CIRRELT

Centre interuniversitaire de recherche
sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport

Interuniversity Research Centre
on Enterprise Networks, Logistics and Transportation

Système hybride flou multicritère à base de connaissance pour la sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées

Moustapha Ahmed Bouh
Diane Riopel

Mai 2016

CIRRELT-2016-26

Bureaux de Montréal :
Université de Montréal
Pavillon André-Aisenstadt
C.P. 6128, succursale Centre-ville
Montréal (Québec)
Canada H3C 3J7
Téléphone : 514 343-7575
Télécopie : 514 343-7121

Bureaux de Québec :
Université Laval
Pavillon Palasis-Prince
2325, de la Terrasse, bureau 2642
Québec (Québec)
Canada G1V 0A6
Téléphone : 418 656-2073
Télécopie : 418 656-2624

www.cirrelt.ca

Université Laval · McGill · Concordia University · ÉTS · UQÀM Université du Québec à Montréal · HEC Montréal · Polytechnique Montréal · Université de Montréal

Système hybride flou multicritère à base de connaissance pour la sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées

Moustapha Ahmed Bouh*, Diane Riopel*

Centre interuniversitaire de recherche sur les réseaux d'entreprise, la logistique et le transport (CIRRELT) et Département de mathématique et de génie industriel, École Polytechnique de Montréal, C.P. 6079, Succursale Centre-ville, Montréal, Canada H3C 3A7

Résumé. La sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées est une phase importante de la conception d'entrepôt. Pour faire le choix d'un système d'entreposage, les concepteurs ont actuellement trois options : (1) utiliser leurs propres expériences dans le domaine, (2) se fier à un vendeur d'équipements et à ses catalogues, (3) solliciter un consultant externe (Chan et al., 2001). Les quelques méthodes de sélection existantes concernent principalement la sélection des équipements de manutention. Une technologie d'entreposage est différente d'un équipement de manutention et l'ensemble forme un système d'entreposage. Cet article propose une méthode qui aide les concepteurs à mieux choisir la solution technologique convenable à leurs besoins d'entreposage. C'est un système hybride flou à base de connaissance combiné à la méthode d'aide à la décision multicritère TOPSIS. La modélisation et la résolution se font par logique floue.

Mots-clés. Système d'entreposage, logique floue, système à base de connaissance, méthode multicritère d'aide à la décision, méthode de sélection.

Remerciements. Ce projet de recherche a reçu un support financier du programme de subventions à la découverte du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). Ce support est grandement apprécié.

Results and views expressed in this publication are the sole responsibility of the authors and do not necessarily reflect those of CIRRELT.

Les résultats et opinions contenus dans cette publication ne reflètent pas nécessairement la position du CIRRELT et n'engagent pas sa responsabilité.

---

* Auteurs correspondants: Moustapha.AhmedBouh@cirrelt.ca
Diane.Riopel@cirrelt.ca

Dépôt légal – Bibliothèque et Archives nationales du Québec,
Bibliothèque et Archives Canada, 2016

© Ahmed-Bouh, Riopel et CIRRELT, 2016

1 INTRODUCTION

L'entrepôt est généralement composé de plusieurs aires : aire de réception, aire d'expédition, aire d'entreposage, et aire de préparation de commande. Chaque aire est associée à une mission spécifique. Rushton et al. (2014) indiquent que l'aire d'entreposage occupe jusqu'à 50 % de l'espace de l'entrepôt. Les auteurs indiquent aussi que les unités de charges palettisées sont les plus utilisées dans les entrepôts à hauteur de 49.2 % contre les bacs à 14.4% et les caisses à 18.6%. La conception de l'implantation de la zone d'entreposage des charges palettisées nécessite la sélection des technologies d'entreposage et des équipements de manutention. La sélection des technologies d'entreposage est une des premières étapes à franchir. Les décisions à ce niveau sont stratégiques, car elles déterminent les coûts d'investissement en achat des technologies d'entreposage et des équipements de manutention.

Afin de rédiger le cahier de charges, les ingénieurs ont besoin d'identifier les types des technologies d'entreposage et des équipements de manutention qui sont convenables au problème d'entreposage. Il s'agit de faire une sélection parmi tous les types d'équipements existants. Chaque type d'équipement appartient à une catégorie et possède différents modèles vendus par les fournisseurs. Les outils existants d'aide à la décision dans ce processus de sélection des équipements de manutention sont décrits dans la revue de littérature. La revue montre que les outils de sélection des technologies d'entreposage sont presque absents. Cet article vise à proposer un outil pour faire ce travail de sélection des systèmes d'entreposage composés de technologies d'entreposage et d'équipements de manutention. Il s'agit d'un système hybride flou à base de connaissances combiné à la méthode d'aide à la décision multicritère TOPSIS *(Technique of Order Preference by Similarity to Ideal Solution)* pour la sélection des systèmes d'entreposage. Il considère à la fois les critères qualitatifs, les critères quantitatifs et les critères de coût. Les critères sont de deux types : critères critiques et critères de performance.

En première partie, une brève revue de littérature est présentée. Les données, la modélisation et la méthodologie de sélection sont décrites. Une analyse de sensibilité est ensuite réalisée. Finalement une conclusion et une discussion sur la proposition sont faites.

2 REVUE DE LITTERATURE

Le problème de sélection des équipements de manutention et des technologies d'entreposage est un sujet qui ne possède pas jusqu'aujourd'hui une solution optimale. Les derniers travaux de recherche sur ces questions datent de l'année passée 2015. La complexité du problème fait que les réflexions continuent d'apporter des réponses. C'est une complexité qui est due au nombre important des variables de décisions qui changent selon le problème réel posé. Les auteurs des propositions précisent le domaine d'application et le cas de figure traité. Il a été possible de recenser 32 articles sur la sélection des équipements de manutention publiés durant les 30 dernières années (1985-2015) (Ahmed et Lam, 2014; Beau, 2003; Bookbinder et Gervais, 1992; Chakraborty et Banik, 2006; Chan et al., 2001; Cho et Egbelu, 2005; Chu et al., 1995; Fisher et al., 1988; Fonseca et al., 2004; Gabbert et Brown, 1989; Hadi-Vencheh et Mohamadghasemi, 2015; Hassan, 2010, 2014; Hassan et al., 1985; Karande et Chakraborty, 2012; Kim et Eom, 1997; Kulak, 2005; Malmborg et al., 1989; Maniya et Bhatt, 2011; Matson et al., 1992; Mirhosseyni et Webb, 2009; Onut et al., 2009; Park, 1996; Raman et al., 2009; Sharp et al., 2001; Telek, 2013; Trevino et al., 1991; Tuzkaya et al., 2010; Ustundag, 2014; Velury et Kennedy, 1992; Welgama et Gibson, 1995; Yaman, 2001). Les méthodes utilisées sont des modèles d'optimisation, des systèmes experts, des systèmes basés sur la connaissance, des méthodes d'aide à la décision multicritère, des systèmes hybrides, et des approches-cadres systémiques.

Les solutions purement mathématiques d'optimisation sont freinées dans la résolution du problème de sélection des équipements de manutention, car il est difficile de prendre en compte les critères qualificatifs (5 articles sur 32). Les systèmes experts sont proches du raisonnement d'expert humain et ils sont actuellement les plus utilisés dans la recherche (10 articles sur 32). Les systèmes basés sur la connaissance sont de la même famille que les systèmes experts (4 articles sur 32). Étant donné que le problème de sélection est un problème d'aide à la décision, les méthodes d'aide à la décision multicritères sont elles aussi exploitées généreusement (7 articles sur 32). Les récentes recherches ont utilisé des systèmes hybrides qui combinent les systèmes experts et les méthodes d'aide à la décision multicritères ou les modèles d'optimisation (2 articles sur 32). C'est une approche intéressante à exploiter dans la mesure où elle permet d'utiliser deux forces de résolution en même temps, c'est aussi le cas de cet article. Les approches-cadres systémiques proposent des cadres de sélection des équipements en analysant le caractère systémique du problème (2 articles sur 32). L'article de Hassan (2014) fait une évaluation des systèmes experts de sélection des équipements de manutention et l'article de Beau (2003) propose des conseils d'expert du domaine.

La majorité de ces articles traitent la sélection des équipements de manutention. Certains considèrent les technologies d'entreposage comme étant des équipements de manutention, ce qui relève d'une autre école de pensée sur la définition de la manutention. Ils considèrent l'entreposage comme étant une des opérations de manutention. Mais, la fonction entreposage est différente de la fonction manutention. Cette littérature est détaillée dans l'article (Ahmed Bouh et Riopel, 2015).
La proposition de cet article est un système de sélection des systèmes d'entreposage. Les systèmes d'entreposage sont composés de technologies d'entreposage et d'équipements de manutention. Il est plus facile de choisir d'abord une technologie d'entreposage avant l'équipement de manutention parce que la gamme de technologies d'entreposage n'est pas très vaste. Il a été possible d'identifier quinze types de systèmes d'entreposage pour les charges palettisées.

3 BASE DE DONNEES

Le système développé utilise trois types de données *(systèmes d'entreposage des charges palettisées, critères de sélection et caractéristiques des systèmes d'entreposage pour les charges palettisées en fonction des critères de sélection).* Elles sont colligées et résumées dans le rapport technique Ahmed Bouh et Riopel (2016). La littérature spécialisée du domaine d'entreposage et de manutention a été exploitée à cet effet. Elle est composée d'onze monographies, trois aide-mémoires, une encyclopédie, deux dictionnaires et différents numéros d'un magazine.

Les systèmes d'entreposage des charges palettisées sont composés de technologies d'entreposage et d'équipements de manutention. Ils sont en nombre de quinze présentés ci-dessous.

- Entreposage de masse avec chariot élévateur standard ;
- Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard ;
- Palettier à double profondeur avec chariot élévateur standard ;
- Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites ;
- Palettier à accumulation statique ouvert sur une face avec chariot élévateur standard ;
- Palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard ;
- Palettier à accumulation dynamique avec chariot élévateur standard ;
- Palettier à gravité inversée avec chariot élévateur standard ;
- Palettier satellite ouvert sur une face avec chariot élévateur standard ;
- Palettier satellite ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard ;
- Palettier mobile avec chariot élévateur standard ;
- Système d'entreposage automatisé à simple profondeur ;

- Système d'entreposage automatisé à double profondeur ;
- Système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique ;
- Système d'entreposage automatisé à accumulation statique.

Les critères de sélection utilisés sont en nombre de dix-neuf. Les treize premiers critères sont dits critiques, car ils permettent d'avoir une présélection. Ils portent sur des aspects technologiques qui restreignent leur utilisation. Les six autres critères sont des critères de performance. Ils permettent de classer par ordre de performance les systèmes présélectionnés. Leurs intitulés et leurs *valeurs* (entre parenthèses) sont présentés ci-dessous.

- Défauts de construction de paletée acceptés *(aucun défaut ou croisement médiocre)* ;
- Défauts de forme de palettée acceptés *(aucun ou bosse)* ;
- Défauts d'occupation de la surface de la palette acceptés *(aucun ou occupation au mieux)* ;
- Autres types de défauts de paletée acceptés *(retrait ou faible débord)* ;
- Défauts d'emballage des colis acceptés *(aucun)* ;
- État de palette accepté *(bon)* ;
- Méthode de rotation des stocks *(PEPS ou DEPS)* ;
- Agression des charges palettisées *(aucun, choc de dessus, pression de dessus, choc latéral et pression latérale)* ;
- Hauteur de la travée *(limitée par la stabilité de la charge palettisée, limitée par la capacité des colis, limitée par la capacité de la palette, limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé et limitée par la hauteur disponible du bâtiment)* ;
- Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées) *(valeur numérique)* ;
- Nombre de références idéalement requis *(très faible, faible, moyen, élevé, très élevé)* ;
- Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis *(très faible, faible, moyen, élevé, très élevé)* ;
- Flux des charges palettisées idéalement requis *(très faible, faible, moyen, élevé, très élevé)* ;
- Accessibilité à chaque palette *(très faible, faible, moyenne, élevée, très élevée, excellente)* ;
- Utilisation d'espace *(très faible, faible, moyenne, élevée, très élevée)* ;
- Flexibilité aux changements *(très faible, faible, moyenne, élevée, très élevée)* ;
- Coefficient d'occupation des alvéoles *(très faible, faible, moyen, élevé, très élevé)* ;
- Coût d'installation *(nul, faible, moyen, élevé, très élevé)* ;
- Vitesse d'opération *(très faible, faible, moyen, élevé, très élevé).*

4 MODELISATION

La modélisation et la résolution se font par logique floue, d'où le qualificatif flou du système.
La logique floue est fondée sur la théorie des ensembles flous développée en 1965 par le professeur Lotfi Askar Zadeh (Zadeh, 1965). L'inadaptation de la logique classique, de la théorie classique des ensembles et des calculs des probabilités à la modélisation des phénomènes réels dans toutes leurs complexités a conduit à cette idée. Sachant que le monde réel est modelé d'incertitude et d'imprécision, il serait vain d'idéaliser les modèles mathématiques dans la simplicité et la précision. La logique floue permet donc de modéliser les notions incertaines et imprécises. L'information est dite incertaine lorsqu'il existe un doute sur sa validité. Elle est dite imprécise lorsqu'il est difficile de l'exprimer clairement (Bouchon-Meunier, 2007). Concernant les données du problème étudié dans cet article, elles sont simplement imprécises.

Un ensemble flou A sous-ensemble d'un univers U est défini par une fonction d'appartenance μ_A qui a ses valeurs dans l'intervalle des réel $[0,1]$. À chaque élément $x \in U$ est associé une valeur de $\mu_A(x)$

avec $0 \leq \mu_A(x) \leq 1$. La fonction d'appartenance s'écrit alors $\mu_A : U \rightarrow [0,1]$. La forme de représentation triangulaire L-R est utilisée pour le problème (Figure 1). Elle est définie par deux fonctions L(x) et R(x), une valeur moyenne m, et deux paramètres α et β. Sa notation simplifiée est $X = (m, \alpha, \beta)_{LR}$. La Figure 2 schématise les ensembles flous du critère Accessibilité à chaque palette.

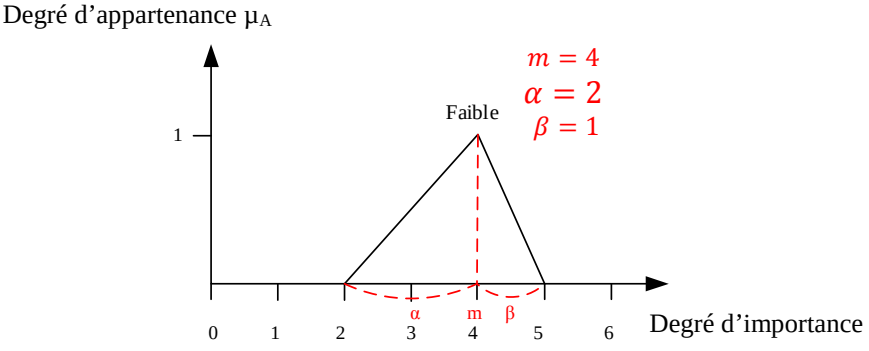

Figure 1 : Représentation triangulaire L-R

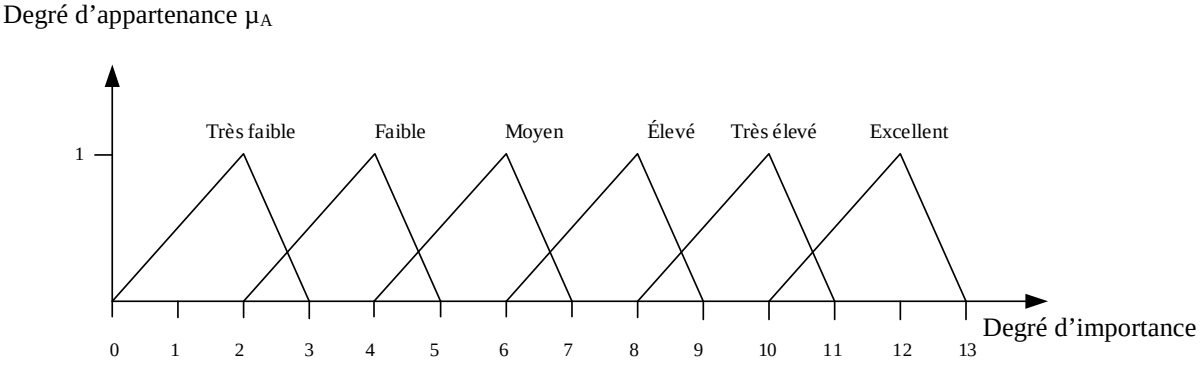

Figure 2 : Ensembles flous du critère Accessibilité à chaque palette

5 METHODOLOGIE DE SELECTION

Phase 1 :

Dans une première phase, le système propose à l'utilisateur de donner des choix sur les critères critiques. Il n'est pas obligé de spécifier toutes les valeurs à tous les critères critiques de sélection. Il y a 13 critères critiques. Selon les choix de l'utilisateur, le système sélectionne tous les systèmes qui répondent aux critères. La liste obtenue est analysée davantage dans la Phase 2 de résolution.

Phase 2 :

En utilisant les résultats de la Phase 1, le système exploite les connaissances floues pour proposer un choix ordonné de la liste de systèmes recommandés. Ce travail se fait à l'aide de la méthode multicritère TOPSIS en suivant les étapes suivantes.

Le problème de sélection peut être décrit ainsi :

- Un ensemble de *n* possibilités de systèmes d'entreposage $A = \{A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_n\}$

avec $n \in I \; et \; I = 15$;

- Un ensemble de *J = 6* critères de performance $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_6\}$;
- Un ensemble de *J =6* poids de chaque critère de sélection $P = \{P_1, P_2, \dots, P_j, \dots, P_6\}$ avec $P_j \in [1,10]$;
- Un ensemble de données floues $X = \{x_{ij} | \; i = 1,2, \dots, n \; ; j = 1,2, \dots, 6\}$ de chaque possibilité $A_i \; (i = 1,2, \dots, n)$ par rapport aux critères de performance$C_j \; (j = 1,2, \dots, 6)$.

Étape 1 :

Les données floues sont converties en nombres flous. Ces nombres flous sont des variables appelées x_{ij}. Elles sont représentées en matrice floue comme ci-dessous. Elle possède six colonnes (six critères) et n lignes (n possibilités de systèmes d'entreposage).

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{16} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{n6} \end{bmatrix}$$

Étape 2 :

Les nombres flous x_j^* et x_j^- représentent respectivement les nombres flous maximums et minimums des systèmes sur chaque critère. On applique les x_j^* aux critères de maximisation (C_1 *à C5*) et les x_j^- au critère de minimisation C_6. Ils sont notés :

$$x_j^* = \left(m_j^*, \alpha_j^*, \beta_j^*\right)_{LR} \qquad (1)$$
$$x_j^- = \left(m_j^-, \alpha_j^-, \beta_j^-\right)_{LR} \qquad (2)$$

Les nombres flous sont positives :
$x_{ij} > 0, x_j^* > 0, x_j^- > 0.$

Les nombres flous x_{ij} son normalisées en y_{ij} en utilisant les arithmétiques de division entre deux nombres flous de type L-R.

$$y_{ij} = \begin{cases} \dfrac{x_{ij}}{x_j^*} = \dfrac{\left(m_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}\right)_{LR}}{\left(m_j^*, \alpha_j^*, \beta_j^*\right)_{LR}} \\ \dfrac{x_j^-}{x_{ij}} = \dfrac{\left(m_j^-, \alpha_j^-, \beta_j^-\right)_{LR}}{\left(m_{ij}, \alpha_{ij}, \beta_{ij}\right)_{LR}} \end{cases}$$

$$= \begin{cases} \dfrac{x_{ij}}{x_j^*} = \left(\dfrac{m_{ij}}{m_j^*}, \dfrac{m_{ij}\beta_j^* + m_j^*\alpha_{ij}}{{m_j^*}^2}, \dfrac{m_{ij}\alpha_j^* + m_j^*\beta_{ij}}{{m_j^*}^2}\right)_{LR} & (3) \\ \dfrac{x_j^-}{x_{ij}} = \left(\dfrac{m_j^-}{m_{ij}}, \dfrac{m_j^-\beta_{ij} + m_{ij}\alpha_j^-}{{m_{ij}}^2}, \dfrac{m_j^-\alpha_{ij} + m_{ij}\beta_j^-}{{m_{ij}}^2}\right)_{LR} & (4) \end{cases}$$

Étape 3 :

Les nombres flous normalisées y_{ij} sont ensuite pondérées avec les poids $p_j > 0$ pour trouver les nombres flous normalisées pondérées z_{ij}.

$$z_{ij} = p_j \otimes y_{ij} = \begin{cases} \left(p_j \frac{m_{ij}}{m_j^*}, p_j \frac{m_{ij}\beta_j^* + m_j^* \alpha_{ij}}{{m_j^*}^2}, p_j \frac{m_{ij}\alpha_j^* + m_j^* \beta_{ij}}{{m_j^*}^2} \right)_{LR} & (5) \\ \left(p_j \frac{m_j^-}{m_{ij}}, p_j \frac{m_j^- \beta_{ij} + m_{ij}\alpha_j^-}{{m_{ij}}^2}, p_j \frac{m_j^- \alpha_{ij} + m_{ij}\beta_j^-}{{m_{ij}}^2} \right)_{LR} & (6) \end{cases}$$

En multipliant par les poids des critères de sélection, la matrice floue normalisée pondérée devient :

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \dots & z_{16} \\ z_{21} & z_{22} & \dots & z_{26} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_{n1} & z_{n2} & \dots & z_{n6} \end{bmatrix} \qquad n \in I$$

Étape 4 :

On détermine la solution idéale positive *A**, c'est-à-dire la technologie d'entreposage qui possède les plus grandes valeurs z_{ij} à chaque critère. Elle est obtenue par :

$$A^* = \left\{ \left(\max_i z_{ij} | j \in J \right) \right\}_{i=1,2,\dots,n\ ; j=1,2,\dots,6} \quad (7)$$

On détermine la solution idéale négative A^-, c'est-à-dire la technologie d'entreposage qui possède les plus petites valeurs z_{ij} à chaque critère est obtenue par :

$$A^- = \left\{ \left(\min_i z_{ij} | j \in J \right) \right\}_{i=1,2,\dots,n\ ; j=1,2,\dots,6} \quad (8)$$

Étape 5 :

On calcule la distance entre chaque possibilité de technologie d'entreposage et la solution idéale A^*. Elle est obtenue par :

$$D_i^* = \sum_{j=1}^{6} d\left(z_{ij}, z_j^*\right) \quad i = 1, \dots, n \ ; \ n \in I \quad (9)$$

Avec

$$d\left(z_{ij}, z_j^*\right) = \sqrt{1/3\left[(m_{ij} - m_j^*)^2 + (\alpha_{ij} - \alpha_j^*)^2 + (\beta_{ij} - \beta_j^*)^2\right]} \quad (10)$$

On calcule la distance entre chaque possibilité de technologie d'entreposage et la solution idéale négative A^- . Elle est obtenue par :

$$D_i^- = \sum_{j=1}^{6} d\left(z_{ij}, z_j^-\right) \quad i = 1, 2, \dots, n \ ; \ n \in I \quad (11)$$

Étape 6 :

On calcule les coefficients de proximité relative pour chaque possibilité. Il s'agit de déterminer les degrés de proximité de chaque possibilité à la solution idéale. Ils sont obtenus par :

$$CPR_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^* + D_i^-} \qquad i = 1, 2, \dots, n \ ; \ n \in I \quad (12)$$

Étape 7 :
On classe les possibilités par ordre décroissant des coefficients de proximité relative CPR_i^*. Ces coefficients représentent le degré de performance de chaque possibilité. La technologie d'entreposage qui convient le plus au problème est donc classée première et celle qui lui convient moins est classée dernière. Le système proposera trois technologies en liste ordonnée.

6 ÉTUDE DE CAS

Une mise en pratique de la méthode est importante pour justifier les résultats. Le problème présenté dans cette partie est un cas théorique. Il a pour but de démontrer que la méthode développée est fonctionnelle et pourrait par conséquent réussir un test réel de l'industrie. Une analyse de sensibilité de la méthode est faite dans ce sens. Elle permet d'évaluer l'impact que pourraient avoir les changements initiaux sur les résultats obtenus.
Dans un premier temps, l'utilisateur est invité à répondre aux questions posées par le système. Les réponses fournies sont reportées de la manière suivante. Les questions sont notées Q et les réponses R.

Q1 : *Quelle est la méthode de rotation des stocks que vous préconisez ? PEPS / DEPS.*
R1 : PEPS.
Q2 : *Quels sont les défauts de forme de palettée acceptés ? Aucun / Bosse.*
R2 : Bosse.
Q3 : *Quels sont les défauts de construction de paletée ? Aucun / Croisement médiocre.*
R3 : Croisement médiocre.
Q4 : *Quelle est la profondeur privilégiée de la travée (en nombre de charges palettisées) ?*
R4 : 1.

En compilant ces réponses, le système détermine les technologies qui répondent aux choix. Notamment, les systèmes d'entreposage pour ce cas sont :
- A_1 : Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard ;
- A_2 : Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites ;
- A_3 : Palettier mobile avec chariot élévateur standard ;
- A_4 : Système d'entreposage automatisé simple profondeur ;

Selon une interface conviviale, l'utilisateur donne des poids en nombre entier compris entre 1 et 10 à chacun des six critères de sélection suivants :
- C_1 : Accessibilité à chaque palette ;
- C_2 : Utilisation d'espace ;
- C_3 : Flexibilité aux changements ;
- C_4 : Coefficient d'occupation des alvéoles ;
- C_5 : Vitesse d'opération ;
- C_6 : Coût d'installation.

Pour ce cas, tous les poids sont égaux à 1. Une analyse de sensibilité qui évalue les changements en fonction des poids est présentée par la suite.

En progressant sur la Phase 2 de la résolution du problème, il est à noter que le nombre de possibilités de systèmes d'entreposage présélectionnés pour ce problème sont $n = 4$. Elles doivent être classées par ordre d'importance de performance.

Les étapes 1, 2 et 3 calculent respectivement la Matrice floue du Tableau 2, la Matrice floue normalisée du Tableau 3 et la Matrice floue normalisée pondérée du Tableau 4. Ces matrices requièrent la détermination selon les équations (1) et (2). Le calcul de la normalisation des nombres flous se fait en utilisant les équations (3) et (4). Les nombres flous normalisés pondérés se calculent selon les équations (5) et (6). Les valeurs des nombres ne changent pas pour ce cas-ci puisque les poids sont égaux à 1. À l'étape 4, on détermine selon les équations (7) et (8) les solutions idéales positive et négative $A^* et\ A^-$. Ces solutions permettent de calculer les distances $D_i^*\ et\ D_i^-$ qui séparent entre elles et chaque possibilité A_i. Les équations (9), (10) et (11) sont utilisées à cet effet. Les valeurs sont présentées dans le Tableau 5.

Tableau 1: Matrice floue du cas étudié

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	12.00, 2.00, 1.00	4.00, 2.00, 1.00	8.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	8.00, 2.00, 1.00	4.00, 2.00, 1.00
A_2	12.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00	8.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00
A_3	12.00, 2.00, 1.00	8.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	4.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00
A_4	12.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00	2.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	10.00, 2.00, 1.00	6.00, 2.00, 1.00

Légende :

	x_j^*
	x_j^-

Tableau 2: Matrice floue normalisée du cas étudié

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	1.00, 0.25, 0.25	0.50, 0.31, 0.25	1.00, 0.38, 0.38	1.00, 0.30, 0.30	0.80, 0.28, 0.26	1.00, 0.75, 0.75
A_2	1.00, 0.25, 0.25	0.75, 0.34, 0.31	1.00, 0.38, 0.38	1.00, 0.30, 0.30	1.00, 0.30, 0.30	0.67, 0.44, 0.39
A_3	1.00, 0.25, 0.25	1.00, 0.38, 0.38	0.75, 0.34, 0.31	1.00, 0.30, 0.30	0.40, 0.24, 0.18	0.40, 0.24, 0.18
A_4	1.00, 0.25, 0.25	0.75, 0.34, 0.31	0.25, 0.28, 0.19	1.00, 0.30, 0.30	1.00, 0.30, 0.30	0.67, 0.44, 0.39

Tableau 3: Matrice floue normalisée pondérée du cas étudié

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	1.00, 0.25, 0.25	0.50, 0.31, 0.25	1.00, 0.38, 0.38	1.00, 0.30, 0.30	0.80, 0.28, 0.26	1.00, 0.75, 0.75
A_2	1.00, 0.25, 0.25	0.75, 0.34, 0.31	1.00, 0.38, 0.38	1.00, 0.30, 0.30	1.00, 0.30, 0.30	0.67, 0.44, 0.39
A_3	1.00, 0.25, 0.25	1.00, 0.38, 0.38	0.75, 0.34, 0.31	1.00, 0.30, 0.30	0.40, 0.24, 0.18	0.40, 0.24, 0.18
A_4	1.00, 0.25, 0.25	0.75, 0.34, 0.31	0.25, 0.28, 0.19	1.00, 0.30, 0.30	1.00, 0.30, 0.30	0.67, 0.44, 0.39

Légende :

	z_j^*
	z_j^-

Tableau 4: Distances et coefficients de proximité relative

Possibilité	D_i^*	D_i^-	CPR_i	Classement
A_1	0.42	1.25	0.749	1
A_2	0.48	1.18	0.710	2
A_3	1.07	0.60	0.360	4
A_4	0.93	0.73	0.440	3

Les coefficients de proximité relative des possibilités par rapport à la solution idéale sont calculés avec l'équation (12) et les valeurs sont dans le même Tableau 5. Ceci permet de classer les quatre

possibilités de systèmes d'entreposage en ordre décroissant des performances. Le système le plus performant vient en premier et la dernière sera celle qui conviendrait le moins au problème étudié. Le classement obtenu est $A_1 > A_2 > A_4 > A_3$ puisque $0.749 > 0.710 > 0.440 > 0.360$. Les poids attribués à chacun des six critères de sélection ont leurs impacts dans la proposition. Il est donc recommandé à l'utilisateur de considérer en premier plan le système d'entrepose A_1 qui est un palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard.

En examinant les coefficients de proximité relative des deux possibilités $A_3 = 0.360$ et $A_4 = 0.440$, on remarque ces deux valeurs sont proches. Ce très faible écart a engendré une différence majeure reflétée sur le classement (A_4 soit classée devant A_3). D'après ce constat, ainsi que par la rigueur de l'approche scientifique utilisée pour le développement du système hybride flou multicritère à base de connaissance pour la sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées, une analyse de sensibilité doit être réalisée.

7 ANALYSE DE SENSIBILITE

L'analyse de sensibilité porte sur l'évaluation des changements susceptibles lorsque certaines modifications sont enregistrées en entrée du système. Elle porte notamment sur l'impact des choix des poids des critères de sélection par l'utilisateur.

Le système est utilisable dans tous les problèmes de sélection de systèmes d'entreposage de charges palettisées. L'utilisateur précise au système les spécificités de son problème d'entreposage. La précision est faite par l'attribution des poids (entre 1 et 10) aux critères de performance qui sont en nombre de six. Dépendamment de ses moyens et contraintes, l'utilisateur spécifie les caractéristiques auxquelles il accorde plus d'importance. Parmi les six critères de performance, cinq d'entre eux sont à maximiser et le critère de coût est à minimiser.

Dans l'étude de cas réalisée plus haut, les poids ont été tous mis à 1, ce sont d'ailleurs les valeurs par défaut du système. Lorsque l'utilisateur ne les change pas, le système garde des valeurs égales à 1 pour les poids inchangés. Dans cette partie d'analyse de sensibilité, la question suivante a été posée : qu'est-ce qui arriverait à la proposition faite par le système si les poids prenaient des valeurs autres que 1 ? Afin de répondre à cette question, neuf autres cas ont été étudiés. En somme, une évaluation sur dix cas est réalisée. Ces derniers démarrent avec les possibilités de systèmes d'entreposage qui sont suggérées par la présélection de la Phase 1. Ces possibilités sont les mêmes que l'étude de cas détaillé en exemple dans cet article. Concernant la Phase 2 de résolution, différents poids de 1 à 10 ont été attribués aux dix cas. Les valeurs des poids sont présentées dans le Tableau 6.

Tableau 5: Poids des dix cas

Poids (P_j)	***Cas_1***	***Cas_2***	***Cas_3***	***Cas_4***	***Cas_5***	***Cas_6***	***Cas_7***	***Cas_8***	***Cas_9***	***Cas_{10}***
P_1	1	2	8	1	5	10	10	5	10	10
P_2	1	1	2	9	2	2	1	1	10	10
P_3	1	5	3	3	1	2	1	2	2	2
P_4	1	1	1	8	7	1	1	3	3	10
P_5	1	5	3	1	5	1	1	1	1	10
P_6	1	1	1	1	5	10	5	1	1	1

En réalisant les matrices et effectuant les calculs de la méthode développée dans l'article, le système obtient différents résultats pour les dix cas. Les coefficients de performance dits de proximité relative sont tels que présentés par le Tableau 7. En transformant le Tableau 7 en Tableau 8 par la conversion des chiffres en ordre de classement, on remarque que les positions des possibilités changent en fonction des poids des critères de performance indiqués.

D'abord, dans cinq cas sur dix, la possibilité A_1 se classe première. Cela signifie qu'elle est la meilleure solution pour le problème à 50% des cas. La possibilité A_1 est classée deux fois en deuxième choix, deux fois en troisième choix, et une fois en quatrième choix. Elle peut être ainsi considérée le choix approprié au problème posé, peu importe le poids des critères de performance.
Deuxième remarque, la dernière position est occupée généralement par les solutions A_3 à 70% des cas, et par A_4 à 20% des cas. Autrement dit, la dernière possibilité A_3 ne conviendrait pas idéalement au problème. Ce résultat signifie que si l'utilisateur veut éliminer une des quatre solutions proposées par le système, la possibilité A_3 est le meilleur candidat à 70%.

On remarque aussi que la solution A_4 ne vient jamais et presque jamais en première position et deuxième position respectivement. Elle est classée deuxième une seule fois dans le Cas_{10}. Dans 70% des cas, elle est classée en troisième position. Son médiocre classement pourrait appuyer la décision d'élimination d'une autre possibilité.

Les deux meilleures solutions sont les possibilités A_1 *et* A_2.

Tableau 6: Coefficients de proximité relative des dix cas

Possibilité	Cas_1	Cas_2	Cas_3	Cas_4	Cas_5	Cas_6	Cas_7	Cas_8	Cas_9	Cas_{10}
A_1	0.749	0.817	0.733	0.433	0.788	0.904	0.893	0.802	0.353	0.478
A_2	0.710	0.901	0.823	0.661	0.650	0.513	0.535	0.771	0.619	0.771
A_3	0.360	0.368	0.419	0.725	0.160	0.161	0.153	0.425	0.747	0.449
A_4	0.440	0.441	0.446	0.389	0.571	0.393	0.420	0.346	0.432	0.659

Tableau 7: Classement des possibilités des dix cas

Classement	Cas_1	Cas_2	Cas_3	Cas_4	Cas_5	Cas_6	Cas_7	Cas_8	Cas_9	Cas_{10}
1	A_1	A_2	A_2	A_3	A_1	A_1	A_1	A_1	A_3	A_2
2	A_2	A_1	A_1	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_2	A_4
3	A_4	A_4	A_4	A_1	A_4	A_4	A_4	A_3	A_4	A_1
4	A_3	A_3	A_3	A_4	A_3	A_3	A_3	A_4	A_1	A_3

Cette analyse montre que l'attribution des poids aux critères de performance est déterminante. Une possibilité peut occuper une meilleure position par l'obtention de grands poids aux quelques critères où elle est plus valorisée que les autres possibilités. Cela engendrera que d'autres possibilités soient écartées de la proposition à faire. L'utilisateur doit ainsi tenir compte de cet aspect et bien réaliser l'impact du choix des poids.

8 CONCLUSION ET DISCUSSION

La revue de littérature a indiqué que la majorité des articles de recherche confondent les technologies d'entreposage avec les équipements de manutention. Ils considèrent l'entreposage comme étant une des opérations de manutention. Mais, la fonction entreposage est différente de la fonction manutention.
Cet article est le premier qui traite le problème de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées composés par de technologies d'entreposage et d'équipements de manutention. La méthode développée pour la sélection des systèmes d'entreposage est un système hybride flou multicritère à base de connaissance. La logique floue et la méthode d'aide à la décision multicritère TOPSIS sont exploitées.
Le système sélectionne les meilleures solutions et les classe par ordre de performance. Une analyse de sensibilité détaillée a été faite afin d'évaluer les changements engendrés par la variation des poids

des critères de performance. Il est générique et n'est pas limité à un contexte d'entreprise donnée. Il est destiné à être utilisé par tous les concepteurs dans la phase de sélection des technologies d'entreposage pour les charges palettisées lors de la conception d'entrepôt.

Une validation plus large du système reste à poursuivre dans les travaux à venir. Les spécialistes du domaine seraient plus aptes à évaluer et porter un jugement sur le résultat de la méthode développée. L'automatisation du système en programme informatique fait partie des travaux à venir.

9 REMERCIEMENTS

Ce projet de recherche a reçu un support financier du programme de subventions à la découverte du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG). Ce support est grandement apprécié.

10 REFERENCES

Ahmed, A., et Lam, S. S. 2014. *Material Handling Equipment Selection Using Multi-Attribute Utility Theory and Monte Carlo Simulation.* Communication présentée à 2014 Industrial and Systems Engineering Research Conference, Toronto, Canada.

Ahmed Bouh, M., et Riopel, D. 2015. *Sélection des équipements de manutention: revue de littérature.* Acte du 11e Congrès international de génie industriel-CIGI2015, Québec p. 10.

Ahmed Bouh, M., et Riopel, D. 2016. *Fiches techniques des systèmes d'entreposage des charges palettisées* (Rapport no CIRRELT-2016-21). Tiré de https://www.cirrelt.ca/?Page=LASTDOCUMENTS

Beau, M. (2003). Creative storage equipment selection and layout design. *Material Handling Management*.

Bookbinder, J. H., et Gervais, D. 1992. Material-handling equipment selection via an expert system. *Journal of Business Logistics, 13*(1), p. 149-172.

Bouchon-Meunier, B. 2007. *La logique floue* (4e éd.). Paris: Presses universitaires de France.

Chakraborty, S., et Banik, D. 2006. Design of a material handling equipment selection model using analytic hierarchy process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 28*(11-12), p. 1237-1245.

Chan, F. T. S., Ip, R. W. L., et Lau, H. 2001. Integration of expert system with analytic hierarchy process for the design of material handling equipment selection system. *Journal of Materials Processing Technology, 116*(2–3), p. 137-145.

Cho, C., et Egbelu, P. J. 2005. Design of a web-based integrated material handling system for manufacturing applications. *International Journal of Production Research, 43*(2), p. 375-403.

Chu, H. K., Egbelu, P. J., et Wu, C.-T. 1995. ADVISOR: A computer-aided material handling equipment selection system. *International Journal of Production Research, 33*(12), p. 3311-3329.

Fisher, E. L., Farber, J. B., et Kay, M. G. 1988. MATHES: An expert system for material handling equipment selection. *Engineering Costs and Production Economics, 14*(4), p. 297-310.

Fonseca, D. J., Uppal, G., et Greene, T. J. 2004. A knowledge-based system for conveyor equipment selection. *Expert Systems with Applications, 26*(4), p. 615-623.

Gabbert, P., et Brown, D. E. 1989. Knowledge-based computer-aided design of materials handling systems. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 19*(2), p. 188-196.

Hadi-Vencheh, A., et Mohamadghasemi, A. 2015. A new hybrid fuzzy multi-criteria decision making model for solving the material handling equipment selection problem. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 28*(5), p. 534-550.

Hassan, M. M. D. 2010. A framework for selection of material handling equipment in manufacturing and logistics facilities. *Journal of Manufacturing Technology Management, 21*(2), p. 246-268.

Hassan, M. M. D. 2014. An evaluation of input and output of expert systems for selection of material handling equipment. *Journal of Manufacturing Technology Management, 25*(7), p. 1049-1067.

Hassan, M. M. D., Hogg, G. L., et Smith, D. R. 1985. A construction algorithm for the selection and assignment of materials handling equipment. *International Journal of Production Research, 23*(2), p. 381-392.

Karande, P., et Chakraborty, S. 2012. Material handling equipment selection using weighted utility additive theory. *Journal of Industrial Engineering, 2013*.

Kim, K. S., et Eom, J. K. 1997. An expert system for selection of material handling and storage systems. *International Journal of Industrial Engineering, 4*(2), p. 81-89.

Kulak, O. 2005. A decision support system for fuzzy multi-attribute selection of material handling equipments. *Expert Systems with Applications, 29*(2), p. 310-319.

Malmborg, C. J., Krishnakumar, B., Simons, G. R., et Agee, M. H. 1989. EXIT: a PC-based expert system for industrial truck selection. *International Journal of Production Research, 27*(6), p. 927-941.

Maniya, K. D., et Bhatt, M. G. 2011. A multi-attribute selection of automated guided vehicle using the AHP/M-GRA technique. *International Journal of Production Research, 49*(20), p. 6124.

Matson, J. O., Mellichamph, J. M., et Swaminathan, S. R. 1992. EXCITE: Expert consultant for in-plant transportation equipment. *International Journal of Production Research, 30*(8), p. 1969-1983.

Mirhosseyni, S. H. L., et Webb, P. 2009. A hybrid fuzzy knowledge-based expert system and genetic algorithm for efficient selection and assignment of material handling equipment. *Expert Systems with Applications, 36*(9), p. 11875-11887.

Onut, S., Kara, S. S., et Mert, S. 2009. Selecting the suitable material handling equipment in the presence of vagueness. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44*(7-8), p. 818-828.

Park, Y.-B. 1996. ICMESE: Intelligent consultant system for material handling equipment selection and evaluation. *Journal of Manufacturing Systems, 15*(5), p. 325-333.

Raman, D., Nagalingam, S. V., Gurd, B. W., et Lin, G. C. I. 2009. Quantity of material handling equipment—A queuing theory based approach. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 25*(2), p. 348-357.

Rushton, A., Croucher, P., et Baker, P. 2014. *The Handbook of Logistics and Distribution Management: Understanding the Supply Chain* (5e éd.). London, UK: Kogan Page.

Sharp, G., Wan, Y.-T., McGinnis, L. F., Goetschalckx, M., Bodner, D., Govindaraj, T., Ram, B., et Everette, J. 2001. *A structured approach to material handling system selection and specification for manufacturing*. Communication présentée à Industrial Engineering Research Conference.

Telek, P. 2013. Equipment preselection for integrated design of materials handling systems. *Advanced Logistics Systems, 7*(2), p. 57-66.

Trevino, J., Hurley, B. J., Clincy, V., et Jang, S. C. 1991. Storage and industrial truck selection expert system (SITSES). *International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 4*(3), p. 187-194.

Tuzkaya, G., Gülsün, B., Kahraman, C., et Özgen, D. 2010. An integrated fuzzy multi-criteria decision making methodology for material handling equipment selection problem and an application. *Expert Systems with Applications, 37*(4), p. 2853-2863.

Ustundag, A. 2014. Selection and Assignment of Material Handling Devices Under Uncertainty. Dans C. Kahraman & B. Öztayşi (Édit.), *Supply Chain Management Under Fuzziness* (vol. 313, p. 553-564): Springer Berlin Heidelberg.

Velury, J., et Kennedy, W. J. 1992. A systematic procedure for the selection of bulk material handling equipment. *International Journal of Production Economics, 27*(3), p. 233-240.

Welgama, P. S., et Gibson, P. R. 1995. A hybrid knowledge based/optimization system for automated selection of materials handling system. *Computers & Industrial Engineering, 28*(2), p. 205-217.

Yaman, R. 2001. A knowledge-based approach for selection of material handling equipment and material handling system pre-design. *Turkish Journal of Engineering And Environmental Sciences, 25*(4), p. 267-278.

Zadeh, L. A. 1965. Fuzzy sets. *Information and control, 8*(3), p. 338-353.