



HAL
open science

Performances d'usage des systèmes bâtis et aide à la décision : Modélisation des perturbations induites par les projets de construction

Gilles Thing Leo, Francis Claude, Rani El Meouche, Ahmed Mebarki,
Christophe Gobin

► To cite this version:

Gilles Thing Leo, Francis Claude, Rani El Meouche, Ahmed Mebarki, Christophe Gobin. Performances d'usage des systèmes bâtis et aide à la décision : Modélisation des perturbations induites par les projets de construction. Congrès Lambda Mu 21, “ Maîtrise des risques et transformation numérique : opportunités et menaces ”, Oct 2018, Reims, France. hal-02066547

HAL Id: hal-02066547

<https://hal.science/hal-02066547>

Submitted on 13 Mar 2019

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.

Performances d'usage des systèmes bâtis et aide à la décision : Modélisation des perturbations induites par les projets de construction

Building performances and decision support : Modeling perturbations induced by construction projects

Gilles THING LEO, Francis CLAUDE, Rani EL MEOUCHE
Ecole Spéciale des Travaux Publics (ESTP Paris)
Institut de Recherche en Constructibilité (IRC)
28 Avenue du Président Wilson, 94230 Cachan

Christophe GOBIN
Ex-Conseiller Scientifique Vinci Construction France,
Ecole Spéciale des Travaux Publics (ESTP Paris)
Institut de Recherche en Constructibilité (IRC)

Ahmed MEBARKI
Université Paris-Est, Laboratoire Modélisation
et Simulation Multi-Echelle (MSME UMR 8205/CNRS),
5 Blvd Descartes, Marne-la-Vallée, France

Résumé

Les travaux de thèse ont porté sur la confection d'un modèle formel permettant de quantifier les perturbations intrinsèquement produites par un projet de construction sur les performances d'usages d'un bâtiment. Afin de caractériser l'interaction entre ces deux systèmes, des paramètres explicatifs ont été identifiés afin d'influencer la probabilité d'atteindre un niveau de performance donné et ainsi maximiser la probabilité de satisfaction des parties prenantes vis-à-vis de leurs préférences. Le modèle se positionne comme une aide à la décision lors de choix d'options constructives et l'amélioration des performances d'usages effectives des bâtiments est la principale application industrielle attendue.

Summary

The thesis work focused on the development of a formal model to quantify the disturbances intrinsically produced by a construction project on the performance of uses of a building. In order to characterize the interaction between these two systems, explanatory parameters have been identified in order to influence the probability of achieving a given level of performance and thus maximize the probability of satisfaction of stakeholders with their preferences. The model positions itself as a decision aid when choosing constructive options and improving the effective performances of use of buildings is the main industrial application expected.

1. Problématique

L'industrie du bâtiment subit depuis le début de ce siècle une mutation impulsée par l'émergence du concept de développement durable. Le resserrement des budgets alloués aux projets de bâtiments, la raréfaction des ressources naturelles, la forte implication de l'industrie du bâtiment dans les émissions de gaz à effet de serre, un coût de non qualité encore non négligeable (AQC, 2015) et l'impact social des bâtiments en tant que support des activités humaines, sont autant de facteurs qui interrogent l'avenir de cette industrie. L'enjeu est le suivant : comment faire mieux avec moins, tout en conciliant l'ensemble des objectifs des acteurs de la filière? (Gobin, 2012b)

Cette question n'est pas triviale pour l'industrie du bâtiment. La première raison est qu'au début des projets, le besoin n'est pas toujours explicitement défini en termes de performances : le cahier des charges du produit est sujet à interprétation ou complété en cours de projet. Deuxièmement, chaque projet est unique en tant que combinaison d'un lieu, d'une architecture et des méthodes constructives différentes. De ce fait, le processus de production et son produit (le bâtiment) sont soumis à des perturbations aléatoires d'origines multiples qui se traduiront par des désordres ultérieurs ou des surcoûts de réparation: un bâtiment n'est pas réalisé en environnement contrôlé (Figure 1). Pour finir, les décisions ne sont pas centralisées de la conception à la déconstruction, induisant une divergence d'intérêts entre les acteurs des projets au détriment des performances d'usage du produit, et donc de l'utilisateur final.

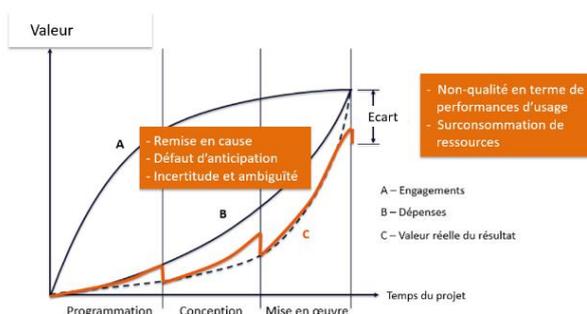


Figure 1. Effet des perturbations sur le bâtiment

Ces obstacles au bon fonctionnement des ouvrages bâtis appellent à l'innovation dans les processus métiers et dans les outils opérationnels. La technologie BIM (Building Information Modeling), favorisant la représentation et le partage des informations dans les projets, les contrats de performance énergétique ou le commissionnement en sont des exemples notables. Néanmoins l'utilisation de modèles d'aide à la décision multicritère de type « model-based » est très peu déployée en pratique puisque le critère habituel et unique de décision est le coût de production. Il est donc proposé ici de poser les bases d'une telle approche afin de permettre des prises de décisions en amont des projets sur des options techniques afin d'assurer l'équilibre entre les performances d'usage et les objectifs respectifs des acteurs de la filière.

L'Institut de Recherche en Constructibilité de l'Ecole Spéciale des Travaux Publics (IRC) où a été réalisé les travaux de thèse, a introduit en France le concept de Constructibilité. Le terme n'est pas à confondre avec la

caractéristique d'un terrain en capacité de recevoir un futur bâtiment. Il s'agit plutôt, d'un champ d'étude ayant pour objectif d'anticiper les difficultés encourues dans un projet de construction de manière à prévenir les erreurs techniques, les dépassements de délais et la dérive des coûts. Les présents travaux s'insèrent dans ce cadre et ont été rattachés au projet de R&D FUI 19 RiD¹ dont la mission est de proposer des outils pour réconcilier les visions économique et financière (incertaines) avec les attentes comptables des projets complexes. De plus les majors de la construction Bouygues Construction Ile-de-France et Vinci Construction France ont été parties prenantes de ce projet et ont permis l'accès à de nombreuses ressources.

Le propos général de cette communication est de présenter un modèle permettant de choisir des options techniques et allouer des ressources dès les phases amont d'un projet de construction de bâtiment. Il s'agit ici de modéliser la manière dont les décisions de projet peuvent dégrader les performances du bâtiment.

2. Etat de l'art :

La réussite d'un projet est une notion étroitement liée à la satisfaction de ses parties prenantes. De manière générique, le maître d'ouvrage souhaite faire construire au meilleur prix un bâtiment dont les caractéristiques sont synthétisées dans un cahier des charges. Le Maître d'œuvre conçoit ce bâtiment conformément à ce cahier des charges en dimensionnant des choix techniques et le constructeur réalise l'ouvrage dans les délais impartis, en dégageant un bénéfice sur le prix de vente.

Ainsi, les trois principaux critères de réussite d'un projet sont le coût de revient, le délai d'exécution et la qualité de l'ouvrage. Les dépassements de coût et de délai ont fait l'objet de nombreuses études et sont traités abondamment par la littérature. La raison est qu'il s'agit de grandeurs de dimension unique et donc facilement accessibles et quantifiables. A l'inverse, la qualité des ouvrages reste aujourd'hui un concept à consolider sur le plan ontologique et sur celui de la mesure. En effet la qualité d'un ouvrage est une performance multicritère composée de dimensions divers. (Gobin, 2012a) définit des familles de performances permettant de décrire les composantes nécessaires à l'accueil d'une activité au sein d'un bâtiment.

La notion de performance est entendue comme un attribut décrivant un objet et qui est quantifié par un niveau. Ce niveau est mesurable in situ ou à l'aide d'un modèle. Or, pour un usager, cette mesure est faite de manière subjective à l'aide de seuils de sensibilité sur un paramètre physique du bâtiment. L'enjeu pour implémenter le modèle qui va suivre est d'identifier les paramètres physiques qui conditionnent la satisfaction relative à une famille de performance données.

Typologie de performance	Exemple	Notation
Espace	Surface de plancher	Esp
Ambiance	Température	Amb
Biens et outils	Puissance électrique disponible	Bo
Accès	Largeur des accès	Acc
Site	Quantité de CO2 émis	Sit
Protection	Résistance au feu	Pro
Esthétique	Hauteur du bâtiment	Est

Table 1. Typologie des performances d'usage

De fait, la satisfaction d'un usager vis-à-vis de l'usage se construit à partir des éléments organiques composant le bâtiment. C'est pourquoi le choix des options techniques est déterminant pour la réussite d'un projet.

Dans la littérature il existe de nombreuses manières de découper organiquement un ouvrage. Chacun de ces découpages est lié à une logique particulière. (Gobin, 2012) s'appuie sur un découpage dit « fonctionnel » : Chaque ensemble répond à une fonction nécessaire au maintien d'une activité donnée dans l'espace et dans le temps indépendamment des conditions de l'environnement externe du bâtiment. Ainsi, lors d'un projet, la demande du maître d'ouvrage exprimée en termes d'attentes fonctionnelles, est spécifiée par une offre structurée par des ensembles dits « fonctionnels » L'arborescence qui en ressort aboutit à la mise en œuvre d'un ouvrage issu du mariage de plusieurs solutions techniques.

Pour ce qui est du choix des options techniques, de nombreuses publications exposent l'application de modèles multicritères (Jato-Espino et al, 2014). Cependant, la majorité de ces derniers est basée sur des critères quantifiés de manières fixes bien qu'une approche probabiliste semble plus adaptée à l'observation des effets causés par une mise en œuvre dont la qualité reste aléatoire compte tenu du mode de production in situ (Nielsen et al., 2009). Dans le corpus de la Constructibilité les modèles plus utilisés sont l'ANP et MAUT. (Yu et al., 1999)(S. K. Kim et al., 2006)

Les travaux de thèse n'ont pas eu pour objet spécifique les modèles multicritères. L'apport principal étant de structurer des concepts et de proposer un modèle décrivant le processus de production par un système formel dirigé par des variables d'états. Ces résultats peuvent donc être appliqués à différents modèles de décision multicritère et ceci sans perte de généralité.

Compte tenu de l'état de l'art, les travaux de thèse se sont concentrés sur les verrous suivants :

- La définition d'une mesure permettant de quantifier la satisfaction d'une partie prenante d'un projet de construction.
- L'intégration d'une composante aléatoire dans la modélisation du processus de production des performances d'usages.
- L'identification de paramètres décrivant ce processus et permettant d'influencer le niveau des performances d'usages.

3. Développement du modèle

Le cheminement adopté s'inspire du modèle général de décision de H.A. Simon. Ce modèle formalise la prise de décision dans les systèmes complexes en vue de faire un choix. (Simon, 1960) Le système complexe ici étudié est le projet formé de deux sous-systèmes en interaction : 1- le système « pour faire » (le processus de production représenté par l'ensemble des moyens techniques et humains affecté au projet) et 2- le système « à faire » (le bâtiment). Le modèle proposé par H.A. Simon comporte quatre phases. La première consiste à rechercher et structurer les informations nécessaires à la prise de décision (phase d'intelligence). La seconde est le recensement et l'analyse des solutions possibles au problème posé (phase de design). La troisième a pour objet d'évaluer les options possibles et d'en choisir une (phase de sélection). Enfin, la

¹ Ce projet de R&D innovant est soutenu par le Conseil régional d'Ile-de-France et la Banque Publique d'Investissement.

quatrième consiste à faire un retour statistique sur les choix passés pour consolider la base de connaissance utile pour les choix futurs. De ce fait, la première et la dernière des quatre étapes ne peuvent être considérées séparément. Le propos général des travaux de thèse s'appuie sur ces articulations afin de construire un modèle de décision adapté aux projets de bâtiment.

3.1. Phase d'intelligence :

L'objectif étant de s'assurer de l'aptitude d'un bâtiment à remplir plusieurs fonctions requises dans des conditions données, cette première étape a donc consisté à définir et organiser les éléments constitutifs génériques d'un bâtiment et les performances induites par leur assemblage. De plus, l'implication de chaque élément constitutif sur ces performances a été formalisée de manière matricielle tout comme les relations d'influences mutuelles entre ces éléments grâce à une analyse structurelle (Tenière-Buchot, 1989). Ces travaux préliminaires ont permis d'identifier les éléments constitutifs et leurs paramètres physiques mesurables (θ) ayant le plus d'influence sur des performances d'usage données. Il a donc été décidé d'appliquer notre modèle à un choix de technologie de façade.

Des études statistiques sur les constructions ont montré que leurs performances thermiques et environnementales sont sujettes à une dispersion conséquente (Lebert et al., 2013). Ces relevés sont opérés à partir de la mesure d'un paramètre physique θ , et segmenté par typologie de choix de constructif. Il est alors possible à partir de ces données de modéliser les performances des bâtiments existants par des distributions statistiques spécifiques par choix constructif et par typologie de performance. De manière générale, cette forte dispersion est expliquée par de nombreux facteurs tels que la qualité de mise en œuvre (Chen, 2007). Par ailleurs, la mesure des attributs des bâtiments réalisés peut être vu comme un historique du savoir-faire technique des constructeurs.

Pour représenter ces distributions historiques, nous utilisons respectivement des distributions normales $\theta \sim \mathcal{N}(\alpha, \beta)$ et gamma $\theta \sim \Gamma(\mu, \sigma)$ pour des échantillons symétriques et asymétriques notés ρ_{θ}^{hist} .

A partir de ces représentations, deux indices sont définis. D'une part un indice de complexité des choix constructifs mis en œuvre et d'autre part un indice de compétence du constructeur.

3.1.1. Indice de complexité :

L'entropie de Shannon est une mesure de complexité utilisée en théorie de l'information. (Rajaram et al, 2016). Pour une source assimilée à une variable aléatoire discrète X pouvant émettre N symboles différents, chaque symbole x_i ayant une probabilité P_i d'apparaître, l'entropie H de la source X est définie comme :

$$H(X) = -\sum_i^n P_i \log(P_i) \quad \{1\}$$

Une analogie est faite ici entre d'une part une source délivrant une information aléatoire et d'autre part un choix constructif délivrant un niveau de performance aléatoire. Cette performance étant mesurée sur une échelle continue, on adapte la formulation discrète en une formulation continue qui nous fournit un indicateur de complexité Cpx propre à un choix constructif et à une performance donnée.

Soit ρ_{θ} la densité de probabilité de l'attribut θ associé à une performance donnée. Nous proposons de mesurer la complexité de mise en œuvre d'un procédé constructif i contribuant à cette performance par :

$$Cpx_i = -\int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{\theta}(\theta) * \log(\rho_{\theta}(\theta)) d\theta \quad \{2\}$$

3.1.2. Indice de compétence :

Pour un choix constructif i , une équipe de production j et une valeur de référence E (réglementaire ou normative), nous proposons d'exprimer $Cap_{i,j}$, l'indicateur de compétence de l'équipe de production par :

$$Cap_{i,j} = P(\theta < E) = \int_{-\infty}^E f(\theta) d\theta \quad \{3\}$$

(lorsque θ est à minimiser)

$$Cap_{i,j} = P(\theta > E) = \int_E^{+\infty} f(\theta) d\theta \quad \{4\}$$

(lorsque θ est à maximiser)

3.2. Phase de modélisation :

En supposant l'existence d'une bibliothèque d'options technologiques pour un élément constitutif générique, cette deuxième étape du raisonnement consiste à proposer une métrique permettant de quantifier la probabilité de satisfaction d'une fonction d'usage pour chaque option. Cette quantification prend en compte l'interaction entre le processus de production et le produit. Pour ce faire, le système couplé SPF/SAF est modélisé avec le formalisme des fonctions de transferts couramment utilisées en modélisation des systèmes asservis.

D'un point de vue globale, le projet est vu comme un processus traitant une consigne d'entrée (E) et délivrant un résultat de sortie (S) modulé par des perturbations aléatoires. Ce formalisme est apparenté à celui de la dynamique des systèmes et se représente de manière graphique afin d'en extraire une équation canonique mettant en relation E et S . L'adaptation de cette approche au secteur de la construction nécessite cependant d'enrichir ce premier modèle en introduisant pour chaque tâche du processus de production, les variables d'état de complexité et de compétence précédemment définies.

Afin d'estimer la probabilité de satisfaction d'une performance d'usage par une solution technique donnée, un calcul d'espérance mathématique est entrepris en tenant compte de la distribution statistique de paramètres physiques mesurables (donnée objective) et du niveau de satisfaction que le maître d'ouvrage y associe (donnée subjective).

3.2.1. Profil de satisfaction U_{θ}

Avec la convention que 0 et 1 valent respectivement une satisfaction nulle et totale, le profil de satisfaction d'une partie prenante U_{θ} est défini comme une fonction mathématique ayant pour support un attribut physique continu mesurable θ tel que $U_{\theta} : \theta \rightarrow [0; 1]$. Un examen des différents attributs physiques mesurables montre qu'il existe trois types de profil de satisfaction (Table 2)

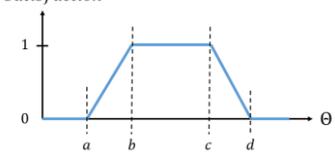
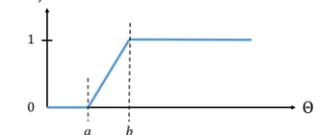
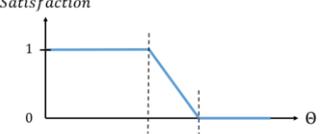
Type de profil	Représentation graphique
Bilatéral : $\frac{\partial S}{\partial \theta} \geq 0$ pour $\theta \leq \frac{b+c}{2}$ $\frac{\partial S}{\partial \theta} \leq 0$ pour $\theta \geq \frac{b+c}{2}$	Satisfaction  Température de confort : a = 19°C ; b = 21°C c = 25°C ; d = 27°C
Incrémental : $\frac{\partial S}{\partial \theta} \geq 0$	Satisfaction  Surface de plancher: a = 5m ² ; b = 8m ²
Décémental : $\frac{\partial S}{\partial \theta} \leq 0$	Satisfaction  Consommation énergétique : a = 60kWh/m ² /an b = 100kWh/m ² /an

Table 2. Typologie des profils de satisfaction

En pratique, les paramètres a, b, c et d sont donnés de manière subjective par le maître d'ouvrage en tant que représentant de l'utilisateur final du futur bâtiment.

Le concept de niveau de satisfaction exposé ici n'a pas de relation avec les concepts d'utilité développés dans le cadre des sciences économiques et sociales : utilité ordinale et cardinale. Il en est de même pour les concepts d'utilité développés dans les sciences de la décision pour tenir compte de l'incertitude : théorie de l'utilité espérée de Von Neumann et Morgenstern (1945), théorie de l'utilité espérée subjective de Leonard J. Savage (1954) et théorie des perspectives développée par D. Kahneman et A. Tversky. Wakker (2010) présente un état de l'art très complet de la réflexion scientifique sur ces concepts depuis le 18^{ème} siècle.

3.2.2. Estimation de la probabilité de satisfaction d'une partie prenante

Pour estimer la probabilité de satisfaction d'une partie prenante, nous calculons l'espérance du profil de satisfaction. Soit U_{θ}^i et ρ_{θ} respectivement le profil de satisfaction de la partie prenante i et la fonction de densité de la variable aléatoire θ :

$$P_{\theta}^i = \overline{U_{\theta}^i} = \int_{-\infty}^{+\infty} \rho_{\theta}(\theta) U_{\theta}^i(\theta) d\theta \quad (5)$$

La quantité obtenue est bornée dans l'intervalle [0 ; 1] et peut être vue comme une probabilité. Par la suite on cherche à maximiser cette grandeur. De plus ρ_{θ} peut-être une distribution historique ou une distribution simulée comme nous le verrons dans la suite de cet article.

3.2.3. Optimisation de la probabilité de satisfaction d'une partie prenante

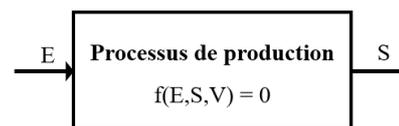
L'intérêt de ces préliminaires est de pouvoir maximiser la probabilité de satisfaction P_{θ}^i de la partie prenante i par rapport au paramètre θ . Cela revient simultanément à :

- (1) déplacer le centre de la fonction de densité ρ_{θ} des observations vers l'intervalle de valeurs où U_{θ}^i est maximale.
- (2) Resserrer la fonction de densité ρ_{θ} autour de son centre en diminuant sa variance

D'un point de vue opérationnel, maximiser P_{θ}^i en limitant la variance d'un attribut physique pour une valeur cible donnée, revient à maîtriser les procédés de construction. La démarche inverse est possible en dégradant les conditions de satisfaction pour qu'elles correspondent au savoir-faire des acteurs du projet, mais cela va à l'encontre du progrès technique et du respect des cahiers des charges. La deuxième option n'est pas a priori la marche à suivre. Fixer une valeur cible est une chose aisée mais contrôler la variance autour de celle-ci l'est moins. C'est pourquoi dans la suite est développé un modèle permettant de modéliser cette variance en tenant compte des variables d'état d'un processus donné (moyens, complexité, compétence).

3.2.4. Modélisation de la variance d'une performance : apport de la théorie des systèmes asservis

Toute activité dotée d'une finalité est assimilable à une transformation d'une matière d'œuvre entrante en une matière d'œuvre sortante matérielle ou immatérielle. Cela revient à modéliser l'activité comme un système formel décrit par une équation de type $f(E, S, V) = 0$ avec E un signal d'entrée, S un signal de sortie et V un vecteur de paramètres d'état caractérisant le système. (Figure 4)


Figure 4. Modèle simplifié d'un processus de production

C'est en ce sens qu'un rapprochement peut être fait avec la modélisation des systèmes linéaires invariants dans le domaine de l'électronique asservie (Esmaili et al., 2018; Gao et al., 2018; Wang et al., 2018). Ce champ de connaissance permet de considérer une boucle de rétroaction afin de comparer le signal de sortie S et le signal d'entrée E. Ainsi le système, en fonction de son organisation interne, peut se réguler afin que S converge vers E. Le formalisme utilisée est graphique et se traduit par une équation mathématique nommé « fonction de transfert ».

Le même raisonnement est encore valable pour une activité dans le cadre d'un chantier de construction. En effet, après qu'un opérateur ait terminé une tâche celui-ci vérifie la conformité du travail effectué et opère une correction le cas échéant. On observe bien ici un phénomène de feedback à une échelle microscopique du processus de production et qui peut se répliquer à d'autres échelles.

L'intérêt de ce formalisme est que la modulation du signal de sortie par rapport au signal d'entrée dépend d'une part de l'organisation interne du système modélisé et d'autre part des perturbations s'exerçant sur le système. Le formalisme par bloc d'un système linéaire asservi, est exposé avec la table 3.

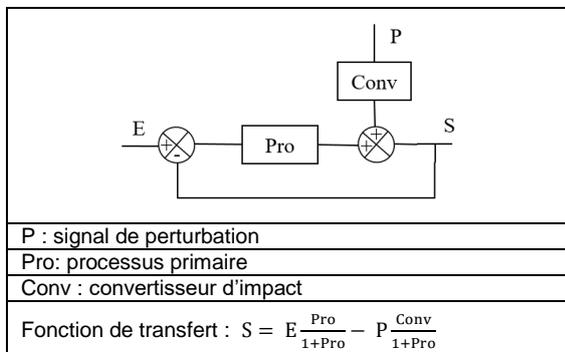


Table 3. Formalisme graphique d'un système en boucle fermée

A priori, un système évoluant dans un environnement ouvert est soumis à des perturbations de natures différentes qui éloignent ce dernier de sa finalité (Nielsen et al., 2009) (Love, 2002). L'effet de ces perturbations est globalement connu avec la dégradation du signal de sortie mais l'enjeu est de quantifier leur intensité de manière contextualisée et objective afin d'aiguiller les choix des décideurs durant le projet.

Pour interpréter cette fonction de transfert il convient de distinguer deux cas :

- 1- CONV = 0 ,cas sans perturbation:

$$S = E \frac{Pro}{1+Pro} \quad \{6\}$$
 Pour que S converge vers E il suffit que la valeur de Pro soit grande, autrement dit, S est d'autant plus proche de E que le processus de transformation est efficace.
- 2- CONV > 0, cas avec perturbation :

$$S = E \frac{Pro}{1+Pro} - P \frac{Conv}{1+Pro} \quad \{7\}$$
 De la même manière, pour une valeur donnée de Conv, si Pro est suffisamment grand l'effet de la perturbation est atténué par annulation du second membre tandis que le premier tend vers 1. De plus si Conv est faible devant Pro la perturbation a peu d'effet car le second membre tend à s'annuler.

Ainsi, pour obtenir un signal de sortie aussi proche possible de la consigne initiale, il convient de minimiser Conv et/ou de maximiser Pro. Ce formalisme quantitatif permet donc de piloter le résultat d'un processus de production en dimensionnant ses variables d'état.

Par analogie, on peut répliquer le formalisme à une activité quelconque dans le processus de production d'un bâtiment. (Tableau 5) Cette contextualisation est concrétisée ici avec une formulation spécifique du bloc Pro qui intègre le flux de ressources utilisé pour la finalité du processus (m), l'ajout d'un bloc supplémentaire pour tenir compte de la complexité du procédé de construction manipulé et des compétences mobilisées (Cpx et Cap).

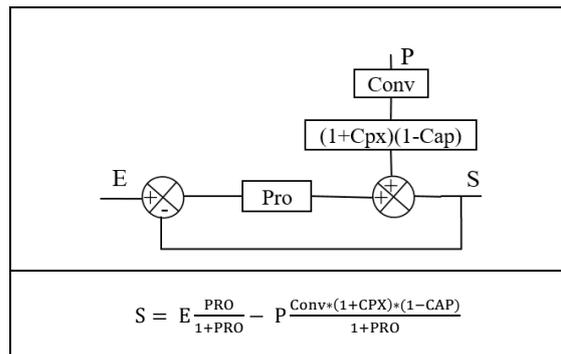


Table 4. Formalisme graphique d'un système en boucle fermée appliqué à un projet de construction

3.2.5. Spécification mathématique de la fonction de transfert pour un processus de production d'un bâtiment :

Pro est une fonction de production primaire convertissant des moyens m (financiers, matériels et humains) en une matière d'œuvre de sortie. L'accroissement des moyens mobilisés conduit par hypothèse à un accroissement de la valeur de la matière d'œuvre de sortie. On suppose ici que m englobe tout type de ressources, converties en valeur monétaire. Par exemple, un jour de retard sur le planning d'un chantier se traduit par un jour de fonctionnement en terme de location de matériel, de salaire de main d'œuvre, ou d'éventuelles pénalités de retard. Par convention m s'exprime relativement à une quantité de référence m_0 avec $M = \frac{m}{m_0}$. Une injection supplémentaire de ressources par rapport aux cas de référence se traduit donc par $M > 1$.

Hypothèse 1 :

A défaut de relation pertinemment établie, nous proposons, à titre d'illustration, d'adapter la fonction de transfert par la transformation suivante :

$$S = 2E \frac{\alpha}{|\alpha|} \left(\frac{PRO}{1+PRO} + \frac{1}{2} \left(\frac{\alpha}{|\alpha|} - 1 \right) + k \right) + \frac{\alpha}{|\alpha|} \frac{CONV * (1 + CPX) * (1 - CAP)}{1+PRO} \quad \{8\}$$

avec $PRO = \exp(|\alpha|M)$

Où :

α est un paramètre caractérisant une activité de production relative à une performance et à un choix constructif donnés.

k un paramètre d'ajustement permettant d'assurer $S(m = 0) = 0$.

En vis-à-vis de l'indicateur de complexité CPX, on pose un indicateur de compétence, noté CAP. Une activité de production ne mène pas nécessairement à des écarts par rapports aux objectifs de performance. C'est pourquoi il convient de laisser la possibilité d'un équilibre neutre entre la complexité des choix constructifs et les compétences déployées. Ainsi $(1 + Cpx) * (1 - Cap)$ peut atténuer, voire annuler l'effet des perturbations si Cap est proche de 1. Inversement si les équipes de mise en œuvre sont peu compétentes (CAP proche de 0), les perturbations seront très influentes sur les performances du bâtiment.

Conséquence 1 :

$$\alpha > 0 \Rightarrow S = S_1 = 2E \left(\frac{\exp(|\alpha|M)}{1+\exp(|\alpha|M)} + k \right) + \frac{\text{CONV} \cdot (1+\text{CPX}) \cdot (1-\text{CAP})}{1+\exp(|\alpha|M)} \quad \{9\}$$

$$\alpha < 0 \Rightarrow S = S_2 = -2E \left(\frac{\exp(|\alpha|M)}{1+\exp(|\alpha|M)} + k - 1 \right) - \frac{\text{CONV} \cdot (1+\text{CPX}) \cdot (1-\text{CAP})}{1+\exp(|\alpha|M)} \quad \{10\}$$

Hypothèse 2 :

$S(M=0) = 0$ pour $\alpha > 0$

et

$S(M=0) = 2E$ pour $\alpha < 0$

Conséquence 2 :

$$k = - \left(\frac{\text{CONV}(1+\text{CPX})(1-\text{CAP})}{4E} + \frac{1}{2} \right) \quad \{11\}$$

Hypothèse 3 :

Pour $M=1$, $\text{CONV} = 0$ et pour $\alpha > 0$, $\frac{S}{E}$ est supposé borné supérieurement par 1 de sorte que

$S = rE$ avec $0 < r < 1$

$$\text{Conséquence : } |\alpha| = \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \text{ pour } \alpha > 0 \quad \{12a\}$$

Pour $M=1$, $\text{CONV} = 0$ et pour $\alpha < 0$, $\frac{S}{E}$ est supposé borné inférieurement par 1 de sorte que

$S = (2-r)E$ avec $0 < r < 1$

$$\text{Conséquence } |\alpha| = \ln \left(\frac{1+r}{1-r} \right) \text{ pour } \alpha < 0 \quad \{12b\}$$

Hypothèse 4 :

Conv est l'effet des perturbations sur le résultat S. Il s'agit d'une variable aléatoire estimée statistiquement à partir des valeurs historiques de S, Pro, Cap et Cpx.

Conséquence 4 :

$$\text{CONV} = \frac{1+\text{PRO}}{(1+\text{CPX}) \cdot (1-\text{CAP})} \left(E \frac{\text{PRO}}{1+\text{PRO}} + k - S \right) \text{ pour } \alpha > 0 \quad \{13a\}$$

$$\text{CONV} = - \frac{1+\text{PRO}}{(1+\text{CPX}) \cdot (1-\text{CAP})} \left(E \frac{\text{PRO}}{1+\text{PRO}} - k - S \right) \text{ pour } \alpha < 0 \quad \{13b\}$$

3.3. Phase de choix :

De nombreux modèles de choix multicritères peuvent être appliqués mais pour des raisons de simplicité la phase de sélection sera illustrée avec le formalisme des diagrammes de fiabilité. Soit K l'ensemble d'évènements conditionnant l'évènement global de satisfaction vis à vis des performances d'usage d'un bâtiment.

$$K = \{E_{Esp}, E_{Amb}, E_{BO}, E_{Acc}, E_{Pro}, E_{Sit}, E_{Est}\}$$

L'introduction du concept d'évènement nous permet ici de considérer la probabilité d'occurrence de chaque élément de l'ensemble K. De plus l'évènement de satisfaction globale peut a priori émerger de différentes combinaisons logiques répondant aux préférences de la partie prenante interrogée. Afin de formaliser ces combinaisons, nous utilisons les relations ensemblistes d'union (U) et d'intersection (∩) entre

deux évènements élémentaires. Un tel formalisme est utilisé notamment en sûreté de fonctionnement (Ahmed et al., 2014) (Jin et al., 2015) (Ding et al., 2017; M. C. Kim, 2011) ou encore au sujet de la quantification de dommages lors d'accidents industriels ou de catastrophes naturelles (Mebarki et al, 2017a,2017b 2016,2013,2012). . Les deux cas génériques sont présentés en table 5. Les autres combinaisons sont obtenues avec l'union et l'intersection de séries d'évènements.

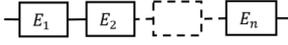
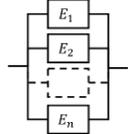
Configuration parallèle	Configuration série
$E_1 \cap E_2 \cap \dots \cap E_n$	$E_1 \cup E_2 \cup \dots \cup E_n$
	

Table 5. Montages simples

Pour le développement qui suit, chaque évènement de satisfaction est supposé indépendant des autres par soucis de simplicité. Cependant, il n'existe pas de données statistiques suffisamment étendues pour vérifier cette hypothèse. Si plus de données sont disponibles dans le futur, l'étude des liens de corrélation permettront d'affiner le modèle ici présenté.

Soit P_j la probabilité de satisfaction de l'évènement E_j relatif à la performance j . Grâce à l'hypothèse d'indépendance des évènements E_j , le calcul de la probabilité globale de satisfaction P_{usage} (relatif aux fonctions d'usages) pour les deux cas simples donne :

$$P_{usage} = \prod_j P_j \quad \text{Configuration en parallèle}$$

$$P_{usage} = 1 - \prod_j (1 - P_j) \quad \text{Configuration en série}$$

Pour conclure, l'option constructive maximisant la probabilité P_{usage} est celle préconisée par le present modèle.

4. Application à un choix technique

La méthodologie est appliquée au cas pratique du choix de conception d'une façade en béton armée à partir de données délivrées dans le cadre de la thèse par Bouygues Bâtiment Ile-de-France et Vinci Construction France. Le premier cas correspond à une façade préfabriquée et le deuxième cas à une solution « coulée en place ». De plus des données institutionnelles sur les constructions en béton ont été rassemblées dans la table 6 pour permettre le calibrage des lois de probabilité associée aux performances à forte dispersion statistique. (Cerema, 2013; LEBERT et al., 2013)

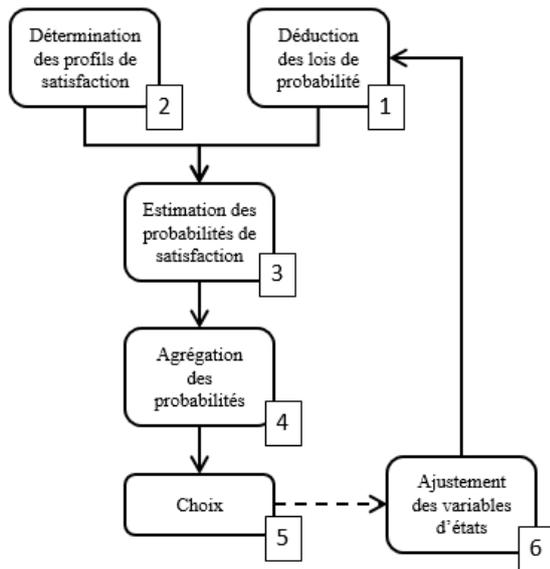


Figure 5. Synoptique de l'exemple d'application

Etape 1 : Déduction des lois de probabilité

Performance	Notation	Unité	Cas 1	Cas 2
Surface de plancher	P1	m ²	18	17.1
Résistance thermique façade	P2	m ² .K.W ⁻¹	4.4	3.1
Atténuation acoustique façade	P3	dB(A)	55	60
Étanchéité à l'air	P4	m ³ /h.m ²	[Hypothèse] Pour les constructions en béton : Modélisation loi Gamma : $\alpha = 1.763$ $\beta = 1.430$	
Consommation d'énergie non renouvelable	P5	kWh/m ² SHON/an	[Hypothèse] Pour les constructions en béton : Modélisation loi normale : $\mu = 55$ $\sigma = 10.8$	

NOTA : Les hypothèses sur les distributions (Gamma, Gaussienne) ont été adoptées de manière empirique pour des besoins d'illustration. Cependant, c'est en traçant les distributions résultant de données éparées (peu nombreuses pour être considérées comme représentatives) collectées dans la bibliographie, que les types de lois ont été adoptées à partir du rendu visuel. Les paramètres statistiques (α , β , μ et σ) sont établies à partir des données collectées traitées par le logiciel R et une estimation par maximum de vraisemblance.

Table 6. Hypothèses de calcul

Etape 2 : Détermination des profils de satisfaction

Type de profil de satisfaction	Performance	Paramètre de la fonction U_{θ}
Incrémental	P1 : Surface de plancher	a = 12 m ² ; b = 20 m ²
	P2 : Résistance thermique façade	a = 2 m ² .K.W ⁻¹ ; b = 5 m ² .K.W ⁻¹
	P3 : Atténuation acoustique façade	a = 45 dB(A) ; b = 65 dB(A)
Décémental	P4 : Étanchéité à l'air	a = 1 m ³ /h.m ² ; b = 3 m ³ /h.m ²
	P5 : Consommation d'énergie	a = 50 kWh/m ² SHON/an ; b = 80 kWh/m ² SHON/an

 Table 7. Exemples de profils de satisfaction U_{θ}
Etape 3 : Estimation des probabilités de satisfaction

D'après l'équation {5} Les probabilités de satisfactions pour chaque performance et chaque option sont retranscrites dans le tableau suivant :

	Cas 1	Cas 2
P_1	0.75	0.64
P_2	0.81	0.35
P_3	0.5	0.75
P_4	0.46	
P_5	0.76	

Table 8. Probabilité de satisfaction (historique)

Etape 4 : Agrégation des probabilités

Ensuite, une structure de satisfaction est proposée comme suit:

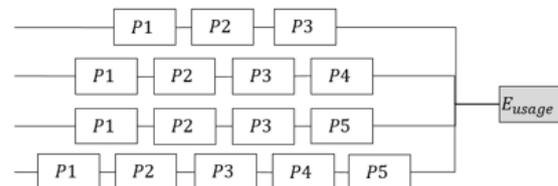


Figure 6. Structure de satisfaction proposée

Etape 5 : Choix

On obtient :

	Cas 1	Cas 2
P_{usage} (sans action)	0.586	0.368

Table 9. Résultat sans action

Le cas 1 est donc préférable.

Etape 6 : Ajustement des variables d'états

A titre d'exemple, il convient ensuite d'examiner dans quelle mesure il est possible d'améliorer P_{usage} avec la consigne d'entrée E et le paramètre d'état CAP, directement modifiable par un choix managérial maximisant les compétences des équipes de construction. Pour ce faire, il convient de déterminer une configuration de référence permettant une comparaison ultérieure.

On pose $M = 1$, ce qui signifie que dans le passé, tous les projets se sont déroulés avec le juste nécessaire de ressources. De plus, la consigne E est mise égale aux valeurs de références imposées par la réglementation en vigueur, ou à défaut, à une valeur réaliste d'exigence opérationnelle de la part des professionnels de l'industrie. Si ρ_θ est la fonction de densité du paramètre physique θ , on pose dans le cas d'une performance décroissante :

$$CAP_{ref} = P(\theta < E_{ref}) = \int_{-\infty}^E \rho_\theta(\theta) d\theta$$

On obtient donc :

	P4	P5
E_{ref}	1 m3/h.m2	50 kWh/m ² SHON/an
CAP_{ref}	0.23	0.32

Table 10. Etat de référence

Pour améliorer la probabilité de satisfaction d'usage global on souhaite modifier E et CAP par les valeurs suivantes :

	P4	P5
E	0.6 m3/h.m2	30 kWh/m ² SHON/an
CAP	0.50	0.60

Table 11. Etat prospectif voulu

Avec les lois de probabilité utilisées pour modéliser les valeurs observées S pour les performances P4 et P5 on détermine grâce à l'équation {13b} et une série de 1000 valeurs simulées pour le paramètre CONV, représentatif des perturbations que subit le processus de production.

Par suite avec l'équation {10} une série de valeurs de S est simulée avec ces paramètres respectivement pour chacune des performances P4 et P5, avec les nouvelles valeurs pour E et CAP. Ainsi on obtient des densités de probabilité simulées dont les paramètres ont été extraits avec le logiciel R et la méthode de maximum de vraisemblance :

	P4	P5
S	$\alpha = 1.60$ $\beta = 1.00$	$\mu = 32.98$ $\sigma = 6.47$
U_θ	a (= E)	30
	b	80
P_{usage}	0.62	0.91

Table 12. Effet de l'action sur la distribution prospective des performances P4 et P5

Nota : Le profil de satisfaction U_θ est ajusté en fonction de la valeur de consigne E de sorte que $a = E$.

Les données chiffrées montrent que de satisfaction de chaque performance est croissante avec les paramètres E et CAP. Il s'agit d'un résultat attendu qui confirme le bienfondé de la modélisation ici présentée.

Il est important de noter que la modification des paramètres E et CAP ne sont possibles que par l'apport de ressources supplémentaires qui ne sont pas ici étudiés.

	Cas 1	Cas 2
P1	0.75	0.64
P2	0.81	0.35
P3	0.5	0.75
P4	0.62	
P5	0.91	

Table 13. Probabilités de satisfaction prospective après action

La probabilité de satisfaction d'usage pour le cas 1 a augmenté de 12,5% contre 16,3% pour le cas 2. Cependant le cas 1 est toujours préférable. Une étude plus approfondie avec la prise en compte des coûts induits pas une valeur de consigne E et l'affectation d'équipe de compétence plus élevée permettrait d'affiner ces résultats.

	Cas 1	Cas 2
P_{usage} (sans action)	0.586	0.368
P_{usage} (avec action)	0.659	0.428

Table 14. Comparaison des probabilités globales de satisfaction

5. Conclusion

Le constat d'un fort caractère aléatoire des performances d'usages des bâtiments appelle à une mutation des modèles de décision et de conception utilisés dans les projets de construction. En effet, l'atteinte des objectifs de garantie de performance sont par définition contingentés par les décisions prises en amont des projets. Les travaux présentés ont abouti à une proposition qui va en ce sens.

En adoptant la démarche de H.A. SIMON, un modèle a été construit sur la base de l'interaction entre deux systèmes : le bâtiment et le processus de production. Ce modèle permet de quantifier les perturbations intrinsèquement induites par le projet sur les performances d'usage du bâtiment. Dans le cadre d'un problème de décision lors d'un choix technique entre différentes options constructives, l'option préconisée est celle ayant la plus forte probabilité de satisfaction vis-à-vis de préférences exprimées par le maître d'ouvrage en tant que représentant des usagers. Cette probabilité de satisfaction peut alors être optimisée en modifiant les paramètres d'état du système modélisé. Cette approche demeure originale dans l'industrie de la construction où les approches probabilistes ne sont jamais utilisées sur un aussi large panel de performances d'usage. De plus, contrairement à la majorité des modèles multicritères rencontrés dans le domaine de la Constructibilité, les données correspondant aux performances délivrées par les options techniques (les critères), sont de nature objective et distribués de manière probabiliste. C'est en ce sens que cette modélisation est représentative de la réalité des opérations de construction où un même niveau de performance est difficile à répéter compte tenu des perturbations pesant sur le système formé conjointement par le bâtiment et le processus de production.

Cependant, l'applicabilité du modèle exposé est limitée car une quantité importante de données statistiques est nécessaire. Ces données étant le plus souvent issues de mesures in situ, les coûts d'acquisition associés ne permettent pas d'envisager une application à grande échelle sans poser un certain nombre d'hypothèse simplificatrices. De plus, pour les mêmes raisons, l'hypothèse d'indépendance avancée lors de l'étape d'agrégation des probabilités de satisfaction par rapport aux performances d'usage reste à démontrer.

Remerciements

L'ensemble de l'équipe de la thèse remercie le projet de R&D FUI 19 RiD dont sont issus les financements et les partenaires industriels Vinci Construction France et Bouygues Construction Ile-de-France pour leur collaboration.

Références

Ahmed, W., Hasan, O., & Tahar, S. (2016). Formalization of Reliability Block Diagrams in Higher-order Logic. *Journal of Applied Logic*, 18, 19–41. <https://doi.org/10.1016/j.jal.2016.05.007>

AQC. (2015). *PATHOLOGIE : TOP 10*. Sycodès 2015.

Bistouni, F., & Jahanshahi, M. (2014). Analyzing the reliability of shuffle-exchange networks using reliability block diagrams. *Reliability Engineering and System Safety*, 132, 97–106. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2014.07.012>

Cerema. (2013). *Perméabilité à l'air de l'enveloppe des bâtiments État des lieux du tertiaire en France - Octobre 2013, 2012–2013*.

Chen, Q. (2007). *An Object Model Framework for Interface Management in Building Information Models*.

Ding, L., Wang, H., Jiang, J., & Xu, A. (2017). SIL verification for SRS with diverse redundancy based on system degradation using reliability block diagram. *Reliability Engineering and System Safety*, 165(114), 170–187. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2017.03.005>

Esmaili, A., Li, J., Xie, J., & Isom, J. D. (2018). Closed-loop identification for plants under model predictive control. *Control Engineering Practice*, 72(May 2017), 206–218. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2017.12.003>

Gao, Y. G., Jiang, F. Y., Song, J. C., Zheng, L. J., Tian, F. Y., & Geng, P. L. (2018). A novel dual closed-loop control scheme based on repetitive control for grid-connected inverters with an LCL filter. *ISA Transactions*, 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2018.01.029>

Gobin, C. (2012). *Analyse fonctionnelle et construction*, 33(0), 0–16.

Gobin, C. (2012). *Développement durable en BTP Fonctions d'usage*, 33(0), 0–12.

Gobin, C. (2012). *Efficience d'une construction - Contribution à un développement durable*, 33(0), 0–12.

Jato-Espino, D., Castillo-Lopez, E., Rodriguez-Hernandez, J., & Canteras-Jordana, J. C. (2014). A review of application of multi-criteria decision making methods in construction. *Automation in Construction*, 45, 151–162. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.013>

Jin, J., Pang, L., Zhao, S., & Hu, B. (2015). Quantitative assessment of probability of failing safely for the safety instrumented system using reliability block diagram method. *Annals of Nuclear Energy*, 77, 30–34. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2014.11.009>

Kim, M. C. (2011). Reliability block diagram with general gates and its application to system reliability analysis. *Annals of Nuclear Energy*, 38(11), 2456–2461. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2011.07.013>

Kim, S. K., Park, H. S., Lee, K. W., & Jung, C. H. (2006). Development of a digital mock-up system for selecting a decommissioning scenario. *Annals of Nuclear Energy*, 33(14–15), 1227–1235. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2006.07.009>

LEBERT, A., Lasvaux, S., GRANNEC, F., NIBEL, S., ACHIM, F., & SCHIOPU, Nicoleta, C. (2013). Capitalisation des résultats de l'expérimentation HQE Performance . *Analyse statistique Action* 22, 1–235.

Love, P. E. D. (2002). Influence of Project Type and Procurement Method on Rework Costs in Building Construction Projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 9364(November), 11. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2002\)128](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2002)128)

Mebarki, A. (2017a) A. Resilience: theory and metrics – A metal structure as demonstrator. *Eng. Struct.*, Elsevier, 138: 425-433 (<http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.02.026>)

Mebarki A, Jerez Barbosa S, Prodhomme G, Reimeringer M. (2016) Natural hazards, vulnerability and structural resilience: tsunmais and industrial tanks, *GNHR*, 7: 5-17

Mebarki A., Boukri M., Laribi A., Farsi M.N., Belazougui M., Kharchi F., (2013). Seismic vulnerability: theory and application to Algerian buildings, *JOSE*, Springer, 18: 331-343, doi:10.1007/s10950-013-9377-0

Mébarki A., Valencia N., Salagnac J.L., Barroca B., (2012). Flood hazards and masonry constructions: a probabilistic framework for damage, risks and resilience at urban scale, *NHESS*, Copernicus Publications, 12: 1799-1809

Mebarki A. (2017b) Safety of atmospheric industrial tanks: fragility, resilience and recovery functions. *J. Loss Prev. Process Ind.*, 49B: 590-602 (<https://doi.org/10.1016/j.jlp.2017.06.007>) (2017).

Nielsen, J., Hansen, E. J. D. P., & Aagaard, N.-J. (2009). *Buildability As Tool.*, 1003–1012.

Rajaram, R., & Castellani, B. (2016). An entropy based measure for comparing distributions of complexity. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 453, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2016.02.007>

Savage, L. (1954). *The Foundations of Statistics*. New York: Dover Publications, Inc.

Simon, H. A. (1960). *The Ford distinguished lectures: Vol. 3. The new science of management decision*. New York, NY, US: Harper & Brothers. <http://dx.doi.org/10.1037/13978-000>

Von Neumann, J., & Morgenstern, O. (2004). *Theory of Games and the Economic Behaviour* (éd. Sixtieth-Anniversary Edition). Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Wakker, P. P. (2010). *Prospect Theory*. New York: Cambridge University Press.

Wang, J., Su, J., Zhao, Y., & Zhou, D. (2018). Searching historical data segments for process identification in feedback control loops. *Computers & Chemical Engineering*, 112, 6–16. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2018.01.018>

Yu, W. D., & Skibniewski, M. J. (1999). Quantitative constructability analysis with a neuro-fuzzy knowledge-based multi-criterion decision support system. *Automation in Construction*. [https://doi.org/10.1016/S0926-5805\(98\)00105-8](https://doi.org/10.1016/S0926-5805(98)00105-8)