CIRRELT

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

Interuniversity Research Centre
on Enterprise Networks, Logistics and Transportation

# Guide de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées caractérisés en langage flou

**Moustapha Ahmed Bouh**
**Diane Riopel**

**Novembre 2017**

**CIRRELT-2017-66**

**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 · Université Concordia · ÉTS · UQÀM · HEC Montréal · Polytechnique Montréal · Université de Montréal

# Guide de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées caractérisés en langage flou

**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.** L'entreposage est un maillon essentiel de la chaine d'entreposage pour sa mission et ses fonctions. La maitrise des coûts logistiques passe par la maitrise des coûts d'entreposage et de manutention lors de l'investissement des équipements technologiques. Il est exprimé dans la littérature du domaine qu'il y a un besoin de guide de sélection des équipements d'entreposage et de manutention. Il existe plusieurs types d'équipements d'entreposage et de manutention dépendamment de l'unité de charge utilisée. Ce travail propose un guide de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Nous désignons par système d'entreposage un équipement d'entreposage couplé à un équipement de manutention. Une documentation exhaustive a été réalisée. Les données collectées ont permis d'élaborer et de publier des fiches techniques caractérisant quinze systèmes d'entreposage des charges palettisées. La caractérisation a été faite en langage flou. La synthèse des fiches techniques est exploitée dans cet article comme base de données. Un arbre de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées justifié mathématiquement a été élaboré par extraction d'information de cette base de données. L'algorithme C4.5 de Machine Learning a été implanté pour réaliser l'extraction d'information. Ce travail a été réalisé avec la collaboration d'un industriel d'équipements d'entreposage.

**Mots-clés**. Système d'entreposage, charge palettisée, langage flou, algorithme C4.5, arbre 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, 2017

© Ahmed-Bouh, Riopel et CIRRELT, 2017

# 1. Introduction

L'entreposage est une activité nécessaire tout au long du cycle de vie d'un produit. Le produit est entreposé multiples fois dans la chaine d'approvisionnement à titre de matière première avant d'être livré à une entreprise de production. Il est ensuite entreposé durant le processus de production sous différentes formes (pièce, sous-ensemble, produit fini). Il est finalement entreposé en tant que produit fini chez les intervenants de distribution (grossiste, détaillant, tiers parti) avant d'être livré chez le consommateur. Le produit séjourne durant une bonne partie de sa vie dans les entrepôts. Manley et al. (2008) indiquent que le coût d'entreposage et de manutention est entre 30 à 60% du coût du produit. Pour réduire les coûts logistiques, il est nécessaire de maîtriser les coûts de l'entrepôt et prendre les bonnes décisions lors de l'investissement sur les équipements d'entrepôt. Gu et al. (2007) expliquent qu'il y a un manque de guide de sélection des équipements d'entrepôt.

Sachant qu'il existe plusieurs types d'équipements d'entreposage et de manutention selon l'unité de charge, cet article propose un guide de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Une charge palettisée est un « ensemble qui est constitué par une palette, ou un autre support apparenté, et la paletée qu'elle supporte » (Riopel et Croteau, 2013). À la différence des méthodologies de sélection des équipements d'entreposage et de manutention de la littérature, un arbre de sélection des systèmes d'entreposage justifié mathématiquement a été élaboré. Pour ce faire, nous avons implanté un algorithme de classification appartenant à la famille des algorithmes de l'intelligence artificielle de type Machine Learning, le C4.5 de Quinlan (1993).

La suite de l'article est structurée comme suit. La deuxième section présente la revue de littérature du sujet abordé avec les limites des méthodologies existantes. La troisième section présente les différents systèmes d'entreposage des charges palettisées et les sources des données. La quatrième section explique les différents critères de caractérisation des systèmes d'entreposage des charges palettisées. La section cinq présente la caractérisation des systèmes à l'aide du langage flou. La sixième section aborde la caractérisation des systèmes en langage vulgaire (au sens de Kaufmann (1973) et Tong-Tong (1995) i.e. langage non flou) et les relations avec le langage flou. La septième section présente le processus d'extraction d'information à partir du tableau de caractérisation. La huitième section présente l'implantation du C4.5 (Quinlan, 1993) et l'arbre de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées obtenu. La neuvième section présente le guide de sélection proposé par la lecture de l'arbre de sélection. La dixième section propose une discussion sur cet arbre de sélection proposé. Finalement, la onzième section conclut le travail et indique des pistes de recherche à venir.

# 2. Revue de littérature

La revue de littérature complète sur la sélection des équipements d'entreposage et de manutention est publiée dans (Ahmed Bouh et Riopel, 2015a, 2015b, 2016b). Elle est gardée à jour et le plus récent article recensé date de 2015. Elle regroupe les recherches des 32 dernières années (1985-2017). Une trentaine d'articles sur les méthodes de sélection des équipements d'entreposage et de manutention ont été identifiés. Le Tableau 1 les présente regroupés selon les méthodes de sélection.

**Tableau 1: Méthodes de sélection des équipements d'entreposage et de manutention**

| Méthode de sélection | Auteurs (date) |
|---|---|
| Modèles d'optimisation | Hassan et al. (1985)<br>Velury et Kennedy (1992)<br>Telek (2013)<br>Ustundag (2014) |
| Systèmes experts | Fisher et al. (1988)<br>Malmborg et al. (1989)<br>Trevino et al. (1991)<br>Matson et al. (1992)<br>Kim et Eom (1997)<br>Chan et al. (2001)<br>Fonseca et al. (2004)<br>Kulak (2005) |
| Systèmes hybrides | Bookbinder et Gervais (1992)<br>Welgama et Gibson (1995)<br>Park (1996)<br>Mirhosseyni et Webb (2009) |
| Systèmes basés sur la connaissance | Gabbert et Brown (1989)<br>Chu et al. (1995)<br>Yaman (2001)<br>Cho et Egbelu (2005) |
| Méthodes d'aide à la décision multicritères | Chakraborty et Banik (2006)<br>Onut et al. (2009)<br>Tuzkaya et al. (2010)<br>Maniya et Bhatt (2011)<br>Karande et Chakraborty (2013)<br>Ahmed et Lam (2014)<br>Hadi-Vencheh et Mohamadghasemi (2015) |
| Approches-cadres systémiques | Sharp et al. (2001)<br>Hassan (2010) |

Les premières méthodes de sélection des équipements de manutention et d'entreposage ont été les modèles d'optimisation. Presque tous les chercheurs sont convaincus que plusieurs obstacles concernant le problème de sélection des équipements de manutention compliquent la tâche de ces solutions mathématiques. Entre autres, les caractéristiques des équipements sont difficiles à quantifier et à inclure dans un modèle, car elles sont qualitatives. Les données requises pour résoudre le problème, comme les temps de mouvement et les coûts d'opération, sont souvent estimées, car elles sont difficiles à obtenir (Hassan et al., 1985). Après les algorithmes mathématiques, des systèmes experts et des systèmes basés sur la connaissance sont proposés. Les solutions avec les systèmes experts donnent des réponses isolées de type d'équipement de manutention et ne sont pas systémiques. Elles ne tiennent pas compte de tout le système de manutention. La plupart des systèmes s'arrêtent aux choix des types d'équipements. Les systèmes experts ont fait l'objet de plus de publications en nombre de huit articles sur trente recensés dans notre revue littérature. Des méthodes d'aide à la décision multicritères (MADM) sont aussi explorées par les chercheurs et sont également pertinentes pour ce problème. Plus pertinents sont les systèmes hybrides qui combinent des systèmes experts ou des systèmes basés sur la connaissance avec les MADM ou la modélisation mathématique. C'est une approche intéressante qui permet d'utiliser les deux forces. Par exemple, le système expert pourrait permettre de connaître plusieurs types d'équipements de manutention appropriés et l'approche MADM les classerait ou évaluerait les modèles d'équipements. Les recherches sur la sélection des équipements pour des cas d'entrepôt sont presque totalement absentes. La plupart des articles reflètent les cas d'usine.

# 3. Systèmes d'entreposage des charges palettisées

La littérature spécialisée du domaine d'entreposage et de manutention a été exploitée afin d'identifier et récolter les connaissances sur les systèmes d'entreposage destinées aux charges palettisées. Elle est composée des documents suivants.

- Aide-mémoires (Anthony, 2008; Bagadia, 2008; Klein et al., 2008; Kulwiec, 2008a, 2008b; Manley et al., 2008; Muther et Webster, 2008; Nolan, 2008; Promisel, 2008; Tompkins et Smith, 1998; Tompkins et al., 2008) ;
- Monographies (Baker et The Chartered Institute of Logistics and Transport, 2010; Bartholdi et Hackman, 2014; Colloc, 1977; Langevin et Riopel, 2005; Mulcahy, 1999; Muther, 1973; Riopel, 2014, 2015; Roux, 2011; Roux et Liu, 2010; Rushton et al., 2014; Tompkins et al., 2010) ;
- Encyclopédie de la manutention (Syndicat des industries de matériels de manutention, 1983a, 1983b) ;
- Dictionnaires spécialisés (Institute of Industrial Engineers, 2000; Riopel et Croteau, 2013) ;
- Guides techniques (Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST) et Association sectorielle transport entreposage (ASTE), 2009; Institut national de recherche et de sécurité (INRS) et Syndicat des industries de matériels de manutention, 2001) ;
- Différents numéros du magazine Modern Materials Handling ;
- Différents catalogues de constructeurs des équipements d'entreposage.

Quatorze types d'équipements d'entreposage destinés aux charges palettisées ont été répertoriés. Ils sont constitués principalement d'un équipement appelé « palettier ». C'est une structure ou un assemblage, entre autres, d'échelles et de lisses, destiné à recevoir des charges généralement palettisées (Riopel et Croteau, 2013). Différents équipements de manutention destinés aux charges palettisées existent et nous les avons regroupés sous trois groupes. Le premier groupe est composé par le chariot élévateur dit standard. Il est qualifié de standard pour désigner tous les types de chariots élévateurs conçus pour manœuvrer dans les allées de service régulières à la différence des allées étroites (chariot élévateur à fourche à contrepoids, chariot élévateur à fourche à mât rétractable, chariot élévateur à fourche à prise frontale, chariot élévateur à fourche à prise latérale, chariot élévateur à fourche à prise bilatérale, chariot élévateur à prise latérale multidirectionnel, chariot à fourche entre longerons, chariot élévateur à flèche télescopique, chariot élévateur à châssis articulé, chariot élévateur à tablier porte-fourche rétractable, chariot élévateur à cabine rotative). Le deuxième groupe est composé par le chariot élévateur pour allées étroites et le troisième groupe est composé par le transtockeur automatique (Ahmed Bouh et Riopel, 2016a).

En couplant les équipements d'entreposage aux équipements de manutention et en ajoutant l'entreposage de masse, il est possible de constituer quinze systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées. Évidemment, l'entreposage de masse est réalisé à même le sol sans équipements d'entreposage. Le terme système est employé pour spécifier le couplage entre entreposage et manutention. Les systèmes d'entreposage automatisés sont déjà conçus avec des transtockeurs. Les quinze différents systèmes sont listés dans le Tableau 2.

**Tableau 2: Systèmes d'entreposage des charges palettisées**

| Identifiant | Système d'entreposage des charges palettisées |
|---|---|
| S1 | Entreposage de masse avec chariot élévateur standard |
| S2 | Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard |
| S3 | Palettier à double profondeur avec chariot élévateur standard |
| S4 | Palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites |
| S5 | Palettier à accumulation statique ouvert sur une face avec chariot élévateur standard |
| S6 | Palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard |
| S7 | Palettier à accumulation dynamique avec chariot élévateur standard |
| S8 | Palettier à gravité inversée avec chariot élévateur standard |
| S9 | Palettier satellite ouvert sur une face avec chariot élévateur standard |
| S10 | Palettier satellite ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard |
| S11 | Palettier mobile avec chariot élévateur standard |
| S12 | Système d'entreposage automatisé à simple profondeur |
| S13 | Système d'entreposage automatisé à double profondeur |
| S14 | Système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique |
| S15 | Système d'entreposage automatisé à accumulation statique |

# 4. Critères de caractérisation

À partir des données collectées de la littérature, nous proposons une caractérisation sous dix-neuf critères divisés en trois groupes présentés dans le Tableau 3. Le premier groupe rassemble six critères spécifiques aux défauts de la charge palettisée tolérés par le système d'entreposage. Le deuxième groupe rassemble douze critères spécifiques à l'équipement d'entreposage qui est l'équipement principal du système. Le troisième groupe est un critère spécifique à l'équipement de manutention couplé à l'équipement d'entreposage.

**Tableau 3: Critères de caractérisation des systèmes d'entreposage des charges palettisées**

| Identifiant | Critère | Description |
|---|---|---|
| C1 | Défauts de construction de paletée acceptés | Quels sont les défauts de construction de paletée acceptés par l'équipement d'entreposage ? |
| C2 | Défauts de forme de palettée acceptés | Quels sont les défauts de forme de paletée acceptés par la technologie d'entreposage ? |
| C3 | Défauts d'occupation de la surface de la palette acceptés | Quels sont les défauts d'occupation de la surface de la palette acceptés par la technologie d'entreposage ? |
| C4 | Autres types de défauts de paletée acceptés | Quels sont les autres types de défauts de paletée acceptés par la technologie d'entreposage ? |
| C5 | Défauts d'emballage des colis acceptés | Quels sont les défauts d'emballage des colis acceptés par la technologie d'entreposage ? |
| C6 | État de palette accepté | Quel état de palette est accepté par la technologie d'entreposage ? |
| C7 | Méthode de rotation des stocks | Quelle méthode de rotation des stocks préconisez-vous ? |
| C8 | Agression des charges palettisées | Quel type d'agression des charges palettisées existe-t-il dans la technologie d'entreposage ? |
| C9 | Hauteur de la travée | Qu'est-ce qui limiterait la hauteur de la technologie d'entreposage ? |
| C10 | Profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées) | Quelle profondeur en nombre de charges palettisées peut-on atteindre avec la technologie ? |
| C11 | Nombre de références idéalement requis | Combien de références sont idéalement requises pour un fonctionnement approprié de la technologie d'entreposage ? |
| C12 | Nombre de charges palettisées par référence idéalement requis | Combien de charges palettisées par référence sont idéalement requises pour un fonctionnement approprié de cette technologie ? |
| C13 | Flux des charges palettisées idéalement requis | Pour quel niveau de flux de charges palettisées la technologie d'entreposage est idéalement adaptée ? |
| C14 | Accessibilité à chaque palette | Quel est le degré d'accessibilité à chaque charge palettisée ? |

| Identifiant | Critère | Description |
|---|---|---|
| C15 | Utilisation d'espace | Quel est la densité ou le degré d'utilisation de l'espace disponible dans l'entrepôt par la technologie d'entreposage ? |
| C16 | Flexibilité aux changements | Quel est le degré de flexibilité de la technologie d'entreposage face aux changements d'implantation ? |
| C17 | Coefficient d'occupation des alvéoles | Quel est le degré d'occupation des alvéoles d'entreposage offert par la technologie d'entreposage ? |
| C18 | Coût d'installation | Quel est le coût engagé pour l'installation de la technologie ? |
| C19 | Vitesse d'opération | Quelle est la vitesse d'opération lors de placement et de retrait des charges palettisées dans la technologie d'entreposage ? |

# 5. Caractérisation à l'aide du langage flou

Les professionnels du domaine d'entreposage et de la manutention, auteurs des différents livres, aide-mémoires et encyclopédie, utilisent différents types d'expression pour caractériser les technologies d'entreposage. Certaines sources telles que Rushton et al. (2014) ou Tompkins et Smith (1998) utilisent soit des grilles de notation (1 à 5 ou 1 à 10), soit des pourcentages. D'autres sources telles que Tompkins et al. (2010) ou Roux (2011) utilisent le langage flou exprimé sous forme de qualificatifs (très faible, faible, moyen, élevé, très élevé, haut, bas, etc.). Généralement, les sources utilisent les trois types de caractérisation en même temps, c'est le cas par exemple de Rushton et al. (2014) et Kulwiec (2008b).

Il a été possible d'harmoniser les données en utilisant la caractérisation par le langage flou pour la plupart des dix-huit critères selon les termes flous : très faible, faible, moyen, élevé, très élevé, excellent. Ces termes sont flous parce qu'ils désignent des plages de valeurs. Ils sont généralement utilisés lorsque les valeurs sont 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. L'emploi et le raisonnement avec le langage flou ont permis de développer la théorie de logique floue. 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. La logique floue est fondée sur la théorie des ensembles flous développée en 1965 par le professeur Lotfi Askar Zadeh (Zadeh, 1965).

Le Tableau 4 présente les caractéristiques des systèmes d'entreposage des charges palettisées selon les 19 critères. Le C10, profondeur de la travée (en nombre de charges palettisées), est soit un chiffre exact, soit une limite inférieure ou supérieure, soit un intervalle. Le C12, nombre de charges palettisées par référence idéalement requis, est parfois en chiffre exact, c'est le cas des technologies à double profondeur.

Les données sur les systèmes d'entreposage des charges palettisées, les critères et leurs valeurs, et le tableau de caractérisation, elles ont été corrigées et validées par un industriel québécois fabricant des équipements d'entreposage BONI Inc.

## Tableau 4: Caractéristiques des systèmes d'entreposage des charges palettisées en langage flou

| Identifiant | Valeurs | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| C1 | Cassure | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Croisement médiocre | • | • | • | • | • | • | | | • | • | • | • | • | | • |
| C2 | Bosse | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | Escalier | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Gite | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Tubérosité | | | | | | | | | | | | | | | |
| C3 | Caverne | • | • | • | • | • | • | | | • | • | • | • | • | | • |
| | Couloir | • | • | • | • | • | • | | | • | • | • | • | • | | • |
| | Cheminée | • | • | • | • | • | • | | | • | • | • | • | • | | • |
| | Poche | • | • | • | • | • | • | | | • | • | • | • | • | | • |
| C4 | Faible débord | • | • | • | • | • | | | | | | • | • | • | | • |
| | Retrait | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| C5 | FR | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Su. | | | | | | | | | | | | | | | |
| C6 | Bon | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • |
| | Mauvais | | | | | | | | | | | | | | | |
| C7 | PEPS | | • | | • | | • | • | | | • | • | • | | • | • |
| | DEPS | • | | • | | • | | | • | • | | | | • | | |
| C8 | CD | • | | | | | | | | | | | | | | |
| | CL | | | | | | | • | • | | | | | | • | |
| | PD | • | | | | | | | | | | | | | | |
| | PL | | | | | | | • | • | | | | | | • | |
| C9 | Cas1 | • | | | | | | | | | | | | | | |
| | Cas2 | | • | • | • | • | • | • | • | • | • | • | | | | |
| | Cas3 | | | | | | | | | | | | • | • | • | • |
| C10 | Nombre de charges palettisées | ≤ 10 | 1 | 2 | 1 | 5 à 10 | ≥ 6 | ≥ 5 | 3 à 6 | ≥ 10 | ≥ 10 | 1 | 1 | 2 | ≥ 10 | ≥ 10 |
| C11 | TF | | | | | | | | | | | | | | | |
| | F | • | | | | | • | | | | | | | | | |
| | M | | | | | • | | • | | • | • | | | | • | • |
| | E | | • | • | • | | | | • | | | • | | | | |
| | TE | | | | | | | | | | | | • | • | | |
| C12 | TF | | | | | | | | | | | | | | | |
| | F | | • | | • | | | | • | | | | • | | | |
| | M | | | 4 à 5 | | | | | | • | • | 1 à 2 | | 4 à 5 | | |
| | E | • | | | | • | • | • | | | | | | | • | • |
| | TE | | | | | | | | | | | | | | | |
| C13 | TF | | | | | | | | | | | | | | | |
| | F | | | | | | | | | | | • | | | | |
| | M | | | • | | • | • | | • | • | | | | | | |
| | E | • | • | | • | | | • | | | • | | | | | |
| | TE | | | | | | | | | | | | • | • | • | • |
| C14 | TF | • | | | | • | • | • | | • | • | | | | • | • |
| | F | | | | | | | | | | | | | | | |
| | M | | | • | | | | | • | | | | | • | | |
| | E | | | | | | | | | | | | | | | |
| | TE | | | | | | | | | | | | | | | |
| | Ex | | • | | • | | | | | | | • | • | | | |
| C15 | TF | | | | | | | | | | | | | | | |
| | F | | • | | | | | | | | | | | | | |
| | M | • | | • | • | | | | • | • | • | | • | • | | |

| Identifiant | Valeurs | S1 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | E | | | | | • | • | • | | | | • | | | | |
| | TE | | | | | | | | | | | | | | • | • |
| C16 | TF | | | | | | | | | | | | • | • | • | • |
| | F | | | | | | | | | | | | | | | |
| | M | | | | | | | • | • | | | • | | | | |
| | E | | • | • | • | • | • | | | • | • | | | | | |
| | TE | • | | | | | | | | | | | | | | |
| C17 | TF | | | | | | | | | | | | | | | |
| | F | | | | | | | | | | | | | | | |
| | M | • | | | | • | | | • | | | | | | | |
| | E | | | • | | | | • | | | | | | • | | |
| | TE | | • | | • | | • | | | • | • | • | • | | • | • |
| C18 | Nul | • | | | | | | | | | | | | | | |
| | TF | | | | | | | | | | | | | | | |
| | F | | • | • | | | | | | | | | | | | |
| | M | | | | • | • | | | | | | | • | • | • | • |
| | E | | | | | | • | • | • | • | • | | | | | |
| | TE | | | | | | | | | | | • | | | | |
| C19 | TF | | | | | | | | | | | | | | | |
| | F | | | | | | | | | | | • | | | | |
| | M | | | • | | • | | | | • | • | | | | • | • |
| | E | • | • | | | | • | | | | | | | | | |
| | TE | | | | • | | | • | • | | | | • | • | | |

## Légende

| | | | |
|---|---|---|---|
| PEPS : | Premier entré, premier sorti | TF : | Très faible |
| DEPS : | Dernier entré, premier sorti | F : | Faible |
| CD : | Choc de dessus | M : | Moyen |
| CL : | Choc latéral | E : | Élevé |
| PD : | Pression de dessus | TE : | Très élevé |
| PL : | Pression latérale | Ex : | Excellent |
| FR : | Faible résistance | Su. : | Surdimensionnement |

Cas 1 : Limitée par la stabilité de la charge palettisée ; limitée par la capacité des colis ; limitée par la capacité de la palette

Cas 2 : Limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment

Cas 3 : Limitée par la hauteur disponible du bâtiment

# 6. Caractérisation à l'aide du langage vulgaire[1]

Les six premiers critères (C1 à C6) sont spécifiques à la charge palettisée qui sera entreposée dans les systèmes d'entreposage. Leurs valeurs sont des expressions précises sur les défauts de la charge palettisée supportés par les systèmes d'entreposage : cassure, croisement médiocre, bosse, escalier, gite, tubérosité, caverne, couloir, cheminée, poche, faible débord, retrait, faible résistance, surdimensionnement, bon, et mauvais. La signification de chacune d'elle peut être consultée dans le dictionnaire Riopel et Croteau (2013). Les défauts sont des formes de déformation qui apparaissent sur la charge palettisée et sont visibles à l'œil nu. Ils peuvent apparaitre durant le processus de palettisation ou en cours de vie de la charge palettisée. La caractérisation à ce niveau consiste de définir si tel système peut s'accommoder à tel défaut. Ces expressions n'ont pas besoin d'être converties en chiffres ou vulgarisées.

[1] Au sens de Kaufmann (1973) et Tong-Tong (1995) i.e. langage non flou

Le C7 traduit le mode de rotation des stocks du système d'entreposage. Deux modes de rotation sont exprimés : premier entré, premier sorti (PEPS) et dernier entré, premier sorti (DEPS). La caractérisation à ce niveau consiste à définir le mode de rotation du système et il n'y a pas un besoin de chiffrer ou vulgariser PEPS et DEPS.

Le C8 permet d'identifier les formes d'agressions physiques subies par les charges palettisées lors de la pose, du retrait et de séjour de cette dernière dans les systèmes d'entreposage. Elles dépendent de la structure des systèmes d'entreposage et peuvent être des chocs et des pressions de dessus ou latéraux. La caractérisation à ce niveau n'a pas besoin d'être vulgarisée.

Le C9 spécifie les causes limitatives des hauteurs des travées des systèmes d'entreposage. Trois cas de figure sont identifiés. Le premier cas regroupe trois causes de limite de la hauteur, le deuxième cas regroupe deux causes et le troisième cas présente une seule cause. Cette forme de caractérisation relève du langage flou.

- Cas 1 : limitée par la stabilité de la charge palettisée ; limitée par la capacité des colis ; limitée par la capacité de la palette.
- Cas 2 : limitée par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé ; limitée par la hauteur disponible du bâtiment.
- Cas 3 : limitée par la hauteur disponible du bâtiment.

Le C10 spécifie la profondeur des systèmes d'entreposage en nombre d'unités de charge (charge palettisée). Les valeurs de ce critère sont déjà vulgarisées et chiffrées. Elles sont soit des nombres entiers (1 ; 2), soit des intervalles (3 à 6 ; 5 à 10), soit des limites inférieures ou supérieures ($\geq 5$ ; $\geq 6$ ; $\geq 10$ ; $\leq 10$). Cette forme de caractérisation relève du langage flou traduit par les intervalles et les limites inférieures et supérieures.

Le reste des critères de caractérisation en nombre de neuf sont tous exprimés en langage flou avec les termes très faible, faible, moyen, élevé, très élevé, et excellent. La valeur Nul est ajoutée particulièrement pour le C18. Dans l'objectif de rendre vulgaires (au sens de Kaufmann (1973) et Tong-Tong (1995) i.e. non flou) les valeurs floues, nous classons les neuf critères selon trois groupes.

Le premier groupe est formé par le C15 qui peut être vulgarisé et modélisé. Ce critère traduit le taux d'utilisation de l'espace par les systèmes d'entreposage et revient à dimensionner la zone d'entreposage. Certains auteurs ont abordé ce sujet de dimensionnement comme Matson et White (1981) qui ont calculé l'espace moyen au sol nécessaire pour quatre différentes alternatives d'entreposage (entreposage de masse, entreposage à simple profondeur, entreposage à double profondeur, et entreposage à grande profondeur). Différentes simulations menées dans cette étude et il est possible de comparer les systèmes sur ce critère. La comparaison soutient effectivement les valeurs floues C15 du Tableau 4, plus on réduit les allées de service et on utilise les hauteurs, plus on économise de l'espace.

Le deuxième groupe est composé des critères C18 et C19. Ces deux critères peuvent être vulgarisés. Le C18 exprime le coût d'installation et le C19 exprime la vitesse d'opération. Différents modèles de calcul spécifiques aux systèmes d'entreposage sont disponibles dans la littérature. Concernant le C18, la vitesse est une fonction de temps et de distance, c'est pourquoi les chercheurs parlent de temps de cycle et de temps de voyage pour les systèmes d'entreposage automatique avec transtockeur (Bozer et White, 1984; Chang et al., 1995). Pour les autres systèmes d'entreposage avec chariot élévateur, ils parlent de distances et de temps de

mouvement dans les allées de service, dans les allées de circulation, en mouvement vertical, de passage d'allée de service en allée de circulation et de prise et de dépôt d'unité de charge (Matson et White, 1981). Concernant le C19, en se basant sur les travaux de Zollinger (1975), Tompkins et al. (2010) présentent une forme de calcul des coûts des systèmes d'entreposage automatique avec transtockeur (coût du bâtiment, du transtockeur et du palettier). De leur côté, Matson et White (1981) proposent une forme de calcul des coûts de l'entreposage de masse et des indications pour les autres systèmes d'entreposage. Il devient difficile de se baser sur ces quelques résultats pour mener des comparaisons puisque les variables et les paramètres considérés changent d'un système d'entreposage à un autre et que nous n'avons pas toutes les données. Le langage flou des experts et des professionnels devient une issue.

Le troisième groupe est formé par les critères C11, C12, C13, C14, C16 et C17. Nous n'avons pas trouvé des méthodes de vulgarisation et de modélisation des caractéristiques traduites par ces critères. Il existe dans la littérature quelques valeurs en pourcentage pour certains systèmes sur certains critères tel que le C16 dans Manley et al. (2008) et le C17 dans Rushton et al. (2014). D'autres auteurs emploient directement le langage flou, ce qui a permis de garder les expressions floues pour tous ces six critères.

## 7. Extraction d'information

Connaissant la performance de chaque système d'entreposage des charges palettisées en fonction des dix-neuf critères de caractérisation selon le Tableau 4, l'interrogation qui se pose est de savoir comment lire ledit tableau ? La méthodologie la plus utilisée à ce niveau dans la littérature est le système expert. Le système expert permet de raisonner comme un expert humain en entreposage et manutention en utilisant les règles Si-Alors jusqu'à aboutir à un choix ou à de multiple choix. Autant pour le système expert, il est difficile de prouver le critère par lequel il faut commencer le test.

Afin de contourner ce problème et justifié mathématiquement le choix de commencer par un critère, une piste serait d'utiliser un algorithme qui permet de tester avec tous les critères pour savoir les plus appropriés. Nous avons implanté un algorithme appartenant à la famille des algorithmes supervisés de classification. Le choix de l'algorithme a été arrêté sur le C4.5 qui a été publié par Quinlan (1993) et utilisé pour les problèmes similaires de génération de connaissances à partir des données (Dancey et al., 2007; De Vos et Van Landeghem, 2004; Frank et Kramer, 2004). Il appartient à la famille des algorithmes de l'intelligence artificielle de type Machine Learning. Le C4.5 est une amélioration de l'algorithme ID3. Il permet de construire un arbre de décision de types n-aires en mesurant la qualité du partitionnement à chaque séparation. Un partitionnement de qualité est créé lorsque le degré de désordre (mélange) dans chaque classe est minimisé. L'algorithme C4.5 est capable de fonctionner avec des valeurs discrètes ou continues et avec des valeurs manquantes. Il permet d'obtenir un arbre réduit en utilisant l'élagage des feuilles, c'est-à-dire couper des branches de l'arbre selon un niveau de confiance préalablement défini. Au final, une matrice de confusion est calculée afin d'évaluer l'arbre obtenu selon le pourcentage de données mal classées.

Le gain informationnel $Gain(Cx)$ est calculé à chaque partitionnement. Il traduit l'évolution globale de l'entropie $Info(T)$. Les formules de calcul de l'entropie et du cas sont selon les équations Éq.1 et Éq.2 avec T, Sj (S1 à S15), et Cx (C1 à C19) représentant respectivement l'ensemble des données d'apprentissage, les classes, et les critères.

$$\text{Info}(T) = -\sum_{j=1}^{k} \frac{\text{freq}(Sj,T)}{|T|} * \log_2\left(\frac{\text{freq}(Sj,T)}{|T|}\right) \qquad \text{Éq. 1}$$

$$\text{Gain}(Cx) = \text{Info}(T) - \sum_{i=1}^{n} \frac{|T_i|}{|T|} * \text{Info}(T_i) \qquad \text{Éq. 2}$$

Selon Quinlan (1993), il existe trois possibilités lors de l'élaboration de l'arbre.

- Les données de T appartiennent toutes à une seule classe Sj, alors T est une feuille identifiant la classe Sj.
- T n'a plus de données, alors T est une feuille associée à la classe la plus fréquente du nœud parent.
- T contient des données appartement à plusieurs classes, alors T est partitionné en plusieurs sous-ensemble T1, T2, …, Tn où Ti contient les données qui correspondent à un résultat du test au nœud.

## 8. Arbre de sélection

À partir des données du Tableau 4, a été générée une matrice de données composée de 11160 entrées, quinze différentes classes (sorties) représentées par les quinze systèmes d'entreposage des charges palettisées et dix-neuf critères de décision représentés par les dix-neuf critères de caractérisation. La génération de la matrice a permis de créer des zones d'interférences entre les quinze systèmes d'entreposage. Pour générer cette matrice, nous avons effectué presque toutes les combinaisons possibles à partir des données du Tableau 4 et nous les avons répétées pour permettre à l'algorithme de reconnaitre les cas similaires et apprendre à ne pas faire d'erreurs. Par exemple, le système S1 prend plusieurs valeurs sur des critères comme le C3 (caverne, couloir, cheminée et poche) et une seule valeur sur d'autres critères. Nous avons fait les combinaisons possibles avec ces valeurs qui représentent toutes S1, ce qui veut dire que S1 est retrouvé dans tous les cas possibles. L'intérêt de génération de combinaisons est de créer des interférences entre les systèmes.

La plupart des critères possèdent des valeurs discrètes qui sont soit des valeurs floues soit des valeurs spécifiques. Toutes les combinaisons possibles des valeurs discrètes sont créées à partir du Tableau 4. À la différence des autres critères, nous avons généré pour le C10 (profondeur de la travée en nombre de charges palettisées) des valeurs continues à partir des valeurs discrètes sous forme de limite et intervalle. Nous avons attribué à chaque entrée une valeur aléatoire appartenant soit à l'intervalle ou la limite définie comme suit.

- Si la profondeur a une valeur unique (1 ou 2), alors les mêmes valeurs sont utilisées et aucun nombre aléatoire n'est généré, c'est le cas de S2, S3, S4, S11, S12, et S13.
- Si la profondeur a un intervalle (3 à 6 et 5 à 10), le nombre aléatoire généré est dans les intervalles définis respectivement pour S8 et S5.
- Si la profondeur a une limite supérieure et qu'elle est égale à 10 (≤ 10), alors le nombre aléatoire généré est entre 1 et 10, c'est le cas de S1.
- Si la profondeur a une limite inférieure et qu'elle est inférieure à 10 (≥ 5 et ≥ 6), alors le nombre aléatoire généré est soit entre 5 et 10, soit entre 6 et 10 respectivement, c'est le cas de S6 et S7.
- Si la profondeur a une limite inférieure et qu'elle est égale à 10 (≥ 10), le nombre aléatoire généré est entre 10 et 20, c'est le cas de S9, S10, S14 et S15 qui peuvent être plus denses et dépassés les 20 charges palettisées en profondeur.

Lorsque les entrées sont très nombreuses comme c'est le cas, il n'est pas possible d'élaborer l'arbre de décision avec l'algorithme C4.5 manuellement (arbre de sélection pour notre cas). Nous avons exécuté le C4.5 sous le logiciel Tanagra 1.4.50 (Rakotomalala, 2005) avec toutes les données d'entrées, un niveau de confiance égale à 100 % et aucun élagage. L'environnement de travail a été Intel® Pentium® CPU N3530 2.16 GHz 64-bit.

Pour exécuter l'algorithme, nous avons séparé les données (11 160 entrées) en deux, données d'apprentissage et données de test. Pour notre cas, 67 % des données ont servi d'apprentissage (7 440 entrées) et 33 % ont servi de test (3 720 entrées). Les pourcentages n'ont pas une signification particulière, il est nécessaire d'apprendre sur un plus grand nombre de données et tester sur le reste. Les sorties des entrées des deux groupes sont initialement connues dans la base de données. Suite à la phase d'apprentissage, un arbre de sélection a été obtenu. La Figure 1 schématise l'arbre de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées. Les losanges représentent les tests sur les critères et les cercles représentent les sorties qui sont les systèmes d'entreposage proposés à la fin du parcours de l'arbre. La taille des flèches (1 pt ou 6 pt) représente les différents chemins pour arriver à un choix de système d'entreposage.

La phase de test a permis de valider l'arbre de sélection. Nous avons affecté une sortie à chaque entrée de test en suivant l'arbre de décision de la Figure 1 réalisé après apprentissage. En langage algorithmique, il est dit que l'algorithme prédit la classe (sortie). Connaissant déjà les sorties des entrées de test (sorties réelles), nous les avons comparés aux sorties prédites à partir de l'arbre de sélection afin de mesurer la qualité des résultats obtenus. Ce processus de comparaison a été effectué en réalisant une matrice dite de confusion. Techniquement, lorsque la sortie prédite est différente de la sortie réelle, il est dit que l'entrée est mal classée. Le Tableau 5 présente la matrice de confusion du processus de test avec les bons et mauvais classements. Les colonnes indiquent les sorties prédites et les lignes indiquent les sorties réelles. Les entrées testées sont 3 720 divisées entre les quinze systèmes d'entreposage (classes ou sorties), par exemple pour S1 il y a 400 entrées de test et 440 pour S10. Ces valeurs représentent le nombre de fois que chaque système apparait dans la base de données après génération et répétition des combinaisons possibles. Elles sont aléatoires et n'ont pas une signification particulière. Les sorties prédites et les réelles sont les mêmes pour toutes les entrées, les entrées sont bien classées. Cette correspondance est présentée sur la diagonale de la matrice. Les valeurs 0 représentent les entrées mal classées et il n'y a eu aucun cas. La qualité de l'apprentissage est aussi mesurée initialement par une autre matrice de confusion. En faisant tous les calculs et aboutissant aux feuilles de l'arbre, l'algorithme attribue par lui seul à chaque feuille une classe. La matrice de confusion vérifie si les classes attribuées par l'algorithme sont différentes des classes réelles de la base de données. Pour notre cas, l'apprentissage a été parfait sans des entrées mal classées. La matrice de confusion de l'apprentissage n'est pas présentée ici, mais elle ressemble à celle du test du Tableau 5 avec uniquement un changement des valeurs. En général, lorsque l'algorithme apprend avec un faible taux d'erreur, il est capable de prédire tout seul avec un faible taux d'erreur.

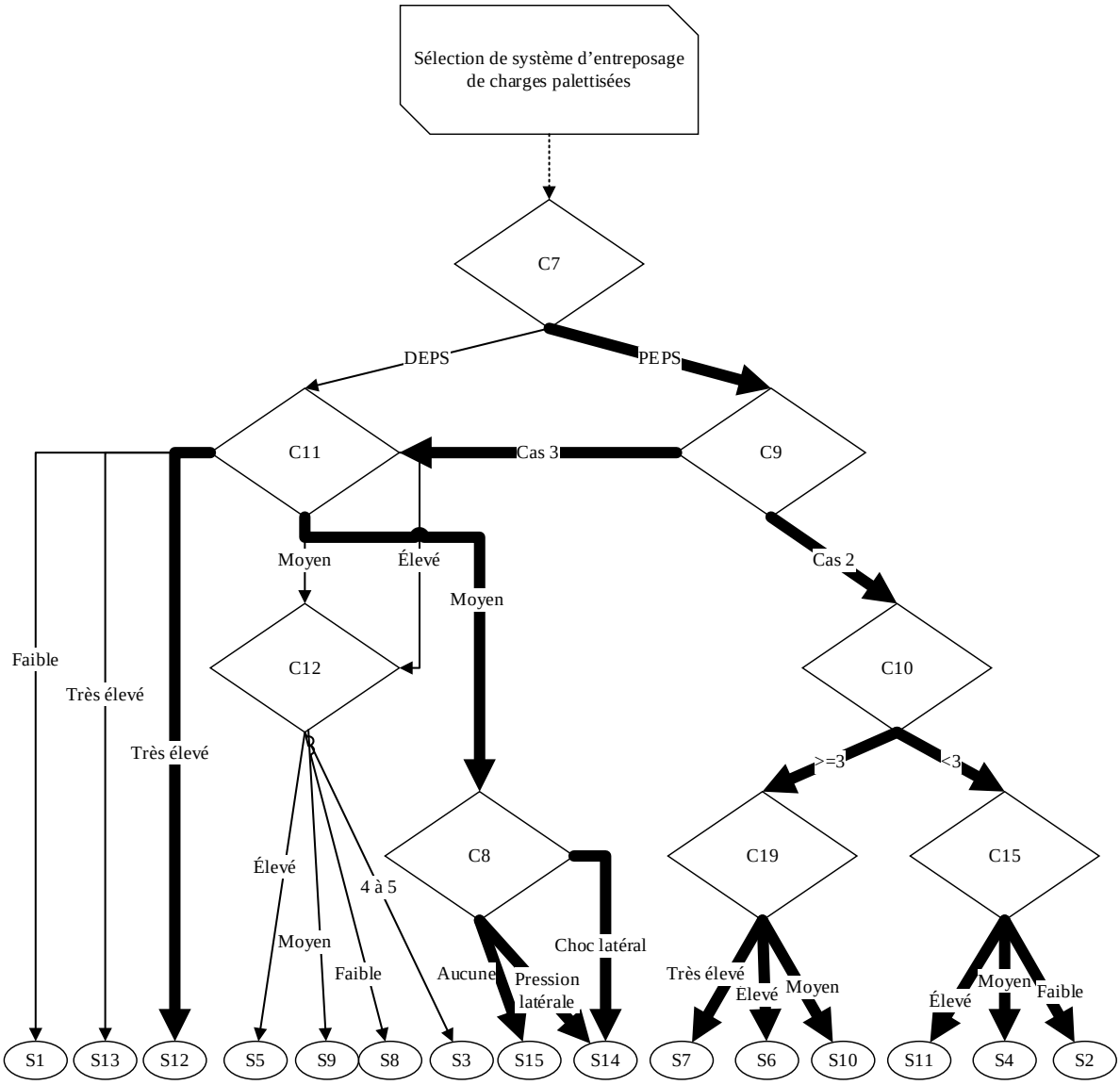


**Figure 1 : Arbre de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées**

## Tableau 5 : Matrice de confusion du test de l'arbre de sélection des systèmes

| | | Sorties prédites | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | S1 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | Total sorties réelles |
| Sorties réelles | S1 | 400 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 400 |
| | S10 | 0 | 440 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 440 |
| | S11 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| | S12 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| | S13 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| | S14 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 220 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 220 |
| | S15 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 880 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 880 |
| | S2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| | S3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| | S4 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 80 |
| | S5 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 480 | 0 | 0 | 0 | 0 | 480 |
| | S6 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 200 | 0 | 0 | 0 | 200 |
| | S7 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 120 | 0 | 0 | 120 |
| | S8 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 60 | 0 | 60 |
| | S9 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 440 | 440 |

| | Sorties prédites | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | S1 | S10 | S11 | S12 | S13 | S14 | S15 | S2 | S3 | S4 | S5 | S6 | S7 | S8 | S9 | Total sorties réelles |
| Total sorties prédites | 400 | 440 | 80 | 80 | 80 | 220 | 880 | 80 | 80 | 80 | 480 | 200 | 120 | 60 | 440 | 3720 |

# 9. Guide de sélection

Les résultats de la Figure 1 sont déterminants et aboutissent à des choix uniques de solution d'entreposage, et ce très rapidement. La lecture de l'arbre de sélection constitue le guide de sélection des systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées.

- S1, entreposage de masse avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée et que le nombre de références de produits est faible.
- S13, système d'entreposage automatisé à double profondeur, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est utilisée et que le nombre de références de produits est très élevé.
- S12, système d'entreposage automatisé à simple profondeur, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est uniquement limitée par la hauteur disponible du bâtiment, et que le nombre de références de produits est très élevé.
- S5, palettier à accumulation statique ouvert sur une face avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée, que le nombre de références de produits est moyen ou élevé et que le nombre de charges palettisées par référence est élevé.
- S9, palettier satellite ouvert sur une face avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée, que le nombre de références de produits est moyen ou élevé et que le nombre de charges palettisées par référence est moyen.
- S8, palettier à gravité inversée avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée, que le nombre de références de produits est moyen ou élevé et que le nombre de charges palettisées par référence est faible.
- S3, palettier à double profondeur avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks DEPS est employée, que le nombre de références de produits est moyen ou élevé et que le nombre de charges palettisées par référence est de 4 à 5 charges.
- S15, système d'entreposage automatisé à accumulation statique, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est uniquement limitée par la hauteur disponible du bâtiment, que le nombre de références de produits est moyen avec la possibilité d'éviter l'agression des charges palettisées.
- S14, système d'entreposage automatisé à accumulation dynamique, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est uniquement limitée par la hauteur disponible du bâtiment, que le nombre de références de produits est moyen et que les agressions des charges palettisées de deux types, les chocs et pressions latéraux ne gênent pas.
- S7, palettier à accumulation dynamique avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est supérieure ou égale à trois, et que la vitesse d'opération attendue est très élevée.

- S6, palettier à accumulation statique ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est supérieure ou égale à trois, et que la vitesse d'opération attendue est élevée.
- S10, palettier à satellite ouvert sur deux faces avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est supérieure ou égale à trois, et que la vitesse d'opération attendue est moyenne.
- S11, palettier mobile avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est inférieure à trois, et que le taux d'utilisation de l'espace est élevé.
- S4, palettier à simple profondeur avec chariot élévateur pour allées étroites, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est inférieure à trois, et que le taux d'utilisation de l'espace est moyen.
- S2, palettier à simple profondeur avec chariot élévateur standard, est suggéré si une méthode de rotation des stocks PEPS est employée, que la hauteur de la travée est limitée soit par la hauteur maximale de gerbage du chariot élévateur utilisé, soit par la hauteur disponible du bâtiment, que la profondeur de la travée souhaitée (en nombre de charges palettisées) est inférieure à trois, et que le taux d'utilisation de l'espace est faible.

## 10.Discussion

L'arbre de sélection de la Figure 1 commence avec le test sur le critère C7 (méthode de rotation des stocks). Ce choix a été fait par l'algorithme C4.5 après tous les calculs des gains informationnels sur tous les dix-neuf critères. Il a été trouvé que le critère C7 est celui qui crée le moins de désordre (plus de gain informationnel) et c'est basé sur cet état de fait qu'une première partition est effectuée. Ainsi de suite, plus un critère crée moins de désordre, plus il a été retenu par l'algorithme. Au total, huit critères parmi les dix-neuf critères de caractérisation ont été exploités et testés, ce qui montre que l'algorithme est capable d'aboutir à des classes totalement homogènes avec simplement huit critères. Les classes sont les quinze systèmes d'entreposage S1 à S15.

Plus loin, les résultats de la Figure 1 montrent qu'il est possible d'atteindre un choix unique de sélection sans passer par tous les huit critères un après l'autre. Deux à quatre critères sont uniquement nécessaires. Avec deux critères (C7 → C11), un choix unique parmi deux systèmes d'entreposage est proposé (S1 et S13). Avec trois critères (C7 → C11 → C12, C7 → C11 → C8 et C7 → C9 → C11), l'arbre propose un choix unique parmi six systèmes d'entreposage (S3, S5, S8, S9, S12, S14, et S15). Avec quatre critères (C7 → C9 → C10 → C19 ou C7 → C9 → C10 → C15), l'arbre propose un choix unique parmi six autres systèmes d'entreposage (S2, S4, S6, S7, S10 et S11).

L'arbre de sélection est composé de quatre niveaux et il est possible d'élaguer l'arbre selon ces niveaux. Chaque niveau est formé par le nombre de critères testés pour arriver à un choix de système d'entreposage. Il s'avère que l'élagage à un niveau supérieur créerait des groupes de systèmes et non pas un choix unique de système. Par exemple, l'élagage avant le quatrième niveau, c'est sans faire le test sur le quatrième critère de chaque branche du troisième niveau, les groupes de systèmes formés sont (S2, S4 et S11), (S6, S7, S10) et (S14 et S15). Le critère C11 est placé entre le deuxième niveau et le troisième, car il est pour certains systèmes un deuxième critère de test et pour d'autres un troisième critère de test.

Il a été possible de trouver un chemin unique de sélection pour chaque système d'entreposage des charges palettisées parmi les quinze qui sont traités dans cet article. Chaque chemin de l'arbre de sélection de la Figure 1 aboutit à une seule solution. Cette solution est la seule qui possède les caractéristiques telles que spécifiées dans l'arbre.

## 11.Conclusion

Dans cet article, nous proposons dans un premier temps les résultats d'une longue démarche de recherche et de récolte de données sur les systèmes d'entreposage destinés aux charges palettisées, ce qui est un besoin pour le domaine d'entreposage et de manutention. Nous parlons de système d'entreposage pour désigner un couple équipement d'entreposage avec un équipement de manutention. Quinze systèmes ont été identifiés et des fiches techniques de ces derniers ont été élaborées, validées et publiées au CIRRELT. Les systèmes d'entreposage sont principalement caractérisés en langage flou. Des valeurs spécifiques pour certains critères coexistent. La vulgarisation des données n'a pas été nécessaire comme démontré dans la section 6. Ensuite, les résultats de ces fiches sont ensuite exploités pour élaborer un guide de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées.

La méthode la plus utilisée pour sélectionner les équipements d'entreposage et de manutention est le système expert qui se base sur les règles de décision Si-Alors. Afin d'exécuter ces règles, il faut commencer le test par un parmi tous les critères. Le guide de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées proposé est basé sur un arbre de sélection obtenu avec l'algorithme C4.5 et dont l'ordre des critères de décision est justifié mathématiquement. L'arbre propose des choix uniques de solution d'entreposage en exploitant simplement deux à quatre critères parmi dix-neuf critères de caractérisation. Le guide de sélection des systèmes d'entreposage des charges palettisées est un premier essai dans le domaine. Des critères décisifs pour la sélection des systèmes ont été considérés. Les données et l'arbre de sélection proposé ont été validés.

Ce travail répond à un besoin d'outiller les concepteurs pour la phase de sélection des équipements durant le processus de conception d'entrepôt. Ce besoin a été souligné par la revue de littérature de Gu et al. (2007). Des pistes de recherche à venir à partir de ce travail seraient d'analyser le cas des systèmes d'entreposage des autres unités de charges autres que les charges palettisées tels que les petites charges, les produits en vrac, les produits avec des formes particulières.

# 12.Références


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. 2015a. *Material handling equipment selection: new classifications of equipments and attributes.* Acte du 6th IESM Conference, Seville p. 461-468.

Ahmed Bouh, M., et Riopel, D. 2015b. *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. 2016a. *Fiches techniques des systèmes d'entreposage des charges palettisées* (Rapport no CIRRELT-2016-21). Montréal: CIRRELT. Tiré de https://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2016-21.pdf

Ahmed Bouh, M., et Riopel, D. 2016b. *Material handling equipment and warehousing equipment selection: data analysis process and statistics* (Rapport no CIRRELT-2016-53). Montréal: CIRRELT. Tiré de http://www.cirrelt.ca/DocumentsTravail/CIRRELT-2016-53.pdf

Anthony, S. 2008. Packaging and materials handling. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 717-728). doi: 10.1002/9780470172490.ch15

Bagadia, K. 2008. Definitions and classifications. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 101-116). doi: 10.1002/9780470172490.ch4

Baker, P., et The Chartered Institute of Logistics and Transport. 2010. *The Principles of Warehouse Design* (3e éd.). United Kingdom: Institute of Logistics & Transport.

Bartholdi, J. J., et Hackman, S. T. 2014. *Warehouse & Distribution Science: Release 0.96*. http://warehouse-science.com: The Supply Chain and Logistics Institute.

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.

Bozer, Y. A., et White, J. A. 1984. Travel-time models for automated storage/retrieval systems. *IIE transactions, 16*(4), p. 329-338.

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.

Chang, D.-T., Wen, U.-P., et Lin, J. T. 1995. The impact of acceleration/deceleration on travel-time models for automated storage/retrieval systems. *IIE transactions, 27*(1), p. 108-111.

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.

Colloc, J. C. 1977. *Étude de l'entrepôt de stockage*: Commerciale Européenne d'Editions et de Promotion.

Commission des normes de l'équité de la santé et de la sécurité du travail (CNESST), et Association sectorielle transport entreposage (ASTE). 2009. *La sécurité des palettiers: Fabrication, achat, installation et utilisation*. Québec: CNESST.

Dancey, D., Bandar, Z. A., et McLean, D. 2007. Logistic model tree extraction from artificial neural networks. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 37*(4), p. 794-802.

De Vos, D., et Van Landeghem, H. 2004. *Automated knowledge creation from logistical benchmarking data.* Communication présentée à International Conference on Cybernetics and Informatics Technologies, Systems and Applications and 10th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis (CITSA/ISAS 2004), Orlando vol. 2, p. 369-374.

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.

Frank, E., et Kramer, S. 2004. *Ensembles of nested dichotomies for multi-class problems.* Communication présentée à Twenty-First International Conference on Machine Learning (ICML 2004), Banff p. 305-312.

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.

Gu, J., Goetschalckx, M., et McGinnis, L. F. 2007. Research on warehouse operation: A comprehensive review. *European Journal of Operational Research, 177*(1), p. 1-21.

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., 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.

Institut national de recherche et de sécurité (INRS), et Syndicat des industries de matériels de manutention. 2001. *Les rayonnages métalliques*. Paris: Institut national de recherche et de sécurité (INRS).

Institute of Industrial Engineers. 2000. *Industrial engineering terminology: a revision of ANSI Z94.0-1989 : an American national standard, approved 1998*. Norcross: Industrial Engineering and Management Press.

Karande, P., et Chakraborty, S. 2013. Material handling equipment selection using weighted utility additive theory. *Journal of Industrial Engineering, 2013* p. 9.

Kaufmann, A. 1973. *Introduction à la théorie des sous-ensembles flous à l'usage des ingénieurs (Fuzzy sets theory) 1. Éléments théoriques de base*. Paris: Masson et Cie.

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.

Klein, H. H., Fowler, W. S., Devaney, W., Footlik, R. B., et Strombeck, T. 2008. Basic storage equipment and methods. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 533-588). doi: 10.1002/9780470172490.ch11

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.

Kulwiec, R. A. 2008a. Basic materials handling concepts. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 1-18). doi: 10.1002/9780470172490.ch1

Kulwiec, R. A. (Édit.). 2008b. *Materials handling handbook* (2e éd.). New York: John Wiley & Sons.

Langevin, A., et Riopel, D. 2005. *Logistics systems : design and optimization*. New York: Springer.

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. 6107-6124.

Manley, C. E., Fowlston, D. L., Nagy, A. J., Sanford, B. W., Midgley, W. R., Weiss, D. J., et Castaldi, J. 2008. Storage systems. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 589-652). doi: 10.1002/9780470172490.ch12

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.

Matson, J. O., et White, J. A. 1981. *Storage system optimization* (Rapport no Production and distribution research center PDRC Report Series 81-09). Atlanta: Georgia Institute of Technology.

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.

Mulcahy, D. E. 1999. *Materials handling handbook*. New York: McGraw-Hill.

Muther, R. 1973. *Systematic layout planning*. Boston, MA: Cahners books.

Muther, R., et Webster, D. B. 2008. Plant layout and materials handling. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 19-77). doi: 10.1002/9780470172490.ch2

Nolan, J. 2008. Introduction. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 865-879). doi: 10.1002/9780470172490.ch19

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.

Promisel, R. 2008. Unit load concepts. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 117-163). doi: 10.1002/9780470172490.ch5

Quinlan, J. R. 1993. *C4.5: programs for machine learning*. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers Inc.

Rakotomalala, R. 2005. *TANAGRA: a free software for research and academic purposes.* Communication présentée à Extraction et gestion des connaissances (EGC'2005), RNTI-E-3, Paris vol. 2, p. 697-702.

Riopel, D. 2014. *Distribution physique de biens: notes de cours IND6224A*. Montréal: Presses Internationales Polytechnique.

Riopel, D. 2015. *Implantation et manutention: notes de cours IND6209*. Montréal: Presses Internationales Polytechnique.

Riopel, D., et Croteau, C. 2013. *Dictionnaire illustré des activités de l'entreprise : industrie, techniques et gestion* (Édition mise à jour). Montréal: Presses internationales Polytechnique.

Roux, M. 2011. *Entrepôts et magasins: Tout ce qu'il faut savoir pour concevoir une unité de stockage* (5e éd.). Paris: Éditions d'Organisation.

Roux, M., et Liu, T. 2010. *Optimisez votre plate-forme logistique* (4e éd.). Paris: Éditions d'Organisation.

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, Dallas p. 1-6.

Syndicat des industries de matériels de manutention. 1983a. Logistique. Dans *Encyclopédie de la manutention*. Paris: AFNOR.

Syndicat des industries de matériels de manutention. 1983b. Stockage et distribution physique des marchandises. Dans *Encyclopédie de la manutention*. Paris: AFNOR.

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

Tompkins, J. A., et Smith, J. D. 1998. *The warehouse management handbook* (2e éd.). Raleigh: Tompkins press.

Tompkins, J. A., Smith, J. D., Huffman, J. R., et Ackerman, K. B. 2008. Warehousing. Dans R. A. Kulwiec (Édit.), *Materials Handling Handbook* (p. 653-708). doi: 10.1002/9780470172490.ch13

Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., et Tanchoco, J. M. A. 2010. *Facilities planning* (4e éd.). Hoboken: John Wiley & Sons.

Tong-Tong, J.-R. 1995. *La logique floue*. Paris: Hermes.

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.

Zollinger, H. A. 1975. *Planning, evaluating and estimating storage systems.* Communication présentée à The seminar on advanced material handling, Purdue University, West Lafayette, IN p. 29-30.