les contrats (engagement d'une entreprise à réaliser une tâche avec un temps, un coût et une qualité définis), les instructions (instructions d'un responsable à un opérateur pour réaliser une tâche),

Risques : les facteurs de risque (cadence élevée, niveau de sécurité faible, etc.), les événements risqués (accident, erreur, etc.) et les conséquences des risques (délai dans une tâche, mauvaise interprétation d'une instruction, etc.).

TAB. 1 – Liste des agents et leurs caractéristiques

Agent	Caractéristiques (variables)	Nature
Acteur	Capacité managériale de l'acteur	Réel [0-1]
	Capacité opérationnelle de l'acteur	Réel [0-1]
	Motivation de l'acteur	Réel [0-1]
	Importance du critère « qualité » pour l'acteur	Réel [0-1]
	Importance du critère « prix » pour l'acteur	Réel [0-1]
	Importance du critère « temps » pour l'acteur	Réel [0-1]
	Ressources dont dispose l'acteur	Liste de ressources
Resource	Type de ressource	{financière, consommable, réutilisable}
	Quantité de ressources	Réel
	Qualité de la ressource	Réel [0,1]
Tâche	Quantités minimales de ressources nécessaires pour mener à bien la tâche par jour	Vecteur {ressource_type, quantité}
	Quantité maximale de ressources nécessaire pour mener à bien la tâche par jour	Vecteur {ressource_type, quantité}
	Ressources utilisées pour mener à bien la tâche	Vecteur {ressource_type, ressource}
	Ressources affectées par l'opérateur pour le jour concerné	Vecteur {ressource_type, ressource}
	Urgence de mener à bien la tâche pour l'avancement du projet	Réel (0,1)
	Nombre normal de jours pour mener à bien la tâche	Nb de jours
	Nombre de jours passés à mener à bien la tâche	Nb de jours
	Importance de la qualité de la tâche pour la qualité du projet	Réel [0,1]
Tâches devant être finies pour que la tâche concernée puisse commencer	Tâches	

	Complexité technique de la tâche	Réel [0,1]
	Qualité effective de la tâche	Réel [0,1]
	Avancement de la tâche	Réel [0,1]
	Statut : <i>Non-Exécutable</i> : les opérateurs ne peuvent pas commencer à travailler sur la tâche ; <i>Exécutable</i> : les opérateurs peuvent travailler sur la tâche ; <i>Finie</i> : la tâche est finie.	{Non-exécutable, Exécutable, Finie}
Projet	Tâches composant le projet	Tâches
	Temps accordé par le client pour finir le projet	Nb de jours
	Temps passé pour réaliser le projet	Nb de jours
	Ressources accordées par le client pour réaliser le projet	Liste de ressources
	Ressources utilisées pour réaliser le projet	Liste de ressources
	Qualité du projet	Réel [0,1]
Contrat	Acteur responsable de la bonne exécution de la tâche	Acteur
	Acteur en charge de réaliser la tâche	Acteur
	Tâche concernée par le contrat	Tâche
	Ressources accordées pour finir la tâche	Liste de ressources
	Temps accordé pour finir la tâche	Nb de jours
	Qualité minimale demandée pour la tâche	Réel [0,1]
Instruction	Acteur (Responsable) donnant l'instruction	Acteur
	Tâche concernée par l'instruction	Tâche
	Indication de vitesse donnée par le responsable	Réel [0,1]
	Indication de qualité donnée par le responsable	Réel [0,1]
	Indication de coût donnée par le responsable	Réel [0,1]
	Indication de vitesse que l'opérateur va essayer de suivre	Réel [0,1]
	Indication de qualité que l'opérateur va essayer de suivre	Réel [0,1]
	Indication de coût que l'opérateur va essayer de suivre	Réel [0,1]
Facteur de risque	Liste des événements risqués induits par le facteur de risque	Liste d'événements risqués
	Variable de l'entité à l'origine du facteur de risque (L'entité peut être un acteur, une tâche, un contrat ou une instruction)	Variable
	Valeur du seuil à partir duquel le risque augmente	Réel
	Importance de ce facteur de risque pour la réalisation du risque	Réel [0,1]
	Niveau de risque	Réel [0,1]
Événement risqué	Type d'événement risqué	Int [0, 15]
	Tâche durant laquelle l'événement risqué peut se produire	Tâche
	Acteur pouvant être concerné par l'événement risqué	Acteur
	Probabilité a priori que l'événement se produise	Réel [0,1]
	Probabilité que l'évènement se produise à un pas de temps donné	Réel [0,1]
	Impact de l'évènement risqué sur le projet s'il se réalise	Réel [0,1]
Conséquence de risque	Tâche touchée par le risque	Tâche
	Acteur touché par le risque	Acteur
	Impact du risque sur le projet	Réel [0,1]
	Type d'événement risqué	Int [0, 15]

2.2.3 Principe de fonctionnement

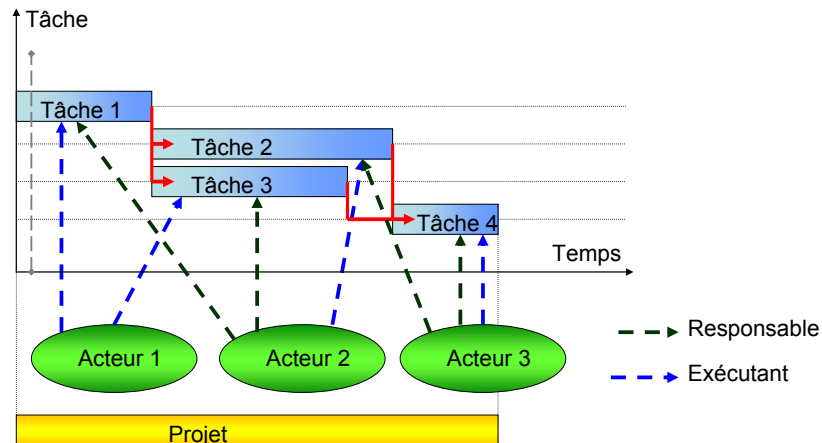


FIG. 1 – Principe du modèle SMACC

SMACC est basé sur une vision temporelle du projet (Figure 1) soulignant le rôle de chaque acteur durant la progression du projet. Les tâches peuvent être successives ou simultanées. Chaque tâche a un exécutant et un responsable. Les exécutants ont pour rôle de réaliser concrètement la tâche. Les responsables doivent veiller à la bonne réalisation de la tâche ; ils portent la responsabilité quant au résultat final de la tâche (temps mis, qualité, coût). Ils ont de plus un rôle de commandement. Ils peuvent donner des instructions aux exécutants quand aux priorités ou aux efforts à porter sur chaque tâche.

La rapidité, le coût et la qualité du travail exécuté dépendent des caractéristiques des exécutants, des ressources engagées, de la tâche et des conséquences des risques pouvant affecter la tâche ou l'acteur. Les événements risqués se produisent aléatoirement selon des lois probabilistes variant en fonction des facteurs de risques. Les facteurs de risques sont des contextes particuliers induisant une modification de la survenance d'un risque ; par exemple, une cadence de travail élevée peut augmenter le risque d'accident sur le chantier.

Chaque pas de la simulation correspond à un jour ouvré. A chaque pas, SMACC a recours à la même procédure (Figure 2) : Chaque tâche vérifie si elle est finie ou exécutable (1). Ensuite, le projet vérifie si toutes les tâches ont été achevées (fin du projet et de la simulation) ou non (2). Si le projet n'est pas fini, chaque tâche exécutable évalue sa priorité (important lorsque qu'un acteur doit

choisir entre deux tâches à exécuter) en se basant sur l'avancement du projet (3). Les responsables donnent ensuite des instructions aux exécutants en fonction de l'avancement du projet, des contraintes et de leurs caractéristiques propres (4). Les exécutants interprètent ces instructions en fonction de leurs propres caractéristiques (5). Chaque responsable assigne à ses exécutants des moyens (6) que ceux-ci répartissent sur chaque tâche en fonction de l'ensemble des instructions reçues (7). En travaillant sur une tâche, les exécutants permettent de la faire avancer (ou de la finir) (8). Dès qu'une tâche est finie, son responsable est payé en fonction des résultats obtenus (en termes de délai, coût et qualité) (9). Enfin, les caractéristiques de l'ensemble des acteurs évoluent en fonction des événements passés (motivation accrue, expérience acquise...) (10).

En plus de ce processus général, un autre processus intervient entre chacun des 10 sous-processus et peut avoir une influence sur eux : le processus de risque. Dans ce processus, les facteurs de risque (manque d'information sur un matériau, contexte social difficile...) s'actualise en fonction de l'évolution du contexte et du projet (100). En fonction de ces facteurs de risques, les événements risqués (problème d'interface entre deux matériaux, grève...) mettent à jour leurs probabilités d'occurrence (101). En fonction d'un tirage aléatoire, certains événements risqués vont produire des conséquences (retard, surcoût...) qui auront un impact sur le projet (102).

2.2.4 Description du processus

Nous décrivons ci-dessous de façon plus détaillée les différents processus intervenant :

Processus 1 – Mettre à jour le statut de la tâche : chaque tâche met à jour son statut : une tâche passe au statut “finie” si son avancement atteint 1. Une tâche passe au statut “exécutable” si toutes les tâches précédentes ont le statut “finie” et qu’elle n’est elle-même pas “finie”. Une tâche a le statut “non-exécutable” si elle n’a ni le statut “finie” ni le statut “exécutable”.

Processus 2 – Vérifier si fin de Projet : si toutes les tâches ont le statut “finie”, le projet est considéré comme fini et la simulation se termine.

Processus 3 – Calculer la priorité des tâches : chaque tâche calcule sa priorité. Les priorités sont calculées en fonction de la position de la tâche sur le chemin critique. Le chemin critique correspond à l’enchaînement des tâches permettant qui impactera la durée totale du projet (un retard d’un jour sur une tâche critique induira un retard d’un jour sur le projet).

Processus 4 – Donner une consigne : chaque responsable d’une tâche exécutable établit une stratégie en donnant des instructions aux opérateurs. En particulier le responsable doit définir ses priorités en termes de vitesse, qualité et coût. Cela se traduit par un vecteur normalisé (somme des trois termes égale à 1). Le calcul de ce vecteur est basé sur les préférences de l’acteur et sur la situation globale, permettant d’estimer si un effort doit être fait au niveau de la vitesse d’exécution (retard dans l’exécution de la tâche), du coût (coût de la tâche risquant d’être supérieur au coût attendu) et de la qualité (qualité de tâche risquant d’être inférieure à la qualité attendue). Des événements risqués peuvent modifier les instructions. Par exemple, une mauvaise perception de la situation par le responsable au niveau du délai d’exécution peut entraîner une diminution de l’indication de vitesse.

Processus 5 – Interpréter les consignes : quand un opérateur reçoit des instructions, il peut les respecter ou non. Ce non-respect peut venir d’une initiative personnelle ou de problème de communication. Un opérateur établit ses propres valeurs de vecteur vitesse/qualité/coût. Pour cela, il prend en

considération l’ensemble des ordres (instructions) qu’il a reçus, la situation globale et ses préférences. Des événements risqués peuvent modifier l’interprétation des instructions.

Processus 6 – Attribuer des moyens : chaque responsable de tâche choisit les ressources monétaires du projet qu’il souhaite distribuer à l’opérateur qui doit effectuer la tâche. Ce choix dépend du contrat concerné (précise les attentes et les moyens attribués), des instructions données par le responsable et de la situation actuelle (avancement de la tâche, qualité...). Des événements risqués peuvent modifier la quantité de ressources monétaires distribuée pour chaque tâche.

Processus 7 – Répartir les moyens : Chaque opérateur qui doit travailler sur une ou plusieurs tâches divise ses ressources sur les tâches.

Dans un premier temps l’opérateur calcule pour chacune de ses tâches ses besoins, c’est-à-dire la quantité et la qualité idéale de ressources réutilisables (par exemple un engin de terrassement) et consommables (par exemple 1m³ de béton) qu’il devrait mobiliser pour réussir la tâche telle qu’exigée par le contrat. Ces besoins vont dépendre des contrats liant les acteurs aux tâches, de la situation à cet instant donné (avancement des tâches, qualité...), de la complexité des tâches et des ressources requises pour mener à bien les tâches.

Dans un second temps, l’opérateur analyse les ressources dont il dispose. Un opérateur peut acheter des ressources consommables ou louer des ressources réutilisables avec ses ressources monétaires. A partir de ses propres ressources et de celles louées ou achetées, il va pouvoir répartir des moyens sur les différentes tâches. La stratégie d’achat/location ainsi que la répartition dépendent des instructions perçues par l’opérateur, des ressources idéales, des ressources dont il dispose et de la situation globale (avancement des tâches, qualité...). Le choix de la quantité et de la qualité des ressources affectées aura un rôle prédominant dans la réalisation de la tâche.

Ces différentes sous-étapes peuvent être affectées par des événements risqués.

Processus 8 – Faire progresser les tâches : chaque tâche calcule son avancement en

fonction des ressources utilisées (quantité et qualité) et de ses caractéristiques. L'avancement peut être ralenti par des événements risqués.

Processus 9 – Payer les responsables : Lorsqu'une tâche atteint son avancement maximale (avancement = 1), le responsable de la tâche est payé. La quantité d'argent donnée au responsable dépend du contrat portant sur la tâche, du délai mis pour la réaliser et de la qualité de la tâche.

Processus 10 – Mise à jour des caractéristiques des acteurs : Chaque acteur fait évoluer ses caractéristiques en fonction des événements passés (état d'avancement des tâches, instructions...).

Processus 100 – Actualiser les facteurs de risque : chaque facteur de risque met à jour son niveau de risque en fonction des valeurs des différentes variables du système et de ses caractéristique (seuil pour lequel la valeur de la variable induit un risque, importance de

cette variable...).

Processus 101 – Actualiser les événements risqués : chaque événement risqué met à jour sa probabilité d'occurrence en fonction des facteurs de risques pouvant avoir un impact sur cet événement ; par exemple un facteur de risque « contexte local tendu » peut augmenter la probabilité de l'évènement risqué « blocage du projet par les riverains ».

Processus 102 – Simuler les risques : chaque événement risqué vérifie s'il s'est réalisé ou non. Cela passe par un tirage aléatoire. Si le tirage est inférieur ou égal à sa probabilité d'occurrence, l'évènement se produit, s'il est supérieur, il ne se réalise pas. Chaque événement risqué qui se produit induit des impacts qui sont sommés par l'entité Conséquence Risque.

.

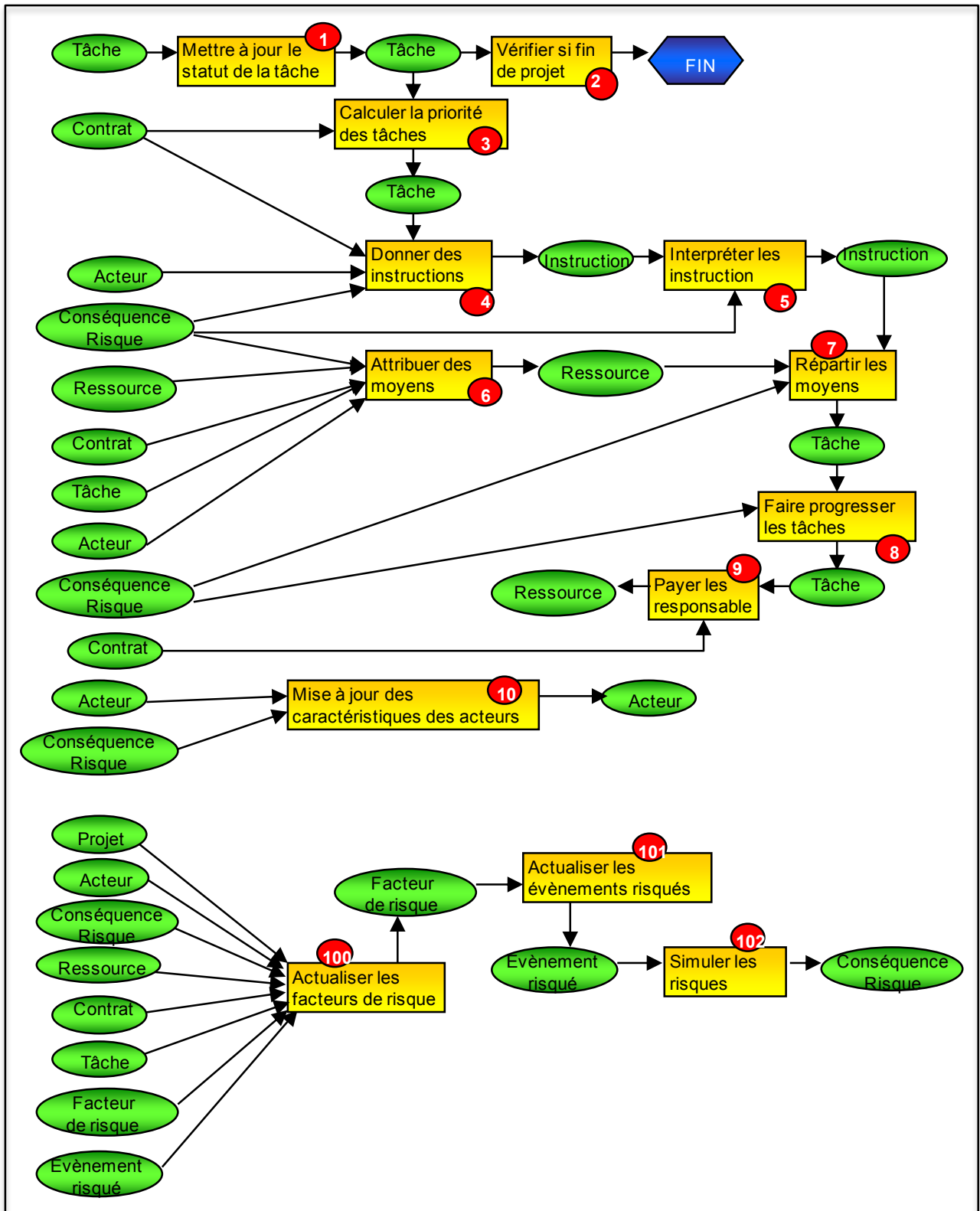


FIG. 2 – Processus du modèle SMACC

2.2.5. Implémentation

SMACC a été implémenté avec la plateforme de simulation GAMA [15]. Cette plateforme

open-source dispose d'un environnement complet de développement permettant de faciliter la définition de modèles complexes. Elle de plus déjà été utilisée dans de

nombreux projets (par exemple : [3, 16]). La figure 3 présente une capture d'écran d'une simulation : la fenêtre de gauche montre l'avancement du projet : en vert, les tâches exécutables ou finies – la hauteur de la tâche représente son avancement ; en rouge, les tâches non-exécutables ; les sphères représentent les acteurs. La fenêtre de droite montre des graphiques permettant de suivre l'évolution du projet : les ressources utilisées,

l'avancement du projet, etc.

GAMA propose en plus un mode « Batch » permettant de reproduire un grand nombre de fois la simulation. On peut ainsi avoir une vision statistique des risques et fournir des indicateurs sur le projet permettant l'évaluation des différentes stratégies.

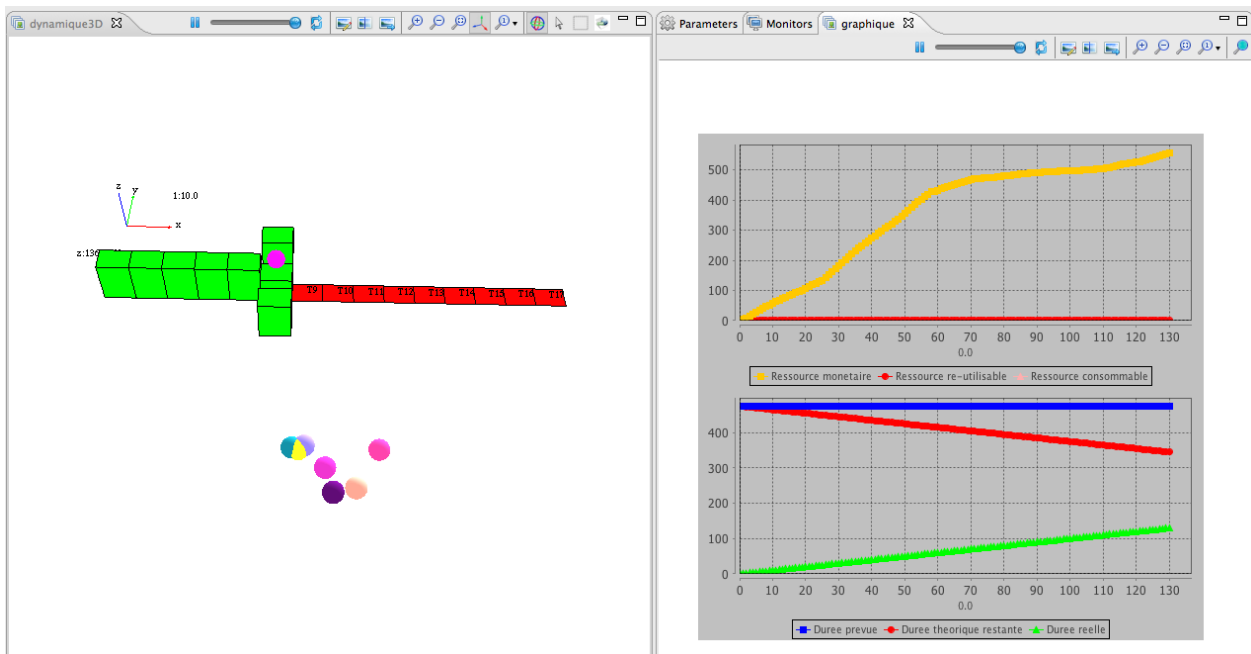


FIG. 3 – Capture d'écran d'une simulation (avec la plate-forme GAMA)

2.3 ELECTRE

SMACC permet d'évaluer différentes stratégies. L'enjeu consiste ensuite à déterminer celle paraissant la plus intéressante. Pour cela, on considère les critères suivants :

- Ratio coût du projet/budget (%)
- Ratio temps utilisé/délai accordé (%)
- Qualité du projet : correspondance entre les attentes du client et l'ouvrage fini (%)
- Équité : nombre d'acteurs ayant perdu de l'argent sur le projet par rapport au nombre total d'acteurs (%). Ce critère permet d'éviter les stratégies qui créaient des situations gagnants/perdants.

ELECTRE III est une méthode multicritère

faisant partie de la suite ELECTRE. Elle permet de résoudre les problèmes décisionnels de classement. A partir de l'ensemble des stratégies $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$, étant caractérisées chacune par un vecteur de valeur $g(s_i) = \{g_1(s_i), g_2(s_i), \dots, g_p(s_i)\}$ sur les critères 1 à p, cette méthode cherche à les hiérarchiser en les comparant par paires sur chacun des critères.

Cette comparaison fait appel à deux notions : les indices de concordance et de discordance. L'indice de concordance $ck(s_i, s_j)$ affirme dans quelle mesure, pour le critère k, la stratégie s_i est au moins aussi intéressante que la stratégie s_j pour ce critère. L'indice de discordance $dk(s_i, s_j)$, pour le critère k, indique dans quelle mesure la stratégie s_i n'est pas aussi intéressante que la stratégie s_j pour ce critère. Ces deux indices sont calculés entre 0 (concordance ou discordance nulle) et

1 (concordance ou discordance parfaite). Afin de synthétiser les indices de concordance et de discordance sur l'ensemble des critères, on introduit la notion de degré de crédibilité. Cet indice $\delta(s_i, s_j)$ indique pour l'ensemble des critères à quel point la stratégie s_i est plus intéressante que la stratégie s_j . Le calcul de cet indice considère les concordances qui seront minorées par les discordances. Afin de prendre en compte l'importance des différents critères pour le décideur, on a recours à un système de pondération. On attribue ainsi à chaque critère un poids indiquant son niveau d'importance vis-à-vis des autres critères.

Enfin, à partir des indices de crédibilité, un classement entre les stratégies peut être établi. Pour cela, on joue sur le niveau de signification du degré de crédibilité. Un paramètre appelé seuil de coupe est défini. On examine alors, par couple, le nombre de fois où une stratégie en domine d'autres. Puis on procède à des distillations successives qui aboutissent à deux rangements (pré-ordre complet). La première relation est obtenue de manière descendante, en sélectionnant la meilleure stratégie et en classant les autres stratégies de la meilleure à la moins bonne, on parle alors de distillation descendante. La seconde se fait de manière ascendante, en choisissant d'abord la plus mauvaise stratégie, et en classant de la plus mauvaise à la meilleure, on parle alors de distillation ascendante. On range alors les stratégies en utilisant ces deux classements.

Nous utilisons une version stochastique d'ELECTRE permettant d'obtenir des résultats plus robustes. En effet, la méthode repose sur un certain nombre de paramètres dont la définition peut se révéler complexe (poids, seuil de coupe...). Dans la méthode employée, les paramètres seront associés à une plage de variation ainsi qu'à une loi de distribution. Par des simulations Monte-Carlo, on peut alors obtenir des classements avec différents jeux de paramètres conduisant ainsi à des résultats plus robustes.

3 Application et résultats

3.1 Contexte

Notre approche a été appliquée pour un projet de construction réel. Ce projet concerne la construction d'un institut de formation d'infirmiers en France. Le budget du projet est de 3.9 M€ ; le temps total alloué du projet est de 18 mois (352 jours de travail). Les acteurs considérés dans le projet sont : le client, le gestionnaire de projet, l'architecte, le bureau d'étude ainsi que l'entreprise réalisant les travaux ; celle-ci est composée de différents services, on la considérera comme trois acteurs distincts : le département études, le département gros-œuvre et le département corps d'état secondaire.

Le projet contient 17 tâches depuis la phase d'étude d'opportunité jusqu'à la phase de livraison de l'ouvrage. Pour chacune de ces tâches, un responsable et un exécutant sont identifiés. L'agent contrat contient les liens entre acteur et tâche ainsi que les différents objectifs visés (temps alloué pour réaliser la tâche, budget prévisionnel, qualité visée...). Une analyse de risque sur le projet a préalablement été réalisée. Elle a permis d'identifier pour ce projet 95 événements risqués (accident de travail, malfaçon, difficulté à obtenir un permis de construction, sous-estimation du matériel nécessaire, etc.) ainsi que 42 facteurs de risques (conditions de travail difficiles, mauvaise implantation de la grue, mauvaise communication, etc.).

Trois stratégies ont été simulées. La première stratégie (S0) correspond à une stratégie standard. Il s'agit de celle retenue pour le projet réel. La seconde stratégie (S1) propose d'améliorer la formation des opérateurs vis-à-vis de la sécurité. La dernière stratégie (S2) consiste à demander une qualité supérieure pour chacune des tâches.

Afin d'obtenir des résultats de simulation robustes et de mieux prendre en compte le caractère stochastique du modèle, nous avons lancé 1000 simulations pour chaque stratégie.

Nous avons effectué 5000 itérations pour la méthode ELECTRE de façon à obtenir une hiérarchisation plus robuste.

3.2 Résultats

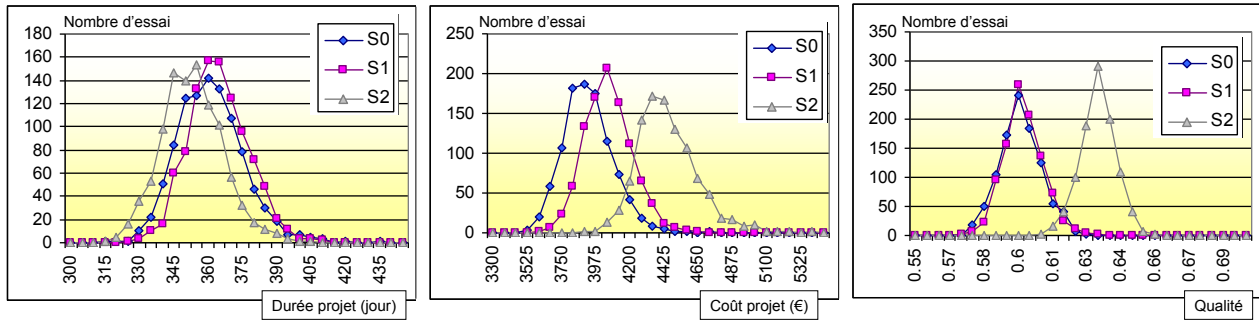


FIG. 4 – Résultats de simulation

La figure 4 montre les distributions de résultats en termes de qualité, temps et coût du projet pour chacune des trois stratégies obtenues par SMACC. Ces graphiques permettent déjà une première analyse des résultats ; le projet ayant pris fin, il est possible de comparer les valeurs obtenues avec celles réelles. Il a été réalisé en 331 jours pour 3,9 M€. La comparaison avec S0 (stratégie standard) permet de constater que pour les délais le projet réel est dans la partie basse de la courbe de distribution. En fait, dans le projet réel aucun risque grave ne s'est produit, à l'exception de conditions météorologiques défavorables (pluies importantes) durant la phase de terrassement, provoquant un retard au cours de cette phase. Mais ce retard a pu être rattrapé lors des phases suivantes par un recours à de la main d'œuvre intérimaire. Ce résultat n'est pas incohérent avec le modèle, les risques sont intrinsèquement stochastiques et il peut arriver (sans nécessairement considérer que l'estimation soit erronée) que le projet réel se trouve dans une situation avantageuse par rapport à la valeur moyenne attendue. La valeur moyenne attendue correspond, en théorie, à ce qu'on pourrait attendre en si l'on réalisait un très grand nombre de projets similaires. Sur un unique projet, si la valeur est comprise dans l'intervalle des valeurs attendues, il peut être considéré comme cohérent. Il n'est pas possible d'en dire plus. Le coût du projet est proche de la valeur moyenne des résultats de la simulation (et semble donc cohérent). La qualité est plus difficile à interpréter. Une analyse plus approfondie devrait être nécessaire pour apprécier la similitude entre les attentes du client et l'ouvrage réalisé.

Ces résultats permettent d'établir une priorisation des trois stratégies. Pour cela, les

résultats de SMACC sont utilisés comme données d'entrée dans ELECTRE III tel qu'exposé dans la partie 2.3. Il est ainsi possible d'obtenir un classement pour chacune des stratégies.

La figure 5 présente le pourcentage par chaque rang pour chaque stratégie. A partir des résultats, nous pouvons constater que la stratégie S2 (qualité élevée) semble la plus intéressante, suivie de la stratégie S0 (stratégie de base). La stratégie S1 (prévention des accidents) semble moins intéressante.

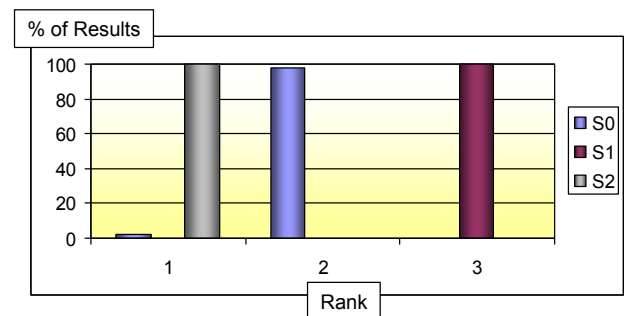


FIG. 5 – Rang des 3 stratégies

4 Conclusion et perspectives

Cet article a présenté une approche d'aide à la décision basée sur le couplage d'un modèle à base d'agent (SMACC) et d'une méthode multicritère d'aide à la décision (ELECTRE III). Cette approche a été appliquée à un cas d'étude réel et a montré son intérêt pour le choix de stratégies de conduite de projet. Notre approche représente une avancée dans le domaine de la gestion de projet en permettant une comparaison imagée et argumentée des différentes stratégies de maîtrise des risques.

L'un des points clés de notre approche réside dans le réalisme du modèle SMACC. Dans ce cadre, nous prévoyons d'améliorer ce modèle

en enrichissant les possibilités d'interaction entre acteurs. En particulier, nous souhaitons travailler sur une prise en compte des relations hiérarchiques entre acteurs afin de pouvoir prendre en compte les liens internes aux entreprises.

Références

- [1] C.J. Anumba, Z. Ren, A. Thorpe, O.O. Ugwu, , et L. Newnham, Negotiation within a Multiagent System for the Collaborative Design of Light Industrial Buildings, *Advances in Engineering Software*, Vol 34 (7), pp 389-401, 2003
- [2] C.J. Anumba, O.O. Ugwu, L. Newnham, et A. Thorpe, Collaborative design of structures using intelligent agents, *Automation in Construction*, Vol. 11, pp 89–103, 2002
- [3] A. Banos, N. Marilleau, et MIRO team: Improving individual accessibility to the city: an agent-based modelling approach. *Proc. of ECCS*, Bruxelles, 2012
- [4] D. Breysse, *Maîtrise des risques de projet, Vol. 2: Maîtrise et gestion des risques dans l'aménagement et la construction*, Hermès-Lavoisier, Paris, 2009
- [5] V. Carr, et J. Tah, A fuzzy approach to construction project risk assessment and analysis: construction project risk management system. *Advances in Engineering software*, Vol 32, pp 847-857, 2001
- [6] D.W.M. Chan, et M. Kumaraswamy, A comparative study of causes of time overruns in Hong Kong construction projects, *Int. J. of Project Management*, Vol 15, pp. 55-63, 1997
- [7] B.H.W. Hadikusumo, S. Petchpong, et Ch. Charoenngam, Construction material procurement using internet-based agent system, *Automation in Construction*, Vol 14, pp 736-749, 2005
- [8] R. Mehdizadeh, D. Breysse, et M. Chaplain, Modeling methodology of the risk breakdown structure for project risk management in construction. In *Proceeding of 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, pp. 811–818, 2011
- [9] E.A. Obonyo, APRON: Agent-based Specification and Procurement of Construction Product, *Ph.D. thesis*, Loughborough University, UK, 2004
- [10] Z. Ren, C.J. Anumba, et O.O. Ugwu, Multiagent system for construction claims negotiation, *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol 17(3), pp 180–188, 2003
- [11] E. Rojas, et A. Mukherjee, Modeling the construction management process to support situational simulations, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, 17(4), 273–280, 2003
- [12] E. Rojas, et A. Mukherjee, Interval temporal logic in general purpose situational simulations, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol 19(1), pp 83–93, 2005
- [13] E. Rojas, et A. Mukherjee, A multi-agent framework for general purpose situational simulations in the construction management domain, *Journal of Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol 20(6), pp 1–12, 2006
- [14] B. Roy, The outranking approach and the foundations of electre methods. *Theory and Decision*, Vol 31, 49-73, 1991
- [15] P. Taillandier, A. Drogoul, D. Vo, et E. Amouroux, Gama: a simulation platform that integrates geographical information data, agent-based modeling and multi-scale control. In *Proceedings of 13th International Conference on Principles and Practices in Multi-Agent Systems (PRIMA)*, pp. 78–98, 2010
- [16] P. Taillandier, O. Therond et B. Gaudou, A new BDI agent architecture based on the belief theory. Application to the modelling of cropping plan decision-making” *iEMSS*, Leipzig, Germany, 2012
- [17] J. Walewski, et E. Gibson, International project risk assessment: Methods, procedures, and critical factors. *Technical report*, Center Construction Industry, 2003
- [18] X.L. Xue, X.D. Li, Q.P. Shen, et Y.W. Wang, An agent-based framework for supply chain coordination in construction, *Automation in Construction*, Vol 14 (3), pp 413–430, 2005