الجـــــــــــــــــــمهـوريـــــة الجـــــــــــــزائـريـة الديمـــــــقـراطيـة الـشـــــــــعبيـة

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التـــــــــــــــــــــــــــعـليـم العـــــــالي والبـــــــــحث العـــــلـمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جـــــــــــــــامعة أبي بكـــر بـلـقـايد – تـلمســـــــــــــــان –

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Industriel

Spécialité : Ingénierie de production

Par : KOULOUGHLI Youcef Salim

HASSAINE Adnane Yasser

Sujet

Simulation, Analyse des Goulots d'Etranglement et Optimisation d'un Système Automatise de Stockage/Déstockage (AS/RS) à l'aide du logiciel ARENA

Soutenu publiquement, le 18 / 06 / 2026 devant le jury composé de :

M. SOUIER Mehdi	Professeur	Université de Tlemcen	Président
M. HASSAM Ahmed	MCB	Université de Tlemcen	Examinateur
Mme. BAKDI Khadidja	Doctorante	Université de Tlemcen	Examinatrice
Mme. GHOMRI Latéfa	Professeur	Université de Tlemcen	Encadrante
Mme. BOUMEDIENE Fatima-Zohra	MCB	Université de Tlemcen	Co- Encadrante

Année universitaire : 2025 /2026

Remerciements

Nous remercions Dieu le Tout-Puissant de nous avoir accordé la santé, la force, la patience et les moyens nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons notre profonde gratitude à notre encadrante, Mme GHOMRI Latefa, ainsi qu'à notre co-encadrante, Mme BOUMEDIENE Fatima-Zohra, pour leur accompagnement, leurs précieux conseils, leur disponibilité et leur soutien tout au long de ce projet. Leurs orientations, leur sérieux et leur expertise ont largement contribué à la réussite de ce travail.

Nous adressons également nos sincères remerciements à M. SOUIER Mehdi, M. HASSAM Ahmed et Mme BAKDI Khadidja pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de faire partie du jury et d'évaluer ce travail.

Nous dédions ce modeste travail à nos très chers parents, en témoignage de notre profond amour, de notre reconnaissance et de notre immense gratitude pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis afin de nous offrir les meilleures conditions de réussite. Leur confiance, leurs encouragements et leur soutien indéfectible ont été notre plus grande source de motivation tout au long de notre parcours universitaire.

À nos frères et sœurs, pour leur affection, leur présence et leur soutien constant dans les moments les plus importants de notre vie.

À nos chers amis, qui ont partagé avec nous les joies, les défis et les souvenirs de cette aventure universitaire. Merci pour votre amitié sincère, votre aide précieuse et vos encouragements.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail. Que cette réussite soit le début d'un avenir rempli de succès, de bonheur et d'accomplissements.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à mes très chers parents, en témoignage de leur amour, de leurs sacrifices et de leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours universitaire. Leur confiance et leurs encouragements ont été ma plus grande source de motivation.

À mes frères et sœurs, pour leur présence, leur affection et leur soutien constant dans les moments les plus importants de ma vie.

À mes chers amis, qui ont partagé avec moi les joies, les défis et les souvenirs de cette aventure universitaire. Merci pour votre amitié sincère, votre aide précieuse et vos encouragements. Que notre réussite soit le début d'un avenir rempli de succès, de bonheur et d'accomplissements.

Enfin, à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, j'adresse mes plus sincères remerciements.

- ✓ KOULOUGHLI Youcef Salim



Dédicace

À la lumière de ma vie, mes chers parents,

Pour tous les sacrifices consentis, pour votre patience, votre amour inconditionnel et votre confiance qui ne m'ont jamais fait défaut. Vous avez toujours été mon plus grand soutien et la source de ma détermination. Je vous dédie ce travail avec tout mon amour et mon profond respect.

À mon frère et à ma sœur,

Votre présence, vos conseils et votre affection ont été d'un grand réconfort tout au long de mon parcours. Que ce travail soit le témoignage de ma reconnaissance et de mon attachement.

- ✓ HASSAINE Adnene Yasser



Table des matières

Introduction générale *1*
Chapitre I *3*
I.1. Définition et historique des AS/RS *4*
I.1.1. Définition d'un AS RS *4*
I.1.2. Typologie des AS/RS *5*
I.1.3. Historique des AS/RS *5*
I.2. Évolution vers un système à navettes (SBS/RS) *7*
I.2.1. Définition et distinction *8*
I.2.2. Limites des AS/RS classiques *8*
I.2.3. Apparition des SBS/RS *9*
I.2.4. Avantages des SBS/RS *10*
I.2.5. Inconvénients et limites actuelles des SBS/RS *10*
I.2.6. Innovations récentes *11*
I.3. Composants clés et fonctionnement des SBS/RS *12*
I.3.1. Architecture générale *12*
I.3.2. Racks et rails *12*
I.3.3. Navettes : caractéristiques *13*
I.3.4. Capteurs embarqués *13*
I.3.5. Élévateurs (lifts) *13*
I.3.6. Convoyeurs d'interface *13*
I.3.7. WCS (Warehouse Control System) *14*
I.3.8. WMS (Warehouse Management System) *14*
I.3.9. Séquence de stockage détaillée *14*
I.3.10. Séquence de récupération et cas particuliers *15*
I.3.11. Méthodologies de stockage et flux de pièces *15*
I.4. Méthodologies de stockage et flux de pièces *15*
I.4.1. Enjeux des méthodologies *15*
I.4.2. Stockage dédié *15*
I.4.3. Stockage aléatoire *15*
I.4.4. Méthode ABC (Pareto) *16*
I.4.5. Mise en œuvre de la méthode ABC *16*
I.4.6. Double profondeur et multi-fond *16*
I.4.7. Schéma global des flux *16*
I.4.8. Détail – réception à stockage *17*
I.4.9. Flux de préparation (picking) *17*
I.4.10. Méthodes avancées d'optimisation *17*
I.4.11. Indicateurs clés de performance *17*
I.5. Conclusion *18*

Chapitre II *17*
II.1. Choix et présentation de l'outil de simulation : Arena Simulation software *19*
II.1.1. Présentation d'Arena et FlexSim *20*
II.1.2. Définition et caractéristiques d'Arena *20*
II.1.3. Définition et caractéristiques de FlexSim *20*
II.1.4. Avantages des deux logiciels pour la simulation des systèmes SBS/RS *21*
II.2. Modélisation du système SBS/RS sous Arena *21*
II.2.1. Description générale du système modélisé *21*
II.2.2. Hypothèses de modélisation *24*
II.2.3. Définition des entités *24*
II.2.4. Ressources du système *24*
II.2.5. Configurations simulées *25*
II.2.6. Logique de fonctionnement *26*
II.2.7. Mise en œuvre de la simulation et paramètres d'exécution *28*
II.2.7.1. Les modules Create *28*
II.2.7.2. Les modules Assign *29*
II.2.7.3. Les modules Decide *31*
II.2.7.4. Les modules Station *34*
II.2.7.5. Les modules Route *36*
II.2.7.6. Les modules Request *38*
II.2.7.7. Les modules Transport *40*
II.2.7.8. Les modules Free *41*
II.2.7.9.Les modules Dispose *43*
II.2.7.10. Le module Queue *43*
II.2.7.11. Les modules Transporter *44*
II.2.7.12. Les modules Network et Network Links *46*
II.2.8 Algorithme : Modèle de simulation Arena du système SBS/RS *47*
II.3. Algorithme de regroupement par taille de lot *50*
II.3.1 Principe *50*
II.3.2 Hypothèses *51*
II.3.3 Algorithme *51*
II.3.4 Discussion *51*
II.4. Algorithme de regroupement par durée fixe *52*
II.4.1.Principe *52*
II.4.2 Hypothèses *52*
II.4.3 Algorithme *52*
II.4.4 Discussion *53*
II.4.5 Synthèse *53*
II.5 Présentation du logiciel CATIA *53*
II.5.1 Implémentation des pièces de conception réalisées pour l'animation *55*

II.6 Conclusion *56*
Chapitre III *57*
III.1 Protocole expérimental et indicateurs de performance *58*
III.1.1 Configurations simulées *58*
III.1.2 Paramètres testés *58*
III.1.3 Conditions d'exécution *58*
III.1.4 Indicateurs de performance *58*
III.2 Algorithme de base (sans regroupement) *59*
III.2.1 Configuration à 24 emplacements *59*
III.2.1.1 Analyse des performances du système *59*
III.2.1.2 Identification des goulots d'étranglement *60*
III.2.1.3 Recommandations *60*
III.2.2 Configuration à 160 emplacements *60*
III.2.2.1 Analyse des performances du système *61*
III.2.2.2 Identification des goulots d'étranglement *61*
III.2.2.2 Recommandations *61*
III.2.3 Configuration à 500 emplacements *62*
III.2.3.1 Analyse des performances du système *62*
III.2.3.2 Identification des goulots d'étranglement *62*
III.2.3.3 Recommandations *63*
III.2.4 Synthèse de l'algorithme de base *63*
III.3 Algorithme 1 : regroupement par taille de lot *64*
III.3.1 Configuration à 24 emplacements *64*
III.3.1.1 Analyse des performances du système *64*
III.3.1.2 Identification des goulots d'étranglement *65*
III.3.1.3 Recommandations *65*
III.3.2 Configuration à 160 emplacements *65*
III.3.2.1 Analyse des performances du système *66*
III.3.2.2 Identification des goulots d'étranglement *66*
III.3.2.3 Recommandations *67*
III.3.3 Configuration à 500 emplacements *67*
III.3.3.1 Analyse des performances du système *67*
III.3.3.2 Identification des goulots d'étranglement *68*
III.3.3.3 Recommandations *68*
III.3.4 Synthèse de l'Algorithme 1 ..... *68*
III.4 Algorithme 2 : regroupement par durée fixe *69*
III.4.1 Configuration à 24 emplacements *69*
III.4.1.1 Analyse des performances du système *70*
III.4.1.2 Identification des goulots d'étranglement *70*
III.4.1.3 Recommandations *70*

III.4.2 Configuration à 160 emplacements.....*71*
III.4.2.1 Analyse des performances du système.....*71*
III.4.2.2 Identification des goulots d'étranglement.....*71*
III.4.2.3 Recommandations.....*72*
III.4.3 Configuration à 500 emplacements.....*72*
III.4.3.1 Analyse des performances du système.....*72*
III.4.3.2 Identification des goulots d'étranglement.....*72*
III.4.3.3 Recommandations.....*73*
III.4.4 Synthèse de l'Algorithme 2.....*73*
III.5 Analyse comparative des trois stratégies.....*74*
III.6 Conclusion.....*74*
Référence Bibliograpiques.....*77*

Liste des tableaux

Tableau 1 Typologie des élévateurs 5

Tableau 2 Typologie des élévateurs 8

Tableau 3 Comparaison AS/RS vs SBS/RS 10

Tableau 4 Typologie des élévateurs 13

Tableau 5 comparison entre arena et flexsim 22

Tableau 6 synthétise les caractéristiques des trois configurations simulées. 26

Tableau 7 synthèse des modules Free – Ressources et opérations associées 42

Tableau 8 paramètres des transporteurs – Ascenseurs et Navettes 45

Tableau 9 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée (configuration à 24 emplacements) 59

Tableau 10 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée (configuration à 160 emplacements) 60

Tableau 11 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée (configuration à 500 emplacements) 62

Tableau 12 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction de la taille de lot N_max (configuration à 24 emplacements) 64

Table 13 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction de la taille de lot N_max (configuration à 160 emplacements) 65

Table 14 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction de la taille de lot N_max (configuration à 500 emplacements) 67

Table 15 Taux d'occupation de l'ascenseur et temps d'attente en fonction du temps inter-arrivée, pour $\Delta T = 5$ (configuration à 24 emplacements) 69

Tableau 16 Taux d'occupation de l'ascenseur et temps d'attente en fonction du temps inter-arrivée, pour $\Delta T = 5$ (configuration à 160 emplacements 71

Tableau 17 Taux d'occupation de l'ascenseur et temps d'attente en fonction du temps inter-arrivée, pour $\Delta T = 5$ (configuration à 500 emplacements) 72

Liste des figures

Figure 1 Architecture générale d'un systéme AS/RS 4
Figure 2 Architecture générale d'un système automatisé SBS/RS 12
Figure 3 Modéle Arena du système SBS/RS 28
Figure 4 Les modules Create 29
Figure 5 Les modules Assign 31
Figure 6 Les modules Decide 33
Figure 7 Les modules Station 35
Figure 8 Les modules Route 37
Figure 9 Les modules Request 39
Figure 10 Les modules Transport 41
Figure 11 Les modules free 42
Figure 12 Les modules Dispose 43
Figure 13 Les modules queue block 44
Figure 14 Les modules Transporter 45
Figure 15 Les modules Network et Network Links 46
Figure 16 Représentation du shuttle dans l'animation 54
Figure 17 Représentation de la pièce (charge) dans l'animation 54
Figure 18 La structure générale du système 55
Figure 19 Représentation de l'ascenseur dans le système SBS/RS 55
Figure 20 Création d'un chemin de déplacement 56

Introduction générale

Dans un contexte économique mondial marqué par une concurrence accrue et des exigences croissantes en matière de réactivité logistique, la gestion efficace des entrepôts est devenue un enjeu stratégique majeur pour les entreprises industrielles et commerciales. Face à l'essor du commerce électronique et à la nécessité de traiter des volumes toujours plus importants dans des délais toujours plus courts, les systèmes de stockage et de récupération automatisés se sont imposés comme une solution incontournable pour répondre à ces défis.

Parmi ces systèmes, les Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems (SBS/RS) représentent l'une des configurations les plus avancées et les plus performantes de la logistique moderne. Ces systèmes reposent sur deux types de ressources complémentaires : les navettes (shuttles), qui assurent les déplacements horizontaux au sein de chaque niveau de stockage, et l'ascenseur (lift), qui garantit les transferts verticaux entre les différents niveaux. Si les navettes offrent une grande flexibilité et une parallélisation naturelle des opérations, l'ascenseur constitue, quant à lui, une ressource unique et partagée par l'ensemble du système. De ce fait, il représente structurellement le goulot d'étranglement principal, dont la saturation conditionne directement la performance globale de l'entrepôt.

C'est précisément autour de cette problématique que s'articule le présent projet de fin d'études. L'objectif central de ce travail est d'analyser l'impact de l'ascenseur sur le flux des opérations d'un SBS/RS, et de proposer des stratégies permettant de mieux exploiter cette ressource critique. Pour ce faire, deux algorithmes de gestion des flux ont été conçus, fondés sur le principe du regroupement des charges : plutôt que de traiter chaque commande individuellement, ces algorithmes regroupent plusieurs charges avant de solliciter l'ascenseur, permettant ainsi d'en maximiser l'utilisation à chaque déplacement. Cette approche introduit naturellement un arbitrage entre deux objectifs antagonistes — la réduction des temps d'attente individuels et l'amélioration du débit global du système — sans pour autant recourir à une formulation d'optimisation formelle.

La contribution principale de ce travail réside dans la modélisation et la simulation du système SBS/RS à l'aide du logiciel Arena Simulation Software. Ce cadre de simulation a permis de reproduire fidèlement le comportement dynamique du système, d'implémenter les algorithmes proposés et d'évaluer quantitativement leurs effets sur les indicateurs de performance, notamment le taux d'utilisation de l'ascenseur, les temps d'attente et le débit global. Afin d'enrichir davantage la portée de l'étude, une animation tridimensionnelle du système a également été réalisée à l'aide du logiciel CATIA, offrant une représentation visuelle et réaliste du fonctionnement du SBS/RS.

Afin de répondre à cette problématique de manière structurée et progressive, ce mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre pose les fondements théoriques et conceptuels de l'étude. Il présente une définition formelle des systèmes AS/RS et retrace leur évolution historique depuis les premières installations des années 1950 jusqu'aux systèmes à navettes contemporains. Il décrit ensuite l'architecture et les composants clés d'un SBS/RS, ainsi que les principales méthodologies de stockage et de gestion des flux de pièces.

Le deuxième chapitre constitue le cœur de la contribution de ce travail. Il expose la démarche de modélisation et de simulation adoptée sous Arena Simulation Software, présente les scénarios simulés,

décrit en détail les deux algorithmes de regroupement des charges développés, et explique leur implémentation au sein du modèle de simulation. Ce chapitre présente également l'animation 3D réalisée sous CATIA pour illustrer le comportement du système.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats obtenus. Les performances de l'algorithme de base sont comparées à celles des deux algorithmes proposés, pour trois volumes de charges différents (24, 160 et 500 pièces), permettant d'identifier les stratégies les plus efficaces selon les conditions d'exploitation du système.

Enfin, une conclusion générale synthétise les principaux apports de ce travail, discute des limites identifiées et ouvre des perspectives pour de futures recherches dans ce domain.

Chapitre I

Introduction aux systèmes de stockage automatisés

Face aux exigences croissantes de réactivité et de productivité dans les entrepôts modernes, les systèmes de stockage et de récupération automatisés (AS/RS) se sont imposés comme une solution incontournable. Apparus dans les années 1950, ces systèmes ont connu une évolution technologique continue, aboutissant aux systèmes à navettes (SBS/RS), dont les performances en termes de débit et de densité de stockage surpassent largement les configurations classiques.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les fondements théoriques nécessaires à la compréhension du travail développé dans la suite de ce mémoire. Il retrace l'évolution historique des AS/RS, décrit l'architecture et les composants clés des SBS/RS, et présente les principales méthodologies de gestion des flux de stockage, constituant ainsi le socle conceptuel sur lequel repose l'ensemble de cette étude.

I.1. Définition et historique des AS/RS

Avant d'aborder les spécificités des systèmes à navettes, il est nécessaire de définir le cadre général des AS/RS et d'en retracer les grandes étapes d'évolution, qui ont progressivement façonné les systèmes logistiques automatisés tels qu'ils existent aujourd'hui.

I.1.1. Définition d'un AS RS

Un AS/RS (Automated Storage and Retrieval System) désigne un système de manutention automatisé conçu pour stocker et récupérer des charges à des emplacements déterminés au sein d'une structure de rayonnages, sous le contrôle d'un système informatique et sans intervention humaine directe dans les allées. Dans sa configuration classique, le système repose sur un transtockeur (Stacker Crane), engin motorisé se déplaçant à la fois horizontalement le long de l'allée et verticalement le long du mât (sa structure porteuse) dédié à une allée unique, et capable d'effectuer simultanément ces deux mouvements pour atteindre n'importe quel emplacement de stockage. Selon trois critères fondamentaux caractérisent un AS/RS : l'absence d'opérateur en zone de stockage, la capacité à combiner des mouvements bidirectionnels simultanés, et la gestion informatisée des emplacements de stockage [1].

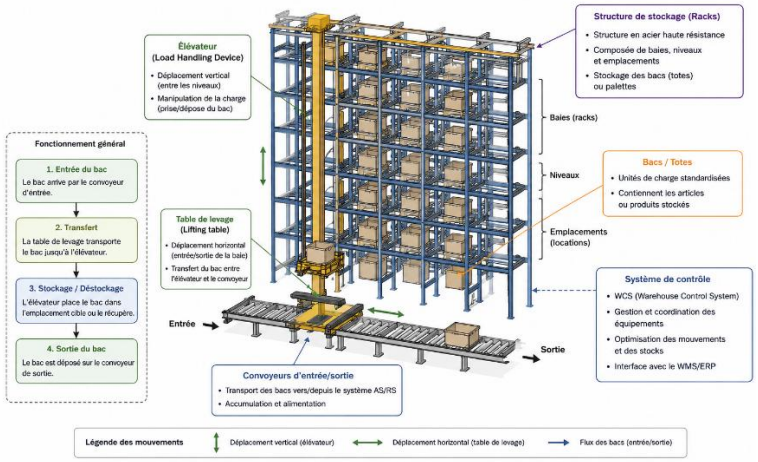


Figure 1 Architecture générale d'un systéme AS/RS

I.1.2. Typologie des AS/RS

Les systèmes AS/RS ne constituent pas une famille homogène, mais regroupent au contraire une diversité de configurations adaptées à des contextes d'utilisation très variés. La classification la plus répandue, issue de la norme FEM 9.851 , distingue trois grandes catégories selon la capacité de charge, la hauteur de stockage et le débit opérationnel, comme le résume le tableau 1.

Le premier type, dit *Unit Load*, est conçu pour la manutention de charges lourdes et volumineuses, telles que des palettes ou des conteneurs industriels. Avec une capacité pouvant atteindre 2 000 kg et des structures s'élevant jusqu'à 40 mètres de hauteur, ces systèmes sont principalement déployés dans les entrepôts de grande envergure de l'industrie automobile, chimique ou agroalimentaire. Leur débit, de l'ordre de 40 à 60 cycles par heure, est volontairement limité au profit de la robustesse et de la capacité de charge.

Le deuxième type, le *Mini-Load*, est destiné au stockage et à la récupération de charges intermédiaires, typiquement des bacs, des plateaux ou des cartons d'un poids maximal de 500 kg. Avec des hauteurs de rayonnage atteignant 15 mètres et un débit sensiblement plus élevé, entre 80 et 120 cycles par heure, ce type de système est largement utilisé dans les entrepôts de pièces détachées, de produits pharmaceutiques ou de composants électroniques, où la diversité des références et la fréquence des opérations de picking sont importantes [2].

Le troisième type, le *Micro-Load*, représente la configuration la plus légère et la plus rapide de cette classification. Dédié à des charges de faible poids, généralement inférieures à 50 kg, sur des hauteurs de rayonnage limitées à 10 mètres, il se distingue par un débit pouvant atteindre 150 à 200 cycles par heure. Il est particulièrement adapté aux environnements nécessitant une grande réactivité, comme les laboratoires, les officines pharmaceutiques ou les chaînes d'assemblage de haute précision.

Au-delà de cette classification normalisée, les AS/RS peuvent également être distingués selon d'autres critères, notamment le nombre d'allées desservies, le mode de transfert des charges entre allées, ou encore le degré d'intégration avec les systèmes de gestion d'entrepôt (*WMS*) et de contrôle (*WCS*). Ces distinctions seront abordées plus en détail dans les sections suivantes.

Le tableau 1 synthétise les caractéristiques techniques des trois catégories présentées ci-dessus.

Tableau 1 Typologie des élévateurs

Type	Charge max (kg)	Hauteur max (m)	Débit (cycles/h)
Unit load	2000	40	40–60
Mini-load	500	15	80–120
Micro-load	50	10	150–200

I.1.3. Historique des AS/RS

- **Origines industrielles (1950-1960) :**

L'émergence des systèmes AS/RS s'inscrit dans le contexte de l'après-guerre, marqué par une expansion industrielle rapide et une hausse continue des coûts fonciers, rendant impérative la densification du

stockage [3].

C'est aux États-Unis que naissent les premières installations : en 1953, General Motors met en service à son usine de l'Ohio l'un des tout premiers systèmes automatisés de manutention de palettes . L'Europe suit rapidement, avec la construction par le fabricant allemand Demag du premier système automatisé d'Allemagne en 1956 .

- **Années 1960 : Premières intégrations :**

La décennie 1960 s'ouvre avec le dépôt du brevet fondateur par K. H. Möller en 1962 , qui pose les bases mécaniques et théoriques du transtockeur automatisé.

En 1965, Ford Motor Company installe un système AS/RS dans son usine de Détroit , confirmant l'intérêt croissant des grands groupes industriels pour ces technologies. Sur le plan informatique, les premiers logiciels de gestion d'entrepôt (WMS) font leur apparition, fonctionnant sur des ordinateurs centraux IBM 360 .

Toutefois, ces systèmes restent à cette époque réservée à un nombre limité d'acteurs, en raison de coûts d'investissement élevés, compris entre 2 et 5 millions de dollars, et d'une maintenance particulièrement complexe.

- **Années 1970 : Maturation :**

Le choc pétrolier de 1973 constitue un tournant décisif pour le développement des AS/RS, en accentuant la pression sur les entreprises pour optimiser l'utilisation de leurs surfaces de stockage et réduire leurs consommations énergétiques .

L'introduction des variateurs de vitesse permet à cette époque de réduire la consommation électrique des transtockeurs de l'ordre de 25 % .Sur le plan normatif, la Fédération Européenne de la Manutention (FEM) publie en 1978 un référentiel technique qui contribue à standardiser la conception et l'exploitation de ces systèmes [4].

Cette période voit également l'apparition des premiers systèmes à double profondeur, permettant d'accroître significativement la densité de stockage.

- **Années 1980 : Exploitation industrielle :**

Les années 1980 marquent l'entrée des AS/RS dans une phase de maturité industrielle. En 1982, Nissan met en exploitation au Japon un système AS/RS atteignant 50 mètres de hauteur , illustrant les possibilités désormais offertes par ces technologies en termes de verticalisation du stockage.

L'intégration des AS/RS avec les systèmes de Gestion de Production Assistée par Ordinateur (GPAO) se généralise, permettant une meilleure synchronisation entre les flux de production et les opérations de stockage. Parallèlement, la généralisation des codes-barres pour l'identification des unités de charge contribue à fiabiliser et à accélérer les opérations de gestion des stocks.

- **Années 1990 : Miniaturisation :**

La décennie 1990 est caractérisée par une tendance forte à la miniaturisation et à la diversification des applications des AS/RS. Les systèmes mini-load connaissent un essor particulier dans le secteur pharmaceutique, notamment avec leur adoption par des distributeurs de grande envergure tels que McKesson.

En 1995, le premier AS/RS mobile sur rails, reposant sur le principe des racks déplaçables, est breveté, ouvrant de nouvelles perspectives en matière de densification de l'espace.

La gestion automatique du First In, First Out (FIFO) par lots émerge également, répondant aux exigences de traçabilité croissantes de l'industrie . Sur le plan des performances, les systèmes micro-load atteignent à cette époque des débits de l'ordre de 200 cycles par heure .

- **Années 2000 : Transition vers les navettes :**

Le tournant des années 2000 marque une rupture technologique majeure dans l'histoire des AS/RS. En 2003, Swisslog commercialise le premier système à navettes, inaugurant ainsi la génération des SBS/RS et annonçant une nouvelle ère pour la logistique automatisée [5].

Cette innovation répond à des limites structurelles des transtockeurs classiques, notamment leur faible débit et leur rigidité architecturale, ouvrant la voie à des systèmes plus flexibles, plus rapides et mieux adaptés aux exigences du commerce moderne.

- **Années 2010 : Connectivité :**

La décennie 2010 est placée sous le signe de la connectivité et de l'intelligence des systèmes. Dès 2012, l'intégration de l'Internet des Objets (IoT) se répand dans les entrepôts automatisés, avec le déploiement de capteurs de vibration et de température permettant une surveillance en temps réel de l'état des équipements. En 2015, le concept de jumeau numérique (digital twin) fait son entrée dans le domaine de la logistique, offrant des capacités de maintenance prédictive et de simulation opérationnelle.

En 2018, les AS/RS franchissent une nouvelle étape en devenant compatibles avec les véhicules autonomes de type AGV et AMR, facilitant ainsi leur intégration dans des chaînes logistiques entièrement automatisées.

- **Tendances : 2020 et au-delà :**

La période récente est marquée par une accélération sans précédent de l'adoption des systèmes automatisés. La pandémie de COVID-19 a joué un rôle de catalyseur, en provoquant une explosion du commerce électronique et en mettant en évidence la vulnérabilité des chaînes logistiques reposant sur la main-d'œuvre humaine, accélérant ainsi le déploiement des SBS/RS.

En 2024, des systèmes hybrides combinant transtockeurs et navettes au sein d'une même architecture voient le jour, offrant un compromis entre puissance de charge et flexibilité opérationnelle.Les projections sectorielles indiquent qu'à l'horizon 2030, 35 % des entrepôts occidentaux seront équipés d'un système AS/RS, contre seulement 18 % en 2020, témoignant de la place centrale que ces technologies sont appelées à occuper dans la logistique de demain.

I.2. Évolution vers un système à navettes (SBS/RS)

Après avoir retracé l'évolution historique des systèmes AS/RS et mis en évidence leurs caractéristiques générales, il convient à présent d'aborder le cœur du système étudié dans ce mémoire. Les limites structurelles des AS/RS classiques ont en effet conduit au développement d'une nouvelle génération de systèmes logistiques automatisés : les Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems (SBS/RS).

C'est précisément sur ce type de système que porte l'ensemble du travail présenté dans les chapitres suivants. Avant d'en analyser les performances et d'en simuler le comportement, il est donc indispensable d'en poser la définition, d'en comprendre les origines et d'en identifier les avantages par rapport aux configurations qui l'ont précédé.

I.2.1. Définition et distinction

Un SBS/RS (Shuttle-Based Storage and Retrieval System) se distingue fondamentalement des AS/RS classiques par le remplacement du transtockeur unique par une flotte de navettes autonomes, à raison d'au moins une navette par niveau de stockage.

Cette architecture introduit un changement de paradigme majeur dans la conception des entrepôts automatisés : là où les systèmes traditionnels reposaient sur un acteur unique effectuant séquentiellement l'ensemble des opérations de stockage et de récupération, les SBS/RS exploitent un parallélisme massif, permettant à plusieurs navettes d'opérer simultanément et indépendamment sur leurs niveaux respectifs .Il en résulte une capacité de débit sensiblement supérieure, une meilleure résilience aux pannes et une flexibilité accrue face aux variations de la demande [6].

I.2.2. Limites des AS/RS classiques

Malgré leur contribution indéniable à la modernisation de la logistique industrielle, les AS/RS classiques présentent des limites structurelles qui ont progressivement conduit à la recherche de configurations alternatives. Ces limites, identifiées et documentées par, sont synthétisées dans le tableau 2 et s'articulent autour de trois contraintes fondamentales.

La première contrainte tient à l'unicité de la machine par allée. En cas de panne du transtockeur, l'ensemble de l'allée concerner est immobilisé, entraînant une interruption totale des opérations de stockage et de récupération sur ce niveau, sans possibilité de redondance ou de basculement vers une ressource alternative.

La deuxième contrainte est liée à l'obligation pour le transtockeur d'effectuer des déplacements verticaux pour atteindre les emplacements en hauteur.

Ces mouvements, mécaniquement plus lents et énergivores, introduisent une latence significative dans le traitement des commandes, particulièrement pénalisante lorsque les bacs concernés sont situés aux niveaux supérieurs de la structure.

La troisième contrainte, et sans doute la plus limitante en termes de performance globale, est l'absence de parallélisme.

Le transtockeur ne pouvant traiter qu'une opération à la fois, le débit maximal atteignable par une allée est structurellement plafonné à environ 60 cycles par heure, indépendamment de toute optimisation algorithmique ou logicielle.

Tableau 2 Typologie des élévateurs

Limite	Conséquence
Machine unique par allée	Panne bloquant toute l’allée
Déplacement vertical imposé	Latence pour bacs en hauteur
Absence de parallélisme	Débit limité 60 cycles/h

I.2.3. Apparition des SBS/RS

L'évolution des SBS/RS ne s'est pas faite du jour au lendemain. Elle résulte d'un processus progressif, jalonné d'expérimentations, d'innovations techniques et d'adoptions industrielles successives.

Les sections suivantes retracent les grandes étapes de ce développement, depuis les premières tentatives expérimentales de la fin des années 1990 jusqu'à l'explosion commerciale portée par l'essor du commerce électronique dans les années 2010.

- **Premières expérimentations (1995-2000) :**

Les premières tentatives de développement de systèmes à navettes remontent à la seconde moitié des années 1990.

Le brevet Bellheim, déposé en 1996, constitue l'une des premières descriptions formelles d'une navette guidée au sein d'une structure de rayonnages [7]. En 1998, le fabricant autrichien KNAPP réalise un prototype destiné à l'industrie textile, marquant une première tentative d'application concrète du concept [34].

Cependant, ces expérimentations se heurtent à plusieurs verrous technologiques majeurs qui freinent leur industrialisation : la faible autonomie des batteries embarquées, les limitations des systèmes de communication sans fil de l'époque, et le coût encore prohibitif des moteurs linéaires.

Ces obstacles retardent d'une décennie l'émergence d'une offre commerciale viable.

- **Première génération commerciale (2003-2008) :**

C'est au début desannées 2000 que les SBS/RS franchissent le cap de la commercialisation.

En 2003, Swisslog lance le premier système à navettes commercialisé à grande échelle, capable de traiter des charges allant jusqu'à 50 kg à une vitesse de 2 m/s.

Deux ans plus tard, en 2005, Dematic propose à son tour le système RapidStore, élargissant ainsi l'offre disponible sur le marché. Ces premières solutions présentent néanmoins un surcoût d'environ 30 % par rapport aux systèmes mini-load AS/RS classiques, ce qui limite leur adoption aux entreprises disposant de volumes d'activité suffisants pour justifier cet investissement.

- **Phase de maturation (2008-2012)**

La période 2008-2012 est marquée par une montée en puissance significative des SBS/RS, tant sur le plan des performances que de l'accessibilité économique.

En 2009, Interlake Mecalux introduit le Pallet Shuttle, une solution adaptée aux charges lourdes pouvant atteindre 1 500 kg, étendant ainsi le domaine d'application des systèmes à navettes au-delà des charges légères.

Sur le plan mécanique, des élévateurs rapides atteignant une vitesse de 3 m/s font leur apparition, réduisant sensiblement les temps de transfert vertical. Parallèlement, les coûts d'acquisition diminuent de l'ordre de 15 % en trois ans, rendant ces systèmes progressivement accessibles à un plus grand nombre d'acteurs industriels [8].

- **Explosion liée à l'e-commerce (2012-2016)**

L'essor fulgurant du commerce électronique au cours de cette période constitue le principal moteur de l'adoption massive des SBS/RS à l'échelle mondiale. En 2013, Amazon installe en France un système de grande envergure mobilisant 200 navettes simultanées, illustrant la capacité de ces systèmes à répondre aux exigences de débit et de réactivité propres à la logistique du e-commerce. En 2015, le distributeur

britannique Ocado déploie un entrepôt automatisé gérant 500 000 bacs, établissant un nouveau standard en matière de densité et de volume de stockage automatisé. Sur le plan des performances, les débits atteignent désormais 1 000 cycles par heure, soit près de dix-sept fois la capacité maximale d'un AS/RS classique à transtockeur, confirmant la supériorité opérationnelle des SBS/RS dans les environnements à forte cadence [9].

- **Comparaison technique quantitative :**

Afin de synthétiser les différences de performance entre les AS/RS classiques et les SBS/RS, le tableau 3, établi sur la base des données de, présente une comparaison technique quantitative des deux types de systèmes selon les principaux indicateurs opérationnels [10].

Tableau 3 Comparaison AS/RS vs SBS/RS

Paramètre	AS/RS	SBS/RS
Machines par allée	1	Jusqu'à 20
Temps cycle moyen (s)	90-120	15-25
Densité de stockage	Élevée	Très élevée
Consommationélectrique par bac	Référence	-40%

I.2.4. Avantages des SBS/RS

Les SBS/RS présentent par rapport aux AS/RS classiques des avantages opérationnels et économiques significatifs, qui expliquent leur adoption croissante dans les entrepôts modernes.

Sur le plan du débit, l'apport est considérable.

Grâce au parallélisme massif permis par la flotte de navettes, le débit global du système est multiplié par un facteur de 3 à 5 par rapport à un AS/RS classique à transtockeur, rendant les SBS/RS particulièrement adaptés aux environnements à forte cadence tels que la distribution pharmaceutique ou le commerce électronique.

Sur le plan de la fiabilité, l'architecture distribuée des SBS/RS confère au système une résilience structurelle absente des configurations classiques. En cas de panne d'une navette, seul le niveau concerné est temporairement affecté, tandis que l'ensemble des autres niveaux continue de fonctionner normalement [11].

Cette redondance intrinsèque réduit considérablement le risque d'arrêt total du système et minimise l'impact des défaillances sur la continuité des opérations.

Sur le plan économique enfin, malgré un coût d'investissement initial plus élevé, les SBS/RS offrent un retour sur investissement nettement plus rapide que leurs prédécesseurs. Les études sectorielles estiment ce retour entre 18 et 24 mois pour un SBS/RS, contre 36 à 48 mois pour un AS/RS classique, grâce notamment aux gains de productivité générés et à la réduction des coûts de main-d'œuvre.

I.2.5. Inconvénients et limites actuelles des SBS/RS

Malgré leurs performances indéniables, les SBS/RS présentent un certain nombre de limites qu'il convient de prendre en compte lors de leur dimensionnement et de leur déploiement.

La première limitation est d'ordre architectural. La hauteur maximale des structures SBS/RS est actuellement plafonnée à environ 25 mètres, contre 40 mètres pour les AS/RS classiques à transtockeur.
Cette contrainte s'explique par les exigences mécaniques liées au déplacement des navettes et à la stabilité des rails sur de grandes hauteurs, et limite la capacité de verticalisation du stockage dans les entrepôts à grande hauteur sous plafond [12].
La deuxième limitation concerne la complexité logicielle. L'orchestration d'une flotte de navettes autonomes opérant simultanément sur plusieurs niveaux nécessite des algorithmes de gestion avancés, capables de gérer en temps réel les priorités, les conflits d'accès et la coordination avec l'ascenseur. Cette complexité représente un défi d'ingénierie significatif, tant lors de la conception du système que lors de son exploitation quotidienne — et constitue précisément la problématique centrale abordée dans ce mémoire.
La troisième limitation est d'ordre énergétique et maintenance. Les batteries embarquées dans les navettes ont une durée de vie limitée, nécessitant un remplacement périodique tous les 3 à 5 ans, ce qui génère des coûts de maintenance récurrents à intégrer dans le calcul de la rentabilité globale du système.
Enfin, malgré la baisse progressive observée ces dernières années, le coût initial d'un SBS/RS reste supérieur d'environ 20 % à celui d'un AS/RS classique de capacité comparable [13], ce qui peut constituer un frein pour les entreprises disposant de budgets d'investissement contraints.

I.2.6. Innovations récentes

Le domaine des SBS/RS connaît actuellement une dynamique d'innovation soutenue, portée par les avancées technologiques dans les domaines de la mécanique, de l'électronique et de l'informatique industrielle.
L'une des innovations les plus marquantes est l'apparition, en 2022, de navettes dites à changement de niveau, capables de se déplacer verticalement de manière autonome sans recourir à un ascenseur dédié [14].
Cette avancée remet en question le schéma architectural traditionnel des SBS/RS et pourrait à terme réduire significativement la dépendance au goulot d'étranglement que constitue l'ascenseur — problématique au cœur du présent travail.
Sur le plan énergétique, le rechargement inductif sur rails a été commercialisé, permettant aux navettes de se recharger en continu durant leurs déplacements sans nécessiter d'arrêt dédié [15].
Cette technologie améliore sensiblement le taux d'utilisation des navettes et allonge leur durée de vie opérationnelle.
Par ailleurs, les jumeaux numériques en temps réel se généralisent dans les installations SBS/RS modernes, offrant aux opérateurs une représentation dynamique et fidèle du système permettant la surveillance continue, la détection anticipée des anomalies et l'optimisation des stratégies de gestion des flux.
Le domaine d'application des SBS/RS s'étend également à des environnements extrêmes, avec le développement de systèmes cryogéniques capables d'opérer à des températures allant jusqu'à -20°C, destinés aux entrepôts de surgélation de l'industrie agroalimentaire.
Enfin, ces innovations conjuguées se traduisent par une adoption massive sur le marché : en 2024, 60 %

des nouveaux projets d'entrepôts automatisés optent pour une architecture SBS/RS , confirmant la place dominante que ces systèmes occupent désormais dans le paysage de la logistique moderne.

I.3. Composants clés et fonctionnement des SBS/RS

La compréhension approfondie des SBS/RS nécessite une analyse détaillée de leurs composants constitutifs et de leurs interactions. Un SBS/RS s'articule autour de quatre sous-systèmes interdépendants: les racks et rails, les navettes, les élévateurs, les convoyeurs d'interface, et les systèmes de pilotage informatique . Chacun de ces éléments joue un rôle précis dans le fonctionnement global du système, et leur dimensionnement conditionne directement les performances opérationnelles de l'entrepôt [16].

I.3.1. Architecture générale

L'architecture d'un SBS/RS repose sur l'intégration cohérente de ses quatre sous-systèmes principaux. Les racks et rails constituent la structure physique de stockage, les navettes assurent les déplacements horizontaux au sein de chaque niveau, les élévateurs prennent en charge les transferts verticaux entre niveaux, et les convoyeurs d'interface assurent la liaison entre le système automatisé et les zones de réception et d'expédition.

L'ensemble est piloté par une couche logicielle à deux niveaux, le WCS et le WMS, dont les rôles respectifs seront détaillés dans les sections suivantes [17].

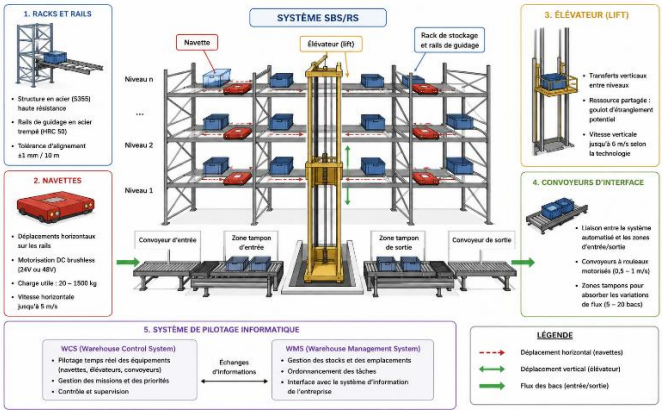


Figure 2 Architecture générale d'un système automatisé SBS/RS

I.3.2. Racks et rails

La structure porteuse d'un SBS/RS est soumise à des contraintes mécaniques importantes, ce qui justifie le recours à des matériaux et des tolérances de fabrication particulièrement rigoureux. Les profilés de rack sont réalisés en acier de qualité S355, dont la limite élastique de 355 MPa garantit la résistance nécessaire aux charges statiques et dynamiques [18].

La tolérance d'alignement des rails est fixée à ±1 mm sur 10 mètres, condition indispensable au bon guidage des navettes à haute vitesse. Sur le plan de la protection, les structures reçoivent un traitement anticorrosion par thermolaquage ou par zingage, selon les conditions environnementales de l'entrepôt. Les rails de guidage, quant à eux, sont en acier trempé de dureté HRC 50, offrant une résistance à l'usure adaptée aux cycles intensifs.

Les efforts dynamiques exercés sur la structure sont calculés selon la relation F{dyn} = 1,5 \times F_{stat}

, le coefficient 1,5 intégrant les effets d'accélération et de décélération des navettes en charge[19].

I.3.3. Navettes : caractéristiques

Les navettes constituent l'élément central et le plus innovant des SBS/RS. Leurs dimensions varient selon les applications : la longueur est généralement comprise entre 600 et 1 200 mm, la largeur entre 300 et 600 mm, et la hauteur entre 150 et 300 mm. La motorisation repose sur des moteurs DC brushless alimentés en 24V ou 48V, offrant un bon compromis entre puissance, compacité et durée de vie.
Les roues sont en polyuréthane, matériau choisi pour ses propriétés d'adhérence et d'amortissement des vibrations sur les rails. La charge utile varie considérablement selon les configurations, de 20 kg pour les systèmes légers jusqu'à 1 500 kg pour les applications de type Pallet Shuttle , couvrant ainsi un large spectre d'applications industrielles [20].

I.3.4. Capteurs embarqués

Afin d'assurer un déplacement précis et sécurisé au sein des rayonnages, chaque navette embarque un ensemble de capteurs complémentaires. Des codeurs optiques assurent la mesure précise de la position de la navette sur le rail, des télémètres laser mesurent les distances aux obstacles et aux emplacements de stockage, des capteurs de charge détectent la présence et le poids des bacs, et des accéléromètres permettent de détecter d'éventuels chocs ou anomalies de déplacement.
Ces capteurs permettent à la navette d'atteindre des vitesses horizontales allant jusqu'à 5 m/s, tout en garantissant la sécurité des opérations et l'intégrité des charges transportées.

I.3.5. Élévateurs (lifts)

L'élévateur est la ressource partagée par l'ensemble des niveaux du système, et constitue, comme nous le verrons dans les chapitres suivants, le principal goulot d'étranglement des SBS/RS. Plusieurs technologies d'élévateurs coexistent sur le marché, chacune adaptée à des contraintes spécifiques de vitesse, de charge et de hauteur, comme le synthétise le tableau 4. Les élévateurs à câbles, fonctionnant par contrepoids, atteignent des vitesses de 4 m/s et sont particulièrement adaptés aux grandes hauteurs.
Les élévateurs à crémaillère, basés sur un principe d'engrenage, offrent une vitesse de 2 m/s et sont privilégiés pour les charges lourdes. Enfin, les élévateurs à moteur linéaire représentent la solution la plus rapide, avec des vitesses pouvant atteindre 6 m/s, destinés aux applications nécessitant un débit vertical maximal [21].

Tableau 4 Typologie des élévateurs

Type	Vitesse (m/s)	Principe	Application
À câbles	4	Contrepoids	Haute hauteur
À crémaillère	2	Engrenage	Charges lourdes
Linéaire	6	Moteur linéaire	Ultra-rapide

I.3.6. Convoyeurs d'interface

Les convoyeurs d'interface assurent la jonction entre le monde extérieur et le cœur du système SBS/RS. Les convoyeurs d'entrée sont de type à rouleaux motorisés, fonctionnant à des vitesses comprises entre 0,5 et 1 m/s [68].
Des zones tampon (buffer) d'une capacité de 5 à 20 bacs sont disposées en amont du système, permettant d'absorber les irrégularités du flux entrant et d'éviter la saturation de l'élévateur.
Les transferts de direction entre convoyeurs sont assurés par des tables pivotantes ou des chariots transversaux, garantissant la fluidité du flux de bacs en entrée comme en sortie du système[22].

I.3.7. WCS (Warehouse Control System)

Le Warehouse Control System (WCS) constitue le niveau de pilotage temps réel du SBS/RS. Il est responsable de l'ordonnancement des opérations à l'échelle de la seconde, en s'appuyant sur des algorithmes d'optimisation — notamment une version modifiée de l'algorithme de Dijkstra pour calculer en permanence les trajets optimaux des navettes et de l'élévateur.
Il gère également les conflits d'accès entre navettes par le biais de zones exclusives, et assure la réaffectation dynamique des ressources en cas de panne d'un équipement. La réactivité du WCS est un critère déterminant pour les performances globales du système : son temps de cycle de traitement est typiquement inférieur à 50 ms, garantissant une prise de décision quasi-instantanée face aux événements du système.

I.3.8. WMS (Warehouse Management System)

Au-dessus du WCS, le Warehouse Management System (WMS) assure le pilotage stratégique de l'entrepôt. Ses fonctions principales incluent l'affectation optimisée des emplacements de stockage selon la méthode ABC, la gestion des inventaires, l'interface avec les systèmes ERP de l'entreprise tels que SAP ou Oracle, et la production de rapports de performance.
Le WMS surveille en temps réel le taux d'occupation des emplacements et les débits opérationnels, fournissant aux responsables logistiques les indicateurs nécessaires à la prise de décision et à l'optimisation continue du système.

I.3.9. Séquence de stockage détaillée

Pour illustrer concrètement le fonctionnement d'un SBS/RS, il est utile de décrire pas à pas la séquence d'une opération de stockage telle que définie par. Lorsqu'un bac arrive sur le convoyeur d'entrée, son identifiant est lu par un système RFID.
Le WMS sélectionne alors un emplacement de stockage disponible — par exemple l'allée 3, niveau 7, position 12 — et transmet l'instruction au WCS. Ce dernier réserve simultanément l'élévateur et la navette du niveau cible. L'élévateur se positionne au niveau 0 pour prendre en charge le bac, pendant que la navette se prépare à le recevoir. L'élévateur monte ensuite jusqu'au niveau 7 à une vitesse de 4 m/s, puis transfère le bac à la navette. Celle-ci se déplace horizontalement à 3 m/s sur une distance de 15 mètres — soit environ 5 secondes — pour atteindre l'emplacement cible et y déposer le bac.
La navette retourne ensuite vers l'élévateur, qui redescend pour traiter l'opération suivante. Cette séquence met en évidence le rôle central et potentiellement limitant de l'élévateur dans le flux des opérations [23].

I.3.10. Séquence de récupération et cas particuliers

La séquence de récupération suit le chemin inverse de celle du stockage, avec un temps de cycle typiquement compris entre 8 et 12 secondes. Dans le cas d'un stockage en double profondeur, un temps supplémentaire d'environ 3 secondes est à prévoir pour accéder au bac situé en position arrière, ce qui illustre le compromis entre densité de stockage et temps d'accès évoqué dans la section 1.4.6. Par ailleurs, le système prévoit un mécanisme de priorité préemptive permettant aux commandes urgentes d'interrompre les cycles en cours, assurant ainsi la réactivité nécessaire dans les environnements à forte contrainte de délai.

I.3.11. Méthodologies de stockage et flux de pièces

Au-delà des composants physiques et logiciels qui constituent l'ossature d'un SBS/RS, les performances réelles d'un tel système dépendent également des stratégies adoptées pour organiser le stockage et gérer les flux de pièces. Ces méthodologies, qui relèvent davantage de l'ingénierie logistique que de la mécanique, jouent un rôle déterminant dans l'exploitation optimale des capacités du système.

I.4. Méthodologies de stockage et flux de pièces

Au-delà des composants physiques et logiciels qui constituent l'ossature d'un SBS/RS, les performances réelles d'un tel système dépendent également des stratégies adoptées pour organiser le stockage et gérer les flux de pièces. Ces méthodologies, qui relèvent davantage de l'ingénierie logistique que de la mécanique, jouent un rôle déterminant dans l'exploitation optimale des capacités du système.

I.4.1. Enjeux des méthodologies

La définition d'une stratégie de stockage efficace repose sur la gestion simultanée de trois objectifs qui s'avèrent souvent contradictoires : maximiser la densité de stockage, maximiser le débit opérationnel, et minimiser la consommation énergétique.

La recherche d'un équilibre entre ces trois impératifs constitue le cœur de la problématique des méthodologies de stockage, et conditionne directement le choix de la stratégie la mieux adaptée à chaque contexte d'exploitation.

I.4.2. Stockage dédié

Le stockage dédié est la stratégie la plus simple conceptuellement : chaque référence produit se voit attribuer un emplacement fixe et unique au sein du système. Cette approche présente des avantages indéniables en termes de simplicité de gestion, de traçabilité et de constance des temps d'accès.

Cependant, elle souffre d'un inconvénient majeur sur le plan de l'efficacité spatiale : le taux d'occupation réel des emplacements se situe généralement entre 40 et 60 %, impliquant un surdimensionnement structurel du système pour faire face aux pics d'activité. Cette stratégie est typiquement retenue pour les stocks de pièces de rechange, où la traçabilité et la certitude de localisation priment sur la densité.

I.4.3. Stockage aléatoire

À l'opposé du stockage dédié, le stockage aléatoire consiste à affecter chaque bac entrant au premier

emplacement libre disponible, sans contrainte de localisation prédéfinie. Cette approche permet d'atteindre des taux d'occupation supérieurs à 85 %, optimisant ainsi l'utilisation de la capacité physique du système. En contrepartie, elle introduit une complexité combinatoire importante dans la gestion des emplacements, la recherche d'un bac particulier pouvant théoriquement conduire à explorer un espace de n états pour n emplacements, ce qui nécessite des algorithmes de recherche performants au niveau du WMS

I.4.4. Méthode ABC (Pareto)

La méthode ABC, dérivée du principe de Pareto, constitue un compromis efficace entre les deux approches précédentes. Elle repose sur le constat empirique que 20 % des références produits — dites de classe A — génèrent 80 % des sorties du système .

Les références de classe B, représentant 30 % des références, contribuent à 15 % des sorties, tandis que les références de classe C, soit 50 % des références, ne représentent que 5 % des mouvements .En affectant les références de classe A aux emplacements les plus accessibles — typiquement les niveaux proches de l'élévateur cette méthode permet de réduire les temps d'accès moyens de 30 à 50 % améliorant significativement le débit global du système [24].

I.4.5. Mise en œuvre de la méthode ABC

La mise en œuvre pratique de la méthode ABC suit un processus structuré en plusieurs étapes. Elle débute par une analyse des données de ventes sur une période de référence de 12 mois, permettant de classer les références selon leur fréquence de sortie.

Les racks sont ensuite découpés physiquement en zones A, B et C, et un algorithme d'affectation assigne chaque référence à la zone correspondante. Ce classement n'est pas figé : une matrice de transition permet de suivre l'évolution des classes dans le temps et de procéder à des reclassements périodiques, assurant ainsi l'adéquation permanente entre la localisation physique des produits et leurs fréquences de rotation réelles

I.4.6. Double profondeur et multi-fond

Afin d'accroître la densité de stockage au-delà de ce que permet le stockage simple, des configurations en double profondeur ou multi-fond peuvent être adoptées. En double profondeur, deux bacs sont stockés en série sur le même emplacement, doublant ainsi la capacité de stockage par allée.

Cette densification a cependant un coût opérationnel : l'accès au bac situé en position arrière nécessite de déplacer préalablement le bac avant, ce qui augmente le temps d'accès d'environ 40 %. Le multi-fond, qui peut atteindre jusqu'à 4 bacs en série, est réservé aux références à très faible rotation, communément appelées stocks morts, pour lesquelles la fréquence d'accès est trop faible pour que ce surcoût temporel soit pénalisant.

I.4.7. Schéma global des flux

Le flux global de pièces au sein d'un entrepôt SBS/RS suit une séquence logique et structurée, décrite par réception des marchandises, contrôle quantitatif et qualitatif, mise en bac, stockage dans le SBS/RS, préparation des commandes (picking), re-stockage partiel des bacs non entièrement consommés, puis expédition.

Chacune de ces étapes fait l'objet d'une optimisation spécifique, dont les principales sont détaillées dans les sections suivantes.

I.4.8. Détail – réception à stockage

La phase de réception constitue le point d'entrée du flux dans le système. Elle comprend le déchargement des marchandises et leur vérification quantitative et qualitative. Les produits sont ensuite conditionnés dans des bacs standardisés, dont les dimensions typiques sont de 600 × 400 mm. Avant d'entrer dans le SBS/RS, les bacs transitent par un convoyeur équipé d'un système de pesée dynamique, permettant de vérifier la conformité du poids et de détecter d'éventuelles anomalies de chargement.
Une zone tampon d'entrée, d'une capacité de 10 à 20 bacs, précède le système et permet d'absorber les variations du flux entrant sans perturber le fonctionnement de l'élévateur.

I.4.9. Flux de préparation (picking)

La préparation des commandes, ou picking, représente l'une des opérations les plus critiques en termes de débit et de qualité de service. Deux modes principaux coexistent dans les entrepôts SBS/RS modernes : le picking par zone, dans lequel un bac est extrait du système, partiellement prélevé, puis réintégré ; et le picking par vague (wave picking), qui consiste à regrouper simultanément de 20 à 50 commandes pour les traiter en une seule séquence d'extraction. Un poste de picking typique associe un écran d'affichage, un lecteur de codes-barres, une balance de contrôle et un contenant dédié à la commande en cours.Les cadences atteintes dans ces configurations sont de l'ordre de 300 à 600 lignes par heure et par opérateur.

I.4.10. Méthodes avancées d'optimisation

Au-delà des stratégies de stockage fondamentales, plusieurs méthodes avancées permettent d'améliorer encore les performances d'un SBS/RS. Le look-ahead, ou pré-positionnement anticipé des navettes, réduit la latence des opérations de l'ordre de 20 % en préparant les ressources avant même que la commande ne soit officiellement déclenchée.
Le cross-docking permet d'éviter entièrement l'étape de stockage pour certains flux à forte rotation, en transférant directement les marchandises de la réception vers l'expédition. Le batch picking optimise la préparation en traitant plusieurs commandes simultanément au cours d'une même séquence d'extraction.
Enfin, la zonation dynamique ajuste en temps réel la classification ABC des références en fonction de la saisonnalité et des tendances de consommation, garantissant une adéquation permanente entre la localisation des produits et les besoins opérationnels du moment.

I.4.11. Indicateurs clés de performance

L'évaluation des performances d'un SBS/RS s'appuie sur un ensemble d'indicateurs clés (KPI) permettant de mesurer l'efficacité opérationnelle du système de manière objective et continue. Les principaux indicateurs suivis sont le taux de rotation des stocks — rapport entre les ventes et le stock moyen — le nombre de déplacements par bac, et le temps moyen de cycle intégrant les phases de stockage et de récupération [25].
Une revue périodique de ces indicateurs, recommandée sur une base annuelle, permet d'identifier les dérives de performance et d'ajuster en conséquence les stratégies de gestion

I.5. Conclusion

Ce premier chapitre a permis de poser les fondements théoriques et conceptuels nécessaires à la compréhension du travail développé dans ce mémoire. L'évolution historique des AS/RS vers les SBS/RS a mis en évidence une rupture technologique majeure, portée par le passage du mono-acteur au parallélisme massif des navettes, permettant des débits trois à cinq fois supérieurs. L'analyse de l'architecture et des composants clés d'un SBS/RS a par ailleurs révélé le rôle central de l'élévateur, ressource partagée et non redondante, dont la saturation constitue le principal facteur limitant des performances globales du système problématique au cœur du présent travail.

Enfin, les méthodologies de stockage présentées illustrent la richesse des leviers disponibles pour optimiser l'exploitation d'un tel système, depuis la classification ABC jusqu'aux techniques avancées de pré-positionnement et de zonation dynamique. Ces éléments constituent le socle sur lequel repose la démarche de simulation et d'analyse développée dans les chapitres suivants

Chapitre II

Simulation et analyse des performances du système SBS/RS

Fort des bases théoriques établies dans le chapitre précédent, ce chapitre constitue le cœur de la contribution de ce mémoire. Il est entièrement consacré à la simulation du système SBS/RS à l'aide du logiciel *Arena Simulation Software*, outil retenu pour sa robustesse, sa flexibilité et sa capacité à reproduire fidèlement le comportement dynamique de systèmes logistiques complexes.
Dans un premier temps, le logiciel Arena est présenté et comparé à FlexSim, autre outil de référence dans le domaine de la simulation industrielle, afin de justifier le choix effectué. Le système SBS/RS est ensuite modélisé sous Arena, en définissant les entités, les ressources, les hypothèses de fonctionnement et la logique opérationnelle qui régissent les cycles de stockage et de déstockage.
Dans un second temps, deux algorithmes de gestion des flux sont proposés, tous deux fondés sur le principe du regroupement des charges au niveau de l'ascenseur, ressource identifiée comme le principal goulot d'étranglement du système. Le premier algorithme opère un regroupement par seuil de quantité, tandis que le second repose sur un regroupement à intervalles de temps fixes. Ces algorithmes sont implémentés directement dans le modèle de simulation, permettant leur évaluation et leur comparaison dans des conditions contrôlées.
Enfin, une animation tridimensionnelle du système est réalisée à l'aide du logiciel *CATIA*, offrant une représentation visuelle et réaliste du fonctionnement du SBS/RS simulé.

II.1. Choix et présentation de l'outil de simulation : Arena Simulation software

La simulation par événements discrets constitue aujourd'hui l'approche la plus adaptée pour analyser et évaluer les performances de systèmes logistiques automatisés tels que les SBS/RS. Elle permet de reproduire fidèlement le comportement dynamique du système, de tester différents scénarios opérationnels et d'identifier les goulots d'étranglement, sans perturber un système réel.
Parmi les logiciels de simulation disponibles sur le marché, deux outils se distinguent particulièrement dans le domaine industriel et académique : *Arena Simulation Software* et *FlexSim*.
Afin de justifier le choix de l'outil utilisé dans ce travail, une présentation comparative de ces deux logiciels est proposée, mettant en évidence leurs caractéristiques respectives, leurs domaines de prédilection et leurs avantages pour la simulation des SBS/RS.
Le choix s'est porté sur *Arena Simulation Software* pour deux raisons principales. D'une part, ce logiciel est particulièrement adapté à la modélisation de systèmes à événements discrets orientés flux, ce qui correspond précisément à la nature du système étudié.
D'autre part, et de manière déterminante, le laboratoire MELT dispose d'une licence *Arena*, garantissant ainsi un accès complet à l'ensemble des fonctionnalités du logiciel tout au long de ce projet.

II.1.1. Présentation d'Arena et FlexSim

La simulation par événements discrets (*Discrete Event Simulation*, DES) est une approche méthodologique largement adoptée pour l'analyse et l'évaluation des performances des systèmes logistiques complexes. Elle repose sur la modélisation du système comme une succession d'événements discrets dans le temps, permettant de reproduire fidèlement les interactions entre entités, ressources et processus.

Dans le domaine des systèmes de stockage automatisés, cette approche offre la possibilité de tester différentes configurations et stratégies de gestion sans recourir à un prototype physique coûteux. Parmi les logiciels de simulation par événements discrets les plus répandus dans les milieux industriel et académique, *Arena Simulation Software* et *FlexSim* occupent une place de premier plan. Les sections suivantes en présentent les caractéristiques respectives.

II.1.2. Définition et caractéristiques d'Arena

Arena Simulation Software est un logiciel de simulation par événements discrets développé par Rockwell Automation. Issu de la fusion du langage de simulation SIMAN et de l'environnement graphique Cinema en 1991, il s'est imposé comme l'un des outils de référence dans l'enseignement et l'industrie pendant plus de deux décennies.

Son interface graphique repose sur une approche modulaire de type flowchart, dans laquelle les flux de matières, les ressources et les processus sont modélisés par un assemblage de modules prédéfinis, tels que Create, Process, Decide, Request ou Transport, interconnectés de manière logique et séquentielle.

Cette approche rend la prise en main du logiciel accessible, tout en offrant une grande flexibilité pour la modélisation de systèmes de complexité variable. Arena est particulièrement adapté à la simulation de systèmes de production, de logistique et de stockage automatisé, grâce à ses capacités d'analyse statistique avancée et à son intégration native avec des outils bureautiques tels qu'Excel et Access.

II.1.3. Définition et caractéristiques de FlexSim

FlexSim est un logiciel de simulation industrielle développé par FlexSim Software Products, fondé en 1993 et intégré depuis 2023 à l'écosystème Autodesk. Contrairement à Arena, FlexSim repose nativement sur une architecture tridimensionnelle, offrant dès sa prise en main une visualisation 3D immersive et réaliste des systèmes modélisés.

Son moteur de simulation est fondé sur le langage C++, auquel s'ajoute un langage de script propriétaire appelé FlexScript, permettant une personnalisation poussée des comportements des objets et des logiques de décision. FlexSim excelle dans la modélisation de systèmes intralogistiques complexes, tels que les entrepôts automatisés, les chaînes d'approvisionnement et les lignes de production, grâce à sa bibliothèque d'objets 3D préparamétrés et à sa capacité à intégrer des données en temps réel issues de systèmes ERP. Sa version la plus récente, la version 24.x, témoigne d'un développement actif et d'une adoption industrielle en progression constante.

II.1.4. Avantages des deux logiciels pour la simulation des systèmes SBS/RS

Les deux logiciels présentent des atouts complémentaires pour la simulation des systèmes SBS/RS, comme le synthétise le tableau comparatif 5.

Du côté d'*Arena*, les principaux avantages résident dans la clarté de sa modélisation orientée processus, la richesse de ses outils d'analyse statistique et sa facilité de prise en main, qui en font un outil particulièrement efficace pour l'évaluation quantitative des performances : temps de cycle, taux d'utilisation des ressources, temps d'attente, dans des modèles de complexité intermédiaire.

Du côté de *FlexSim*, la visualisation 3D native constitue un atout majeur pour la représentation réaliste des flux physiques et la communication des résultats, tandis que la puissance de son moteur de simulation le rend particulièrement adapté aux modèles de grande envergure intégrant de nombreuses interactions entre équipements.

Dans le cadre de ce projet, le choix s'est porté sur *Arena Simulation Software* pour deux raisons fondamentales. D'une part, ses capacités de simulation par événements discrets et d'analyse statistique sont parfaitement adaptées aux objectifs poursuivis, à savoir l'évaluation et la comparaison des performances de différentes stratégies de gestion de l'ascenseur.

D'autre part, le laboratoire MELT dispose d'une licence *Arena*, ce qui a permis d'exploiter l'intégralité des fonctionnalités du logiciel dans des conditions optimales tout au long de ce projet.

Au terme de cette comparaison, il apparaît que les deux logiciels présentent des atouts réels pour la simulation des systèmes SBS/RS. *Arena* se distingue par la clarté de sa modélisation orientée processus et la richesse de ses outils d'analyse statistique, tandis que *FlexSim* offre une visualisation 3D native particulièrement adaptée à la représentation réaliste des flux physiques.

Dans le cadre de ce projet, le choix s'est naturellement porté sur *Arena Simulation Software*. Ses capacités de simulation par événements discrets sont parfaitement adaptées aux objectifs poursuivis, et le laboratoire MELT dispose d'une licence Arena, permettant d'exploiter l'intégralité de ses fonctionnalités dans des conditions optimales.

II.2. Modélisation du système SBS/RS sous Arena

La modélisation constitue le point de départ de toute démarche de simulation. Avant de pouvoir évaluer et comparer les stratégies de gestion de l'ascenseur, il est indispensable de construire un modèle Arena qui représente fidèlement la structure physique et la logique opérationnelle du système SBS/RS étudié. Cette section présente successivement la description générale du système modélisé, les hypothèses retenues, la définition des entités et des ressources, la logique de fonctionnement du cycle de stockage et de déstockage, et enfin les trois configurations de taille variable sur lesquelles les simulations ont été conduites.

II.2.1. Description générale du système modélisé

La modélisation du système SBS/RS sous *Arena Simulation Software* constitue l'étape fondatrice de ce travail. Elle vise à reproduire fidèlement le comportement dynamique du système en intégrant l'ensemble des flux physiques, des contraintes opérationnelles et des interactions entre équipements, de manière à Obtenir un modèle représentatif sur lequel les stratégies de gestion de l'ascenseur pourront être testées et

évaluées de manière rigoureuse.

Tableau 5 comparison entre arena et flexsim

Critère	Arena	FlexSim
Origines	Né en 1991 de la fusion de SIMAN (1983) et Cinema. Pionnier de la modélisation par processus graphiques.	Fondé en 1993 (F&H Simulations), premier logiciel FlexSim lancé en 2003.
Editeur actuel	Rockwell Automation (rachat en 2000)	FlexSim Software Products intégré à l'écosystème Autodesk depuis 2023
Moment de gloire	Dominant des années 1990 aux années 2000 : référence académique mondiale.	Montée en puissance à partir de 2003, forte adoption industrielle dans les années 2010.
Type de simulation	Événements discrets (DES), flux de production, modélisation orientée processus.	Événements discrets (DES), scénarios what-if, flux continus et systèmes complexes.
Visualisation	Historiquement en 2D, avec support 3D dans les versions récentes.	3D native dès le départ, rendu immersif en temps réel.
Langage de modélisation	BasésurSIMAN,interface glisser- déposer avec modules (Create, Process, Decide…).	Basé sur le C++ avec logique objet orientée 3D.
Facilité d'accès	Très accessible aux débutants, largement utilisé en pédagogie.	Accessible mais plus technique lors de la prise en main initiale
Complexité des modèles	Adapté aux modèles simples à intermédiaires, gestion plus difficile des système très complexes.	Très performant pour les modèles complexes.
Evolution récente	Version 16.20 (2022), évolution ralentie	Version 24.x récente, développement actif

Positionnement académique	Toujours présent dans les cursus	Progression notable dans l'enseignement
Note utilisateurs	4,1/5	4,4/5
Segments clients	Principalement petites structures	Principalement grandes entreprises

Le système modélisé est composé de quatre types d'éléments interconnectés, dont les interactions déterminent les performances globales du système :

Les **navettes** (*shuttles*) assurent les déplacements horizontaux des unités de charge au sein de chaque niveau de stockage. Chaque navette est dédiée à un niveau et opère de manière indépendante des navettes des autres niveaux, conférant au système son caractère parallèle et flexible.

Les **ascenseurs** (*lifts*) assurent les transferts verticaux des charges entre les différents niveaux du système. Partagés par l'ensemble des niveaux, ils constituent la ressource la plus sollicitée du système et représentent, comme nous le verrons dans les résultats, le principal goulot d'étranglement.

Les **convoyeurs** assurent l'alimentation du système en charges entrantes et l'évacuation des charges sortantes, faisant office d'interface entre le SBS/RS et l'environnement extérieur de l'entrepôt.

Les **racks de stockage**, structurés en niveaux, allées et casiers, constituent la structure physique d'accueil des charges. Chaque casier est identifié de manière unique et son état — occupé ou libre — est suivi en temps réel au cours de la simulation.

II.2.2. Hypothèses de modélisation

Toute simulation repose sur un ensemble d'hypothèses simplificatrices, nécessaires pour rendre le modèle tractable tout en préservant sa pertinence et sa représentativité. Dans le cadre de ce travail, les hypothèses suivantes ont été retenues :

Les **temps de déplacement** des navettes et des ascenseurs sont supposés constants ou suivent une loi déterministe. Cette hypothèse permet de maîtriser la variabilité introduite dans le modèle et de concentrer l'analyse sur l'impact des stratégies de gestion plutôt que sur les aléas mécaniques.

Les **pannes des équipements** ne sont pas prises en compte. Le système est supposé fonctionner en régime nominal tout au long de la simulation, sans interruption due à des défaillances matérielles.

Chaque **navette** transporte une seule unité de charge à la fois, conformément au fonctionnement standard des SBS/RS étudiés dans la littérature.

Les **files d'attente** sont supposées de capacité illimitée, afin de ne pas introduire de contrainte artificielle sur l'accumulation des charges en attente de traitement.

Les **opérations de chargement et de déchargement** ont une durée fixe, indépendante de la charge ou de la position dans le rack.

Ces hypothèses, bien qu'elles constituent une simplification de la réalité, sont cohérentes avec les modèles de simulation SBS/RS rencontrés dans la littérature et permettent d'isoler l'effet des stratégies de gestion de l'ascenseur sur les performances du système.

II.2.3. Définition des entités

Dans le formalisme de la simulation par événements discrets sous Arena, les **entités** représentent les objets qui circulent dans le système et déclenchent les événements au cours de leur traitement. Dans le cadre de ce modèle, les entités correspondent aux unités de charge palettes ou bacs ainsi qu'aux demandes de stockage et de déstockage qui leur sont associées.

Chaque entité est caractérisée par un ensemble d'attributs qui déterminent son comportement tout au long de son cycle de vie dans le système :

Le **temps d'arrivée** dans le système, qui détermine l'instant auquel la charge entre dans le flux de simulation et commence à solliciter les ressources.

- La **position actuelle**, qui reflète l'emplacement de la charge à chaque instant de la simulation convoyeur d'entrée, ascenseur, navette, ou casier de stockage.

La **destination cible**, qui correspond à l'emplacement de stockage attribué à la charge lors de son entrée dans le système, ou au point de sortie lors du déstockage.

Le **type d'opération**, qui distingue les opérations de stockage charges entrantes à placer dans un casier libre des opérations de déstockage charges à extraire d'un casier occupé et à acheminer vers la sortie.

II.2.4. Ressources du système

Les **ressources** représentent dans Arena les moyens matériels mis à disposition des entités pour leur traitement. Leur disponibilité et leur taux d'utilisation sont des indicateurs clés pour l'identification des goulots d'étranglement. Dans le modèle développé, trois types de ressources sont définis :

Les **navettes**, au nombre de six dans la configuration simulée, assurent les déplacements horizontaux des charges au sein de chaque niveau. Chaque navette est associée à un réseau de transport dédié (*Shuttle.Network*) composé de 24 liaisons, définissant l'ensemble des trajets autorisés entre les stations du niveau correspondant.
Les **ascenseurs**, au nombre de trois dans la configuration simulée, assurent les transferts verticaux des charges entre les niveaux. Ils sont associés à un réseau de transport spécifique (*Ascenseur.Network*) composé de 12 liaisons. Étant partagés par l'ensemble des niveaux et des navettes, ils constituent la ressource la plus critique du système, dont la gestion efficace est l'objet central de ce travail.
Les **convoyeurs** assurent la circulation des charges en entrée et en sortie du système. Ils sont modélisés comme des zones de transit à débit constant, alimentant le système en nouvelles charges et évacuant les charges déstockées vers les zones de préparation ou d'expédition.

II.2.5. Configurations simulées

Afin d'évaluer les performances des algorithmes proposés dans des conditions variées et d'apprécier leur comportement face à différentes échelles de charge, trois configurations de SBS/RS ont été simulées, se distinguant par leur taille, leur capacité de stockage et leur nombre de ressources.

Configuration 1 : Système de petite taille (24 emplacements)

La première configuration constitue le modèle de base, de petite taille, utilisé pour valider la logique de simulation et analyser le comportement du système dans des conditions maîtrisées. Elle comprend 6 racks organisés en paires, chaque paire étant desservie par un ascenseur commun, soit 3 ascenseurs au total. Chaque rack comporte 2 niveaux, chacun desservi par une navette dédiée, portant le nombre total de navettes à 6. Chaque niveau est équipé de 4 casiers de stockage, répartis en 2 emplacements à droite et 2 emplacements à gauche de l'ascenseur, pour une capacité totale de 24 emplacements.

Configuration 2 : Système de taille intermédiaire (160 emplacements)

La deuxième configuration représente un système de taille intermédiaire, permettant d'observer le comportement des algorithmes dans des conditions de charge plus importantes. Elle comprend 4 ascenseurs, chacun desservant un ensemble de racks comportant 4 niveaux. Chaque niveau est équipé de 10 casiers de stockage, répartis en 5 emplacements à droite et 5 emplacements à gauche, et est desservi par une navette dédiée, portant le nombre total de navettes à 16. La capacité totale de cette configuration est de 160 emplacements.

Configuration 3 : Système de grande taille (500 emplacements)

La troisième configuration représente un système de grande envergure, proche des installations industrielles réelles, permettant d'évaluer le comportement des algorithmes dans des conditions de forte charge et de sollicitation intensive de l'ascenseur. Elle comprend 5 ascenseurs, 10 niveaux par ascenseur et 10 casiers par niveau, chaque niveau étant desservi par une navette dédiée, portant le nombre total de

navettes à 50. La capacité totale de cette configuration est de 500 emplacements.

Tableau 6 synthétise les caractéristiques des trois configurations simulées.

Configuration	Emplacements	Ascenseurs	Niveaux	Navettes	Casiers/niveau
Petite taille	24	3	2	6	4
Taille intermédiaire	160	4	4	16	10
Grande taille	500	5	10	50	10

II.2.6. Logique de fonctionnement

Le cycle de fonctionnement du système simulé s'articule autour de deux opérations principales : le stockage et le déstockage, dont les logiques sont formalisées ci-dessous sous forme algorithmique.

Processus de stockage :

Les charges arrivent dans le système via le convoyeur d'entrée à un rythme constant, défini par un temps d'inter-arrivée fixe. Pour chaque charge créée, un emplacement libre est sélectionné aléatoirement parmi les casiers disponibles. La charge est ensuite prise en charge par l'ascenseur pour être transportée jusqu'au niveau correspondant, puis confiée à la navette du niveau pour être acheminée jusqu'au casier cible. À chaque opération de stockage, l'état du casier est mis à jour dans le tableau de variables du modèle, et le taux global d'occupation du système est recalculé.

Algorithme 1 : Processus de stockage

Entrée : Charge C arrivant sur le convoyeur d'entrée
Sortie : Charge C stockée dans un casier libre

1 : Générer la charge C avec un temps d'inter-arrivée fixe
2 : Rechercher un casier libre p dans le tableau d'état
3 : Si aucun casier libre n'est disponible alors
4 : Mettre C en attente jusqu'à libération d'un casier
5 : Fin Si
6 : Affecter la position p à la charge C
7 : Marquer le casier p comme occupé : état(p) ← 1
8 : Demander l'ascenseur correspondant au niveau de p
9 : Transporter C verticalement vers le niveau cible
10 : Libérer l'ascenseur
11 : Demander la navette du niveau cible
12 : Transporter C horizontalement vers le casier p
13 : Déposer C dans le casier p
14 : Libérer la navette

15 : Mettre à jour le taux d'occupation global du système
16 : Si taux d'occupation ≥ 75 % alors
17 : Activer le mode déstockage
18 : Fin Si

Déclenchement du déstockage :

Lorsque le taux d'occupation du système atteint ou dépasse le seuil de 75 %, le mode de déstockage est automatiquement activé. Ce seuil a été retenu afin de maintenir le système dans un état de charge suffisamment élevé pour solliciter intensivement l'ascenseur, tout en évitant la saturation complète du système. Des demandes de sortie sont alors générées de manière aléatoire, chacune ciblant un casier occupé sélectionné aléatoirement parmi les emplacements disponibles.

Processus de déstockage :

La navette du niveau concerné extrait la charge de son casier et la transfère vers le point de sortie du niveau. L'ascenseur prend ensuite en charge la charge pour l'acheminer vers le convoyeur de sortie. L'état du casier est mis à jour et le taux d'occupation est recalculé en conséquence.

Algorithme 2 : Processus de déstockage

Entrée : Demande de sortie d ciblant un casier occupé p
Sortie : Charge C extraite et évacuée vers le convoyeur de sortie

1 : Générer une demande de déstockage d
2 : Sélectionner aléatoirement un casier occupé p : état(p) = 1
3 : Vérifier que le casier p contient bien une charge C
4 : Si casier p vide alors
5 : Générer une nouvelle demande et retourner à l'étape 2
6 : Fin Si
7 : Marquer le casier p comme en cours de traitement
8 : Demander la navette du niveau de p
9 : Déplacer la navette jusqu'au casier p
10 : Extraire la charge C du casier p
11 : Marquer le casier p comme libre : état(p) ← 0
12 : Transporter C horizontalement vers le point de sortie du niveau
13 : Libérer la navette
14 : Demander l'ascenseur
15 : Transporter C verticalement vers le convoyeur de sortie
16 : Libérer l'ascenseur
17 : Evacuer C hors du système
18 : Mettre à jour le taux d'occupation global du système

Collecte des indicateurs de performance :

Tout au long de la simulation, les indicateurs de performance sont collectés en continu pour chaque opération de stockage et de déstockage. Les principaux indicateurs suivis sont le temps d'attente devant l'ascenseur, le temps d'attente devant les navettes, le temps total de transport par charge, et le taux d'utilisation de chaque ressource. Ces données constituent la base de l'analyse comparative des algorithmes de gestion présentée dans le chapitre 3.

II.2.7. Mise en œuvre de la simulation et paramètres d'exécution

Cette section présente la mise en œuvre concrète du modèle de simulation développé sous Arena Simulation Software. Après avoir défini les entités, les ressources, les hypothèses et la logique opérationnelle du système SBS/RS, il s'agit ici d'illustrer la traduction de ces éléments en un modèle exécutable. Les différents modules Arena mobilisés sont présentés successivement, en suivant le cheminement logique d'une charge depuis son entrée dans le système jusqu'à son stockage effectif, puis lors de son extraction. Cette présentation permet de vérifier la cohérence entre la logique de fonctionnement décrite précédemment et son implémentation réelle dans l'environnement de simulation.
La figure 1 présente une vue globale du modèle de simulation développé sous Arena Simulation Software. Elle illustre l'architecture complète du modèle, en mettant en évidence les deux flux principaux du système — stockage et déstockage — ainsi que les interactions entre les trois types de ressources mobilisées : les ascenseurs, responsables des transferts verticaux entre niveaux ; les navettes, assurant les déplacements horizontaux au sein de chaque niveau ; et les convoyeurs, constituant l'interface entre le système et son environnement extérieur. Cette vue d'ensemble permet d'appréhender la cohérence globale du modèle avant d'en détailler les composants module par module dans les sections suivantes.

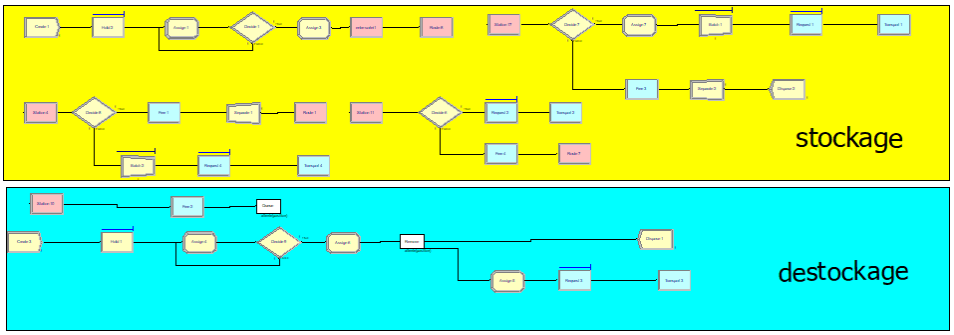


Figure 3 Modéle Arena du système SBS/RS

II.2.7.1. Les modules Create

Le modèle comporte deux modules *Create*, chacun jouant un rôle distinct dans la logique de simulation.
Le **premier module Create** génère les entités représentant les charges à stocker. Ces entités entrent dans le système dès le début de la simulation, à partir du temps t = 0, selon un temps d'inter-arrivée fixe T{ia}, garantissant un flux d'entrée constant et maîtrisé tout au long de la simulation.
Le **second module Create** génère des entités fictives représentant les requêtes de déstockage. Ces entités n'ont pas de réalité physique propre : elles symbolisent les demandes de sortie de charges du système. Le temps d'inter-arrivée de ce second module est identique à celui du premier, T{ia}, ce qui garantit un taux

de charge constant et symétrique entre les opérations de stockage et de déstockage.
La date de première création de ce second module est définie non pas à t = 0, mais selon la formule suivante :

$$T_{debut}=T_{in} \times C \times 0.75$$

C désigne la capacité totale du système en nombre de casiers. Cette formulation garantit que les premières requêtes de déstockage ne sont générées qu'à partir du moment où le système a atteint un taux d'occupation de 75 % de sa capacité, assurant ainsi la cohérence entre l'état réel du système et le déclenchement des opérations de sortie.

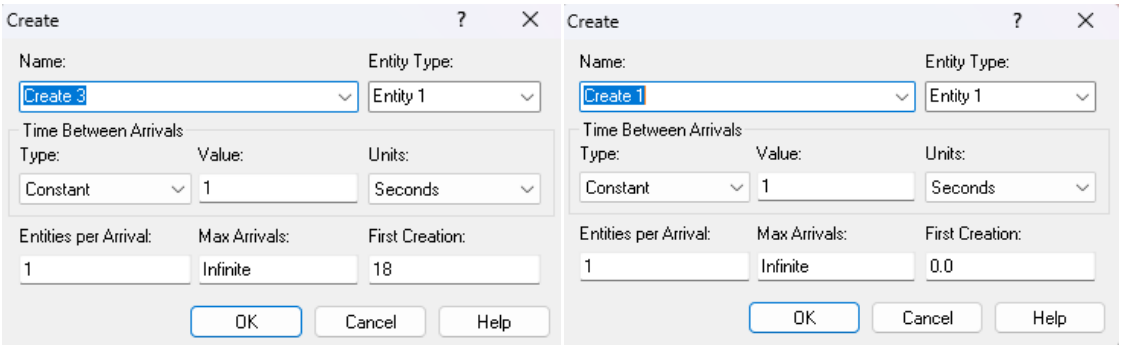


Figure 4 Les modules Create

II.2.7.2. Les modules Assign

Le modèle Arena comporte six modules Assign, chacun assurant une fonction précise dans la gestion des attributs des entités et de l'état du système.
Module Assign 1 — Affectation aléatoire d'un emplacement de stockage
Ce module affecte à chaque charge entrante un emplacement de stockage cible, sélectionné aléatoirement parmi l'ensemble des casiers du système selon l'expression suivante :
p=AINT(UNIF(1,C+1))p=AINT(UNIF(1,C+1))
Où C désigne la capacité totale du système en nombre de casiers. La fonction :
UNIF(1,C+1)UNIF(1,C+1)
génère un nombre réel uniformément distribué sur l'intervalle [1, C+1[[1, C+1[
la fonction AINT en extrait la partie entière, garantissant ainsi que chaque casier dispose d'une probilité égale d'être sélectionné.
Module Assign 2 — Marquage d'un emplacement comme occupé
Une fois l'emplacement validé comme libre, ce module met immédiatement à jour l'état du tableau d'occupation en affectant la valeur 1 à la case correspondante :
test(p)←1
Cette mise à jour est effectuée avant le déclenchement du transport de la charge vers son casier, garantissant qu'aucune autre charge ne puisse être affectée au même emplacement pendant la durée du transport.
Module Assign 3 — Affectation aléatoire d'un emplacement de déstockage

De manière symétrique au module Assign 1, ce module affecte à chaque requête de déstockage un emplacement source, sélectionné aléatoirement parmi les casiers occupés du système selon la même expression

L'emplacement sélectionné est ensuite vérifié : si le casier est effectivement occupé, la requête de déstockage lui est assignée. Dans le cas contraire, une nouvelle valeur est générée jusqu'à l'identification d'un casier occupé.

Module Assign 4 — Marquage du second passage

Ce module affecte à l'attribut passage la valeur 2, signalant qu'une entité effectue un second passage à une station donnée. Cette distinction permet au modèle de différencier, à l'arrivée à une station partagée, les entités en cours de stockage de celles en cours de déstockage, et d'orienter leur traitement en conséquence.

Module Assign 5 — Libération d'un emplacement de stockage

À l'issue d'une opération de déstockage, ce module remet à 0 l'état de l'emplacement

dans le tableau d'occupation :

test(p)←0

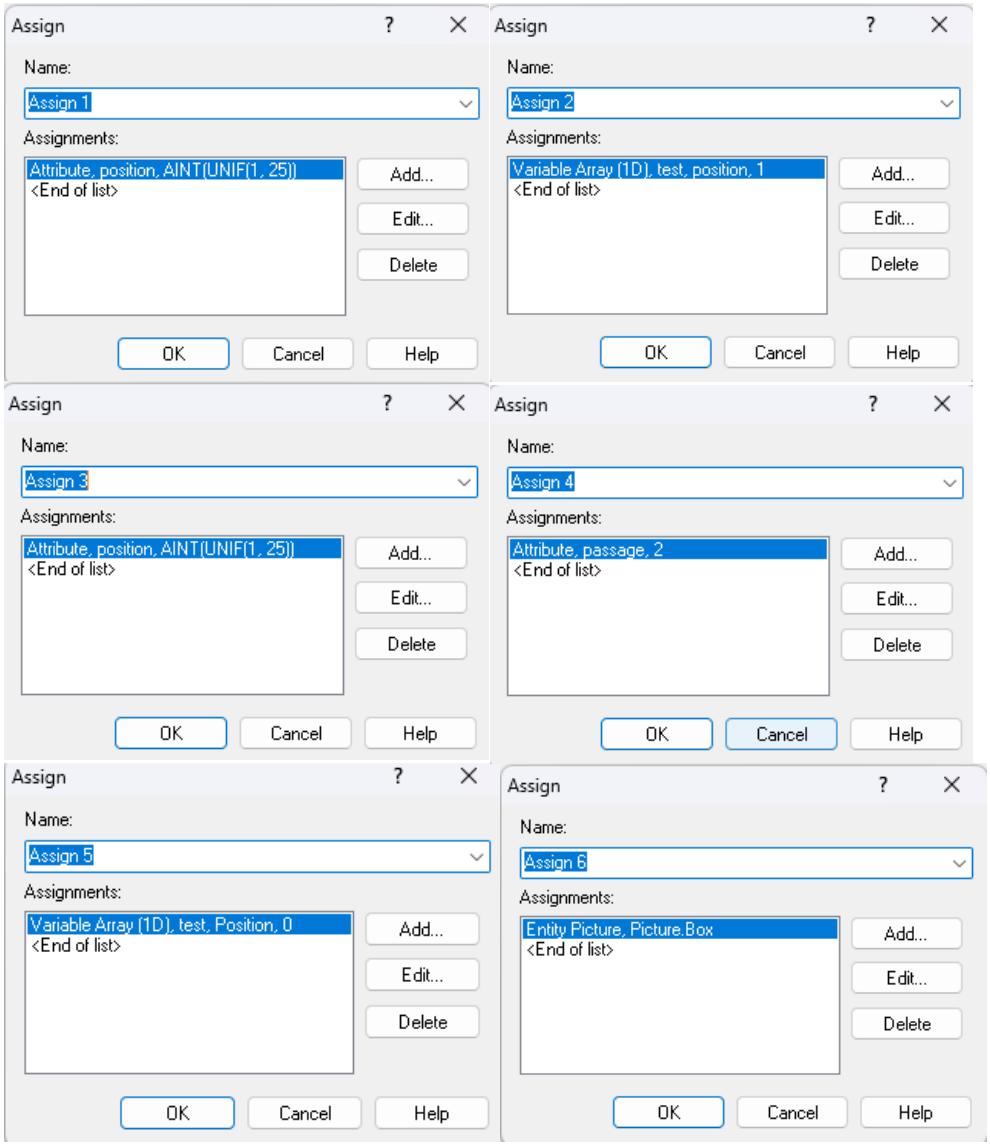


Figure 5 Les modules Assign

II.2.7.3. Les modules Decide

Le modèle Arena comporte cinq modules Decide, jouant un rôle central dans le contrôle du flux des entités et la cohérence de l'état du système.

Module Decide 1 — Vérification de la disponibilité d'un emplacement de stockage

Placé immédiatement du module Assign 1, ce module vérifie si l'emplacement p sélectionné aléatoire est effectivement libre, en testant la condition suivante :

test(p)==0

Si la condition est vérifiée, c'est-à-dire si le casier est libre, la charge est acceptée et le processus de transport vers cet emplacement est déclenché. Dans le cas contraire, l'entité est renvoyée vers le module Assign 1 pour qu'un nouvel emplacement soit sélectionné. Cette boucle se répète jusqu'à l'identification

d'un casier disponible, garantissant qu'aucune charge ne soit assignée à un emplacement déjà occupé.

Modules Decide 2, Decide 3 et Decide 4 — Contrôle du passage dans les stations partagées

Ces trois modules assurent une fonction identique à des points stratégiques du modèle : ils permettent de distinguer, à l'arrivée d'une entité dans une station partagée, s'il s'agit d'un premier ou d'un second passage, en testant la condition suivante :

passage≠2

Si la condition est vérifiée, l'entité effectue son premier passage dans la station : elle est orientée vers le flux de déstockage. Dans le cas contraire, la valeur passage = 2, affectée préalablement par le module Assign 4, indique qu'il s'agit d'un second passage correspondant à une opération de stockage, et l'entité est orientée en conséquence vers le flux approprié. Cette logique permet au modèle de gérer correctement les stations partagées entre les deux types d'opérations au sein d'une même structure de routage.

Module Decide 5 — Vérification de l'occupation d'un emplacement de déstockage

Placé immédiatement en aval du module Assign 3, ce module joue un rôle symétrique à celui du module Decide 1, mais pour les opérations de déstockage. Il vérifie si l'emplacement p sélectionné aléatoirement contient effectivement une charge, en testant la condition suivante :

test(p)==1

Si la condition est vérifiée, la requête de déstockage est acceptée et le processus d'extraction de la charge est déclenché. Dans le cas contraire, l'entité est renvoyée vers le module Assign 3 pour qu'un nouvel emplacement occupé soit sélectionné. Cette boucle garantit qu'aucune opération de déstockage ne soit déclenchée sur un casier vide, assurant ainsi la cohérence permanente entre l'état réel du rack et les décisions prises par le modèle.

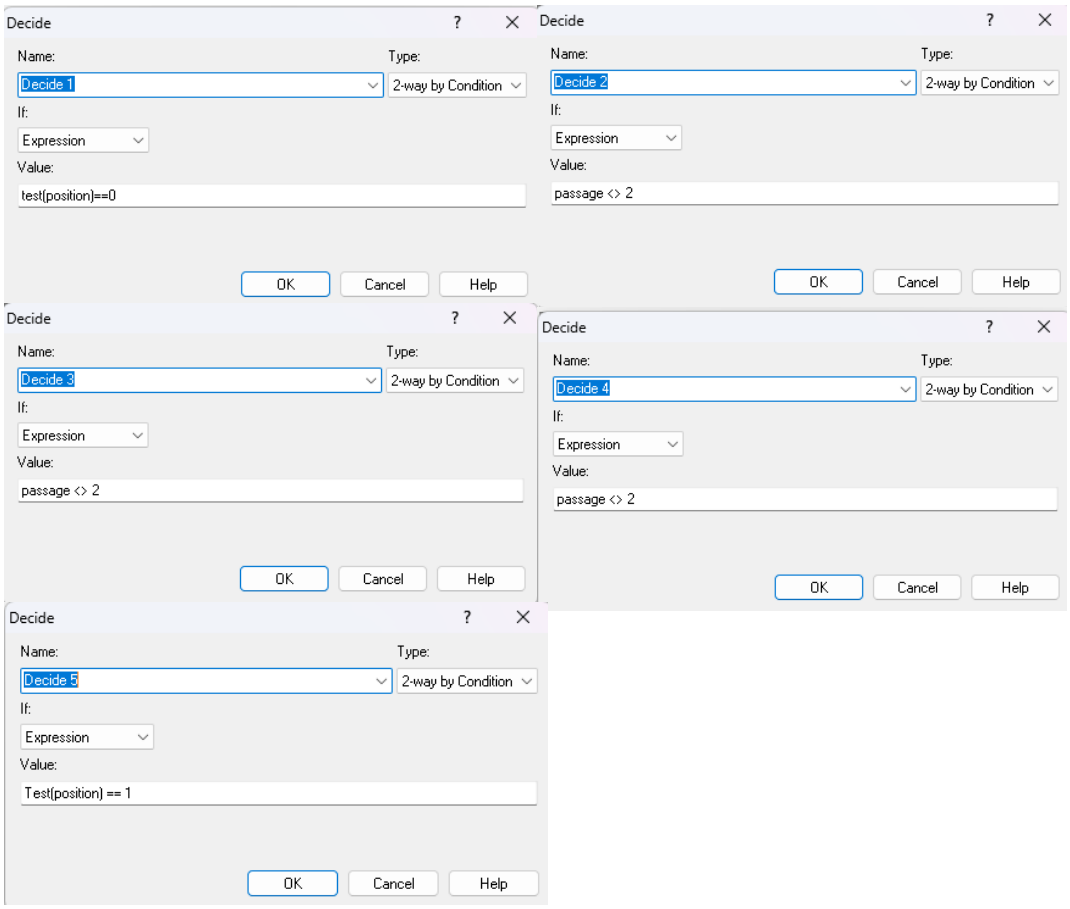


Figure 6 Les modules Decide

II.2.7.4. Les modules Station

Le modèle Arena comporte cinq modules Station, représentant soit une station unique soit un ensemble de stations. Ils définissent les nœuds logistiques du réseau de transport, servant de points de synchronisation entre les différentes ressources du système.

Module Station 1 — Point d'entrée/sortie du système

Ce module représente la station unique d'entrée et de sortie physique du système. C'est à partir de ce point que les charges entrantes sont prises en charge par le réseau de transport et orientées vers les ascenseurs, et c'est vers ce même point que les charges déstockées sont ramenées avant de quitter définitivement le système via le convoyeur de sortie.

Module Station 2 — Ensemble des points d'accès aux niveaux par les ascenseurs

Ce module représente un ensemble de stations correspondant aux points d'accès aux différents niveaux du système depuis les ascenseurs. Chaque station de cet ensemble est associée à un ascenseur dédié et constitue le point de dépôt ou de prise en charge des charges lors des transferts verticaux. Dans la configuration de base du modèle, cet ensemble regroupe trois stations, une par ascenseur.

Module Station 3 — Ensemble des casiers de stockage

Ce module représente l'ensemble des casiers de stockage du système. Chaque station correspond à un emplacement physique identifié dans le rack. C'est à ces stations que les navettes déposent les charges lors des opérations de stockage, et depuis lesquelles elles les extraient lors des opérations de déstockage. Cet ensemble compte autant de stations que de casiers dans la configuration simulée.

Module Station 4 — Ensemble des points d'accès aux niveaux par les navettes

Ce module représente un ensemble de stations correspondant aux points d'accès aux différents niveaux du système depuis les navettes. Il constitue l'interface entre le réseau de transport vertical des ascenseurs et le réseau de transport horizontal des navettes. Chaque station de cet ensemble est associée à un niveau et marque le point de prise en charge des charges par la navette correspondante après leur dépôt par l'ascenseur.

Module Station 5 — Ensemble des points de transfert vers le convoyeur de sortie

Ce module représente un ensemble de stations correspondant aux points où les ascenseurs déposent les charges déstockées sur le convoyeur de sortie. C'est depuis ces stations que les charges sont acheminées vers la Station 1, point de sortie définitif du système. Chaque station de cet ensemble est associée à un ascenseur, assurant ainsi une liaison cohérente entre le réseau vertical et le convoyeur de sortie.

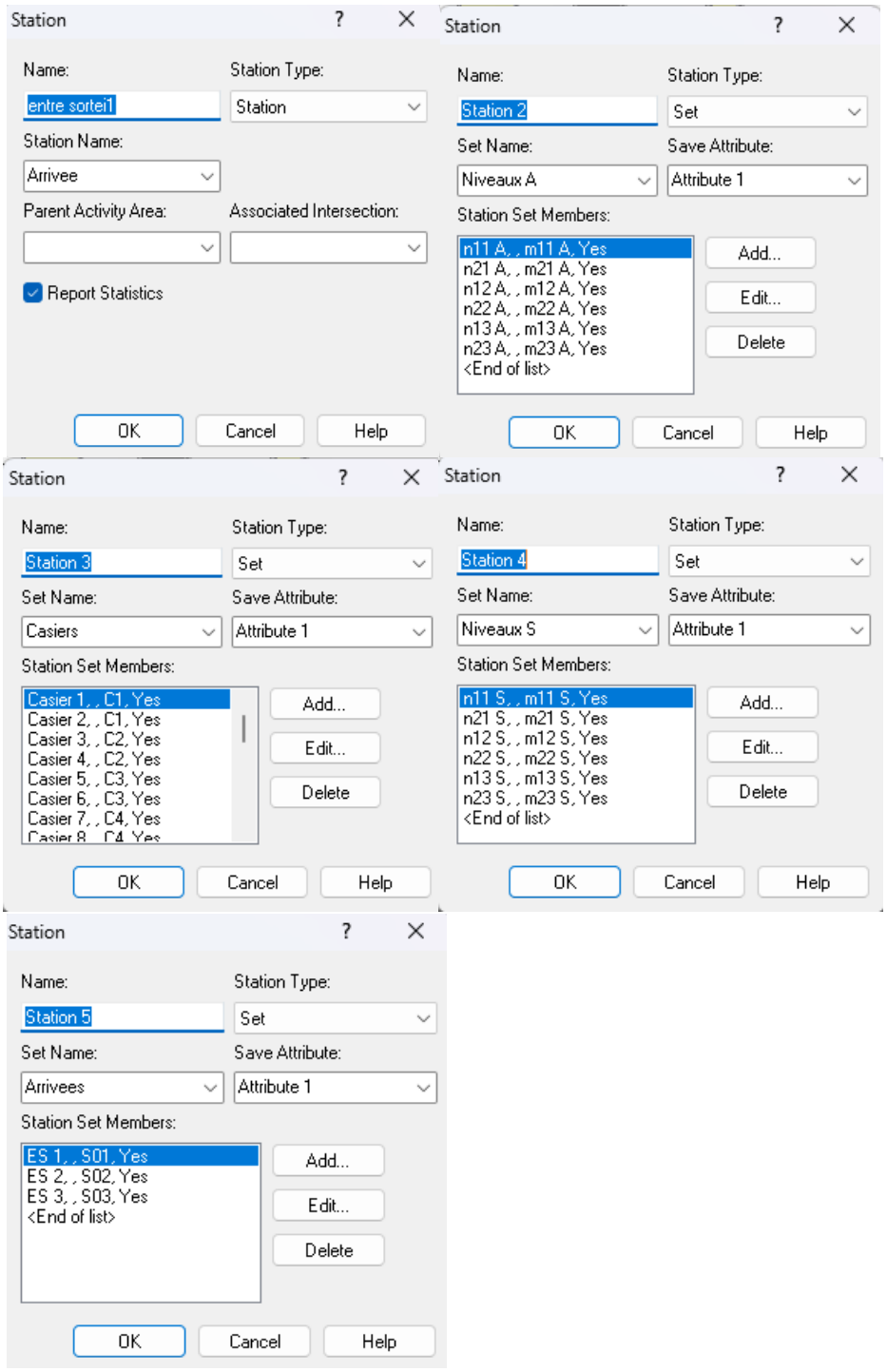


Figure 7 Les modules Station

II.2.7.5. Les modules Route

Le modèle Arena comporte trois modules Route, assurant le routage des charges vers les stations appropriées à chaque étape du flux de transport. Le temps de transport associé à chacun de ces modules est volontairement fixé à 0, ce choix étant justifié par le fait que ce temps est constant pour toutes les charges et n'introduit donc aucune variabilité susceptible d'influencer les performances du système.Module Route 1 — Routage de la Station 2 vers les niveaux des navettes Ce module assure leroutagedeschargesdepuislaStation2versla
station d'accès au niveau correspondant dans le réseau des navettes. La station de destination est déterminée par l'expression suivante :

Niveaux_S(1+AINT(p−1/4))

Où p désigne la position affectée à la charge et 4 représente le nombre de casiers par étage. Cette formule divise l'espace de stockage en zones de 4 casiers, chacune associée à un niveau desservi par une navette dédiée, garantissant ainsi que la charge est orientée vers la navette du niveau correspondant à son emplacement cible.

Module Route 2 — Routage de la Station 3 vers les niveaux des ascenseurs

Ce module assure le routage des charges depuis la Station 3 vers la station d'accès au niveau correspondant dans le réseau des ascenseurs. La station de destination est déterminée par l'expression suivante :

Niveaux_A(1+AINT(p−1/4))

où p désigne la position affectée à la charge et 4 représente le nombre de casiers par étage. Cette formulle structurellement identique à celle du module Route 1, garantit la cohérence du routage entre le réseau horizontal des navettes et le réseau vertical des ascenseurs, assurant une transition fluide entre les deux réseaux de transport.

Module Route 3 — Routage de la station d'entrée/sortie vers les ascenseurs

Ce module assure le routage des charges depuis la station d'entrée/sortie du système vers l'ascenseur approprié. La station de destination est déterminée par l'expression suivante : Arrivee(1+AINT(p−1/8))

8 représente le nombre de casiers desservis par chaque ascenseur. Cette formule divise l'espace de stockage en zones de 8 casiers, chacune associée à un ascenseur dédié. Ainsi, dans la configuration de base du modèle :

L’ascenseur 1 dessert les emplacements 1 à 8,

L’ascenseur 2 dessert les emplacements 9 à 16,

L’ascenseur 3 dessert les emplacements 17 à 24.

Par ailleurs, le temps de transport associé à ce module est volontairement fixé à 0. Ce choix est justifié par le fait que ce temps est constant pour toutes les charges et n'introduit donc aucune variabilité susceptible d'influencer les performances du système. Le fixer à 0 permet de simplifier le modèle sans en altérer la pertinence analytique.

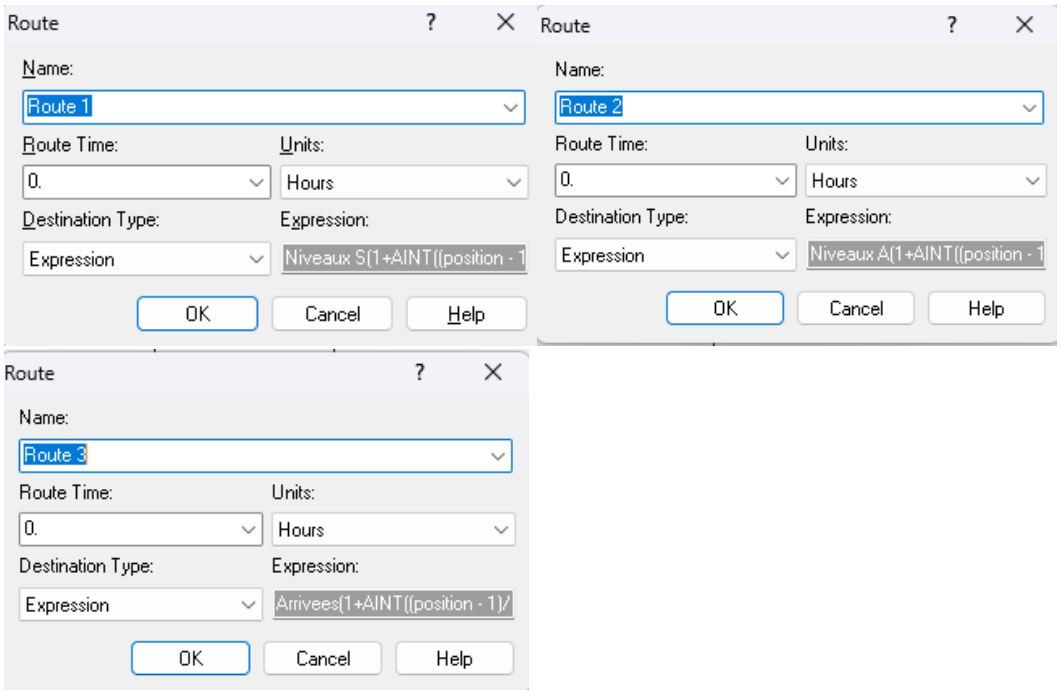


Figure 8 Les modules Route

II.2.7.6. Les modules Request

Le modèle Arena comporte quatre modules Request, assurant la sollicitation des ressources de transport — ascenseurs et navettes — pour les deux types d'opérations du système. Ces modules gèrent les files d'attente et les priorités d'accès aux ressources, permettant de mesurer avec précision les temps d'attente et les taux de congestion au cours de la simulation.

Module Request 1 — Sollicitation de l'ascenseur pour le stockage

Ce module permet à une charge entrante de demander l'utilisation de l'ascenseur correspondant à son niveau de destination, lors d'une opération de stockage. La vitesse de déplacement de l'ascenseur est fixée à 1m/s, valeur retenue sur la base de la littérature spécialisée dans le domaine des systèmes SBS/RS

Module Request 2 — Sollicitation de la navette pour le stockage

Ce module permet à une charge entrante de demander l'utilisation de la navette correspondant à son niveau de destination, après avoir été déposée par l'ascenseur au bon niveau. La vitesse de déplacement de la navette est fixée à 2 m/s. Ce module intervient systématiquement en aval du module Request 1, assurant la continuité du flux de stockage entre le réseau vertical des ascenseurs et le réseau horizontal des navettes.

Module Request 3 — Sollicitation de la navette pour le déstockage

Ce module joue un rôle symétrique à celui du module Request 2, mais pour les opérations de déstockage. Il permet à une requête de déstockage de solliciter la navette du niveau concerné afin d'extraire la charge de son casier et de la transporter horizontalement vers le point de transfert avec l'ascenseur. La vitesse de déplacement de la navette est identique à celle du stockage, soit 2 m/s.

Module Request 4 — Sollicitation de l'ascenseur pour le déstockage

Ce module joue un rôle symétrique à celui du module Request 1, mais pour les opérations de déstockage. Il permet à une charge extraite de son casier de solliciter l'ascenseur afin d'être acheminée verticalement vers le convoyeur de sortie. La vitesse de déplacement de l'ascenseur est identique à celle du stockage, soit 1 m/s.

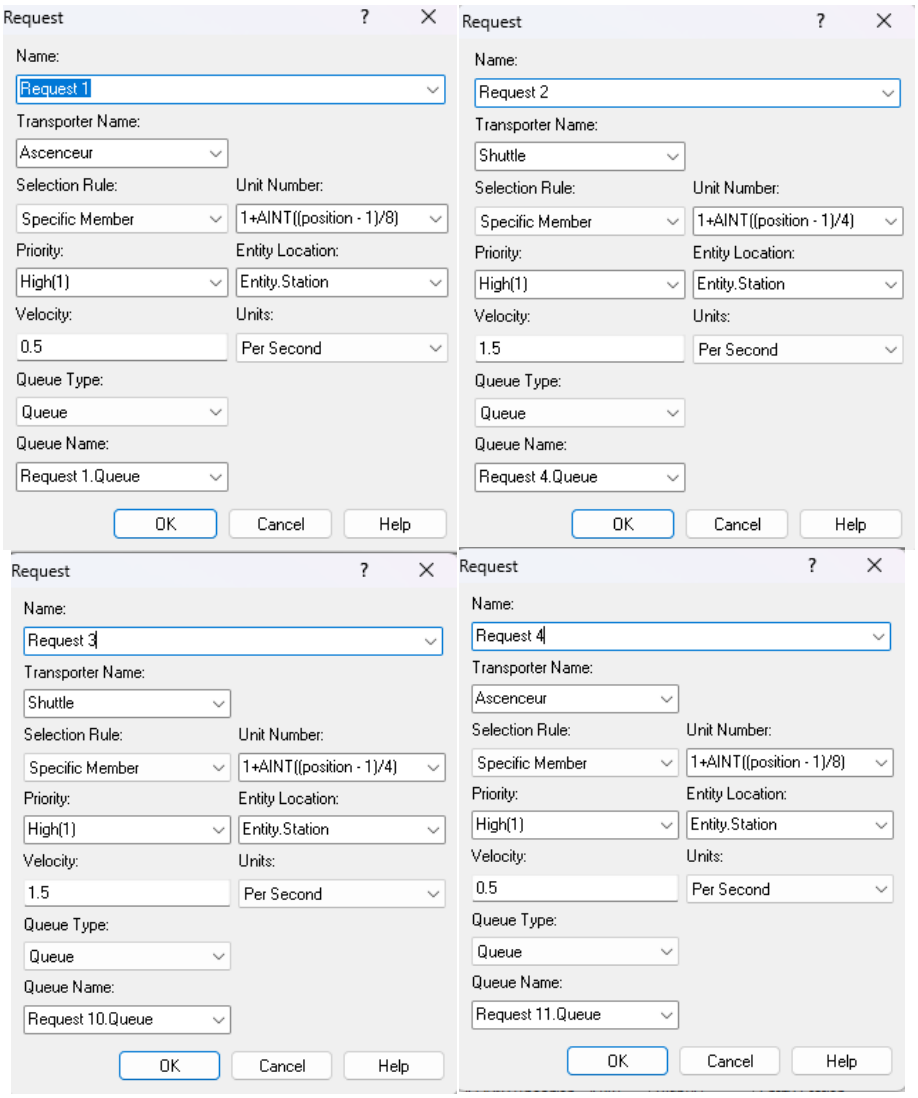


Figure 9 Les modules Request

II.2.7.7. Les modules Transport

Le modèle Arena comporte quatre modules Transport, assurant le déplacement effectif des charges noter que les vitesses définies dans ces modules diffèrent de celles des modules Request : les modules Request définissent la vitesse de déplacement à vide de la ressource pour rejoindre la charge, tandis que les modules Transport définissent la vitesse de déplacement en charge, c'est-à-dire lors du transport effectif de la charge vers sa destination. Une ressource se déplace ainsi plus rapidement à vide qu'en charge, conformément au comportement réel des équipements dans les systèmes SBS/RS.

Module Transport 1 Transport par l'ascenseur pour le stockage

Ce module assure le déplacement vertical des charges entrantes par l'ascenseur, depuis la station d'entrée/sortie du système jusqu'au niveau de destination correspondant à l'emplacement de stockage cible. La vitesse de déplacement en charge de l'ascenseur est fixée à 0.5 m/s.

Module Transport 2 Transport par la navette pour le stockage

Ce module assure le déplacement horizontal des charges entrantes par la navette, depuis le point de transfert avec l'ascenseur jusqu'au casier de stockage cible. Il intervient systématiquement en aval du module Transport 1, assurant la continuité du flux de stockage entre le réseau vertical et le réseau horizontal. La vitesse de déplacement en charge de la navette est fixée à 1.5 m/s.

Module Transport 3 Transport par la navette pour le déstockage

Ce module joue un rôle symétrique à celui du module Transport 2, mais pour les opérations de déstockage. Il assure le déplacement horizontal des charges extraites par la navette, depuis leur casier de stockage jusqu'au point de transfert avec l'ascenseur. La vitesse de déplacement en charge de la navette est identique à celle du stockage, soit 1.5 m/s.

Module Transport 4 Transport par l'ascenseur pour le déstockage

Ce module joue un rôle symétrique à celui du module Transport 1, mais pour les opérations de déstockage. Il assure le déplacement vertical des charges extraites par l'ascenseur, depuis le niveau de stockage jusqu'au convoyeur de sortie du système. La vitesse de déplacement en charge de l'ascenseur est identique à celle du stockage, soit 0.5 m/s.

Le tableau suivant synthétise les vitesses retenues pour chaque ressource selon l'état de déplacement :

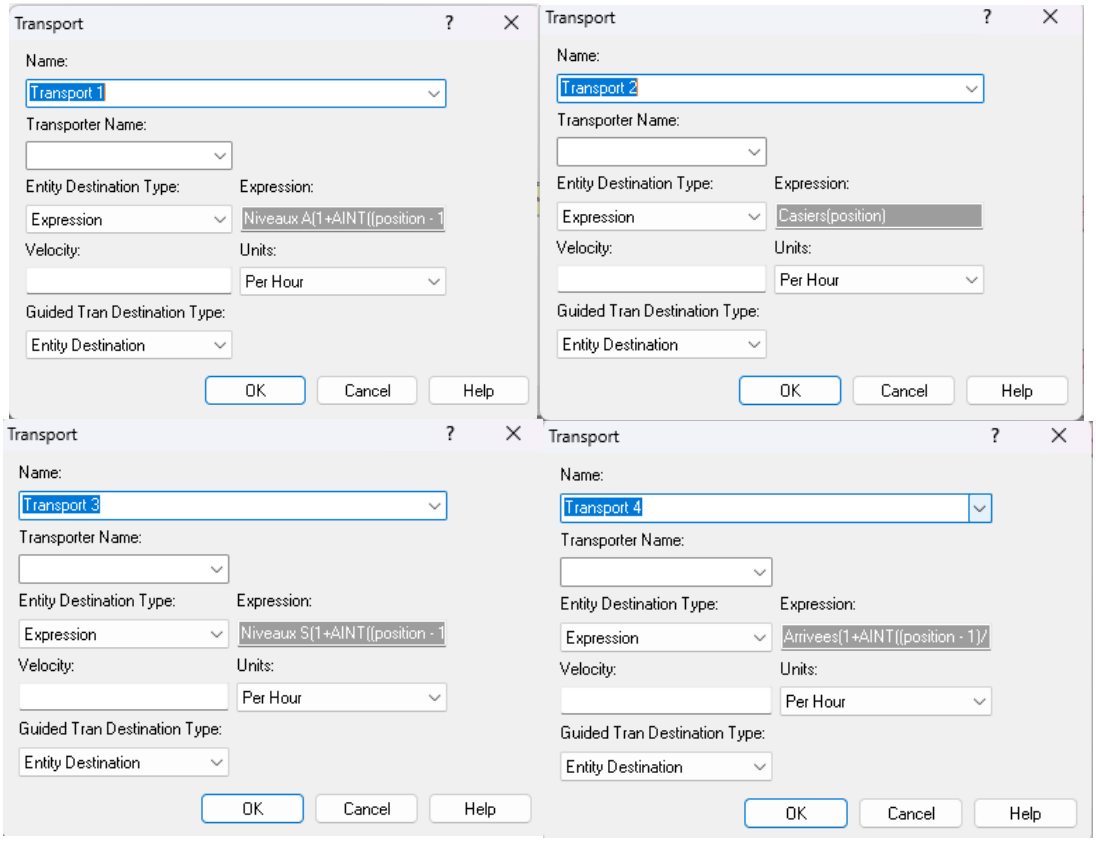


Figure 10 Les modules Transport

II.2.7.8. Les modules Free

Le modèle Arena comporte quatre modules Free, chacun intervenant immédiatement en aval du module Transport correspondant. Leur rôle est de libérer la ressource de transport dès que la charge a été déposée à la station suivante, la rendant ainsi disponible pour le traitement des charges suivantes en attente dans la file. Cette libération rapide est cruciale pour limiter la congestion au niveau des ressources critiques du système, en particulier l'ascenseur.

Module Free 1 — Libération de l'ascenseur après stockage

Ce module libère l'ascenseur immédiatement après le dépôt de la charge au niveau de destination lors d'une opération de stockage.Il intervient en aval du module Transport 1, rendant l'ascenseur disponible pour la prochaine charge en attente dans la file.

Module Free 2 — Libération de la navette après stockage

Ce module libère la navette immédiatement après le dépôt de la charge dans son casier de stockage cible. Il intervient en aval du module Transport 2, rendant la navette du niveau concerné disponible pour la prochaine opération de stockage ou de déstockage.

Module Free 3 — Libération de l'ascenseur après déstockage

Ce module joue un rôle symétrique à celui du module Free 1, mais pour les opérations de déstockage. Il libère l'ascenseur immédiatement après le dépôt de la charge extraite sur le convoyeur de sortie. Il

intervient en aval du module Transport 3, rendant l'ascenseur disponible pour la prochaine charge en attente.

Module Free 4 — Libération de la navette après déstockage

Ce module joue un rôle symétrique à celui du module Free 2, mais pour les opérations de déstockage. Il libère la navette immédiatement après l'extraction de la charge de son casier et son acheminement vers le point de transfert avec l'ascenseur. Il intervient en aval du module Transport 4, rendant la navette du niveau concerné disponible pour la prochaine opération.

Le tableau suivant synthétise la correspondance entre les modules Free et les ressources libérées :

Tableau 7 synthèse des modules Free – Ressources et opérations associées

Module	Ressource libérée	Opération	Module Transport aval
Free 1	Ascenseur	Stockage	Transport 1
Free 2	Navette	Stockage	Transport 2
Free 3	Ascenseur	Déstockage	Transport 3
Free 4	Navette	Déstockage	Transport 4

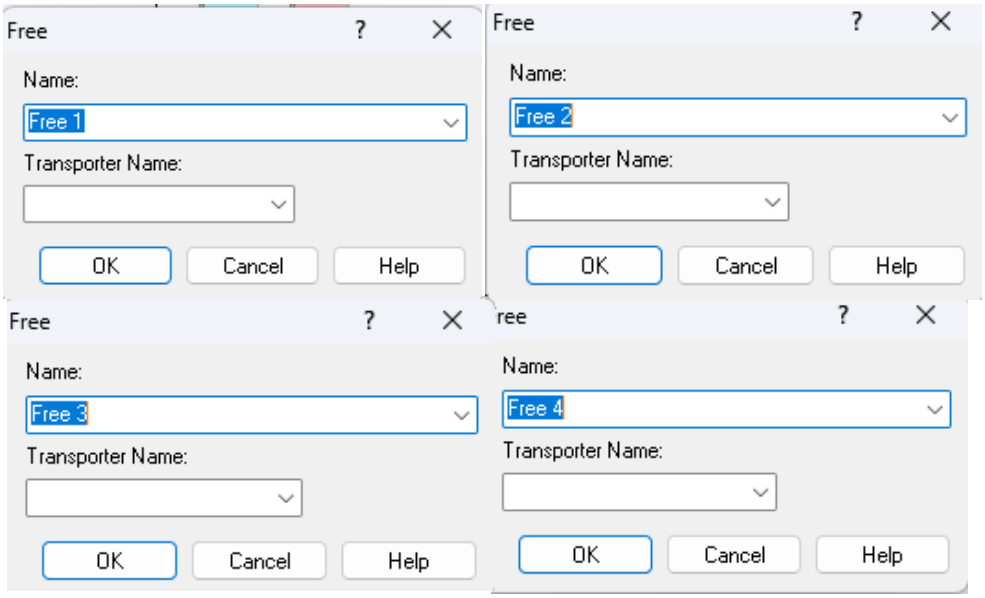


Figure 11 Les modules free

II.2.7.9.Les modules Dispose

Le modèle Arena comporte deux modules Dispose, assurant la suppression des entités en fin de cycle, qu'il s'agisse des charges réelles ou des requêtes fictives de déstockage.

Module Dispose 1 — Suppression des charges réelles

Ce module supprime les entités représentant les charges physiques du système. Il intervient à la fin du cycle de déstockage, dès qu'une charge a été extraite de son casier, acheminée par la navette vers l'ascenseur, transportée verticalement vers le convoyeur de sortie et définitivement évacuée du système. La suppression de l'entité à ce stade marque la fin complète du cycle de vie de la charge dans le modèle de simulation.

La case Record Statistics est cochée pour ce module. Ce choix est délibéré : les charges réelles étant les entités porteuses des indicateurs de performance — temps de séjour dans le système, temps de transport, temps d'attente — leur suppression doit s'accompagner de la collecte et de l'enregistrement de ces statistiques. C'est à ce point précis que le modèle calcule et sauvegarde les données nécessaires à l'évaluation et à la comparaison des algorithmes de gestion présentés dans le chapitre suivant.

Module Dispose 2 — Suppression des requêtes fictives

Ce module supprime les entités fictives représentant les requêtes de déstockage, générées par le module Create 2. Ces entités n'ayant aucune réalité physique propre, elles sont supprimées dès qu'elles ont accompli leur rôle de déclenchement de l'opération de déstockage, c'est-à-dire dès qu'une charge réelle a été identifiée et prise en charge pour extraction.

La case Record Statistics n'est pas cochée pour ce module. En effet, les requêtes fictives ne transportent aucune information pertinente sur les performances du système : elles ne représentent ni des charges physiques ni des flux mesurables. Collecter leurs statistiques n'apporterait aucune valeur analytique et alourdirait inutilement le modèle.

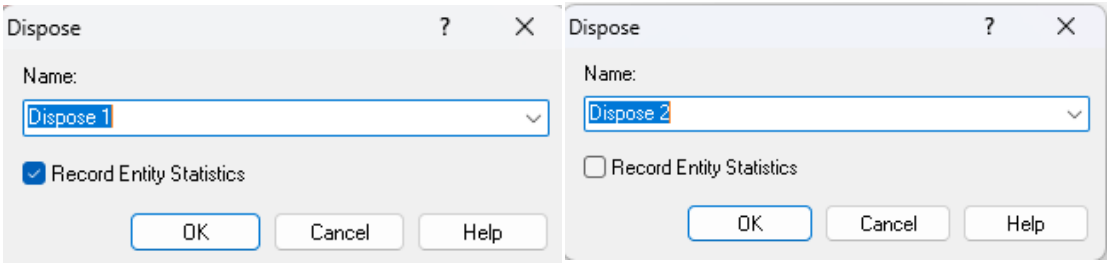


Figure 12 Les modules Dispose

II.2.7.10. Le module Queue

Le module Queue, issu de la bibliothèque Blocks d'Arena, est utilisé pour modéliser les casiers de stockage du système. Chaque casier est représenté comme une file d'attente de capacité unitaire, dans laquelle une charge réelle séjourne depuis son stockage jusqu'au déclenchement de la requête de déstockage correspondante.Ce module permet ainsi de reproduire fidèlement le comportement physique des emplacements de stockage, en assurant qu'une charge reste immobilisée dans son casier tant qu'aucune

demande de sortie ne la cible, tout en maintenant à jour l'état d'occupation du rack au cours de la simulation.

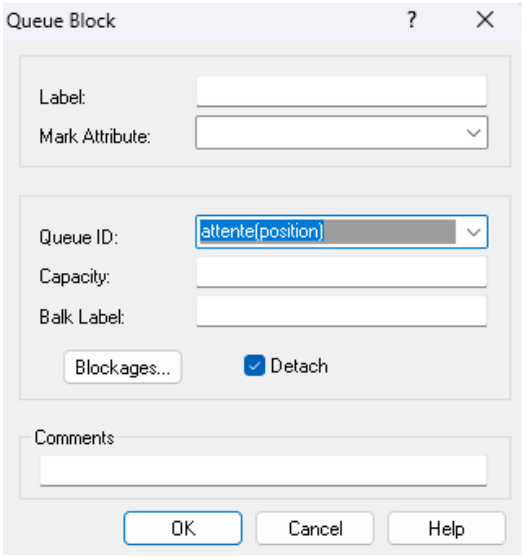


Figure 13 Les modules queue block

II.2.7.11. Les modules Transporter

Le modèle Arena comporte deux modules Transporter, définissant les caractéristiques des moyens de transport guidés du système. Chaque transporter représente un ensemble d'unités de transport opérant sur un réseau dédié, dont les paramètres sont configurés pour reproduire fidèlement le comportement réel des équipements du système SBS/RS.

Transporter Ascenseurs

Ce module définit les caractéristiques des ascenseurs du système. Dans la configuration de base, il comporte 3 unités, chacune dédiée à une zone de stockage et opérant de manière indépendante sur le réseau vertical. Chaque unité est de capacité unitaire, conformément à l'hypothèse retenue dans la modélisation : un seul ascenseur transporte une seule charge à la fois. Le réseau de guidage associé est de type unidirectionnel, structurant les trajets autorisés entre les stations verticales du système. La vitesse par défaut configurée dans ce module correspond à la vitesse en charge, soit 0.5 m/s, la vitesse à vide étant quant à elle définie dans les modules Request correspondants.

Transporter Navettes (Shuttles)

Ce module définit les caractéristiques des navettes du système. Dans la configuration de base, il comporte 6 unités, chacune dédiée à un niveau de stockage et opérant de manière indépendante sur le réseau horizontal du niveau correspondant. Chaque unité est de capacité unitaire, conformément à l'hypothèse retenue dans la modélisation : une seule navette transporte une seule charge à la fois. Le réseau de guidage associé est de type unidirectionnel, structurant les trajets autorisés entre les stations horizontales de chaque niveau. La vitesse par défaut configurée dans ce module correspond à la vitesse en charge, soit 1.5 m/s, la vitesse à vide étant quant à elle définie dans les modules Request correspondants.

Le tableau suivant synthétise les caractéristiques des deux transporteurs dans la configuration de base :

Tableau 8 paramètres des transporteurs – Ascenseurs et Navettes

Transporter	Unités	Capacité unitaire	Réseau	Vitesse en charge	Vitesse à vide
Ascenseurs	3	1 charge	Unidirectionnel	0.5 m/s	1 m/s
Navettes	6	1 charge	Unidirectionnel	1.5 m/s	2 m/s

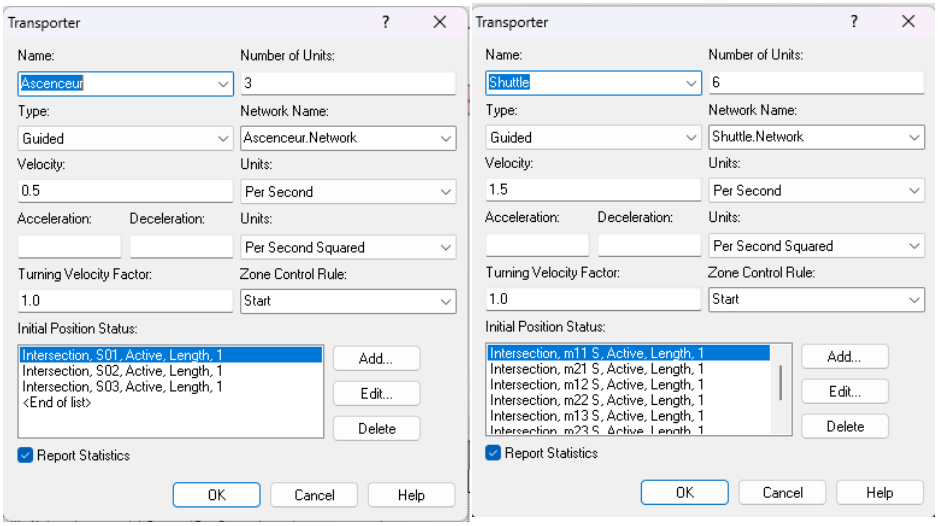


Figure 14 Les modules Transporter

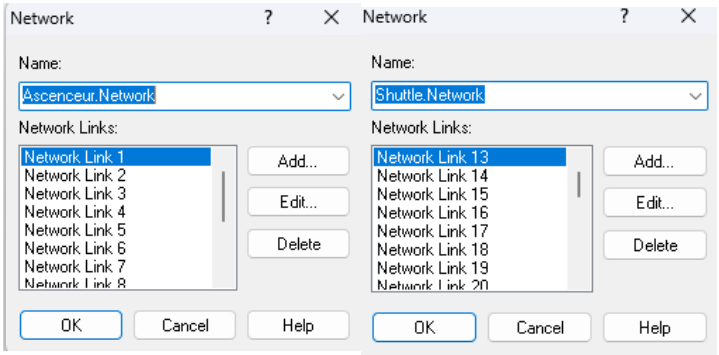
II.2.7.12. Les modules Network et Network Links

Le modèle Arena comporte deux réseaux de transport distincts, chacun associé à un type de ressource et structurant les trajets autorisés au sein du système SBS/RS.

Network Ascenseurs ; Ce réseau définit l'ensemble des trajets verticaux autorisés pour les ascenseurs. Il est composé de 12 liaisons unidirectionnelles, reliant les différentes stations verticales du système — station d'entrée/sortie, stations d'accès aux niveaux et stations de transfert vers le convoyeur de sortie. Ce réseau structure ainsi l'ensemble des déplacements verticaux possibles entre les nœuds du système, garantissant une circulation cohérente et sans ambiguïté des ascenseurs entre les différents niveaux.

Network Navettes ; Ce réseau définit l'ensemble des trajets horizontaux autorisés pour les navettes. Il est composé de 24 liaisons unidirectionnelles, reliant les stations d'accès aux niveaux aux casiers de stockage correspondants. Ce réseau structure l'ensemble des déplacements horizontaux possibles au sein de chaque niveau, garantissant une liaison correcte entre les points de transfert avec les ascenseurs et les emplacements de stockage.

NetworkLinks ; Les liens des deux réseaux sont tous de type unidirectionnel, ce qui signifie que les charges se déplacent dans un seul sens entre deux stations données, conformément à la logique opérationnelle du système SBS/RS. Afin de simplifier le modèle tout en préservant sa cohérence, la distance associée à chaque lien a été uniformément fixée à 1 unité pour l'ensemble des liaisons des deux réseaux. Cette hypothèse est cohérente avec le fait que les performances du système sont évaluées en termes de temps et non de distance, les vitesses des transporteurs étant par ailleurs définies dans les modules Transporter, Request et Transport.



Network Link - Advanced Transfer

	Name	Type	Beginning Intersection Name	Ending Intersection Name	Beginning Direction	Ending Direction	Number Of Zones	Zone Length	Velocity Change Factor
1	Network Link 1	Unidirectional	s01	m11 A	0		1	1	1.0
2	Network Link 2	Unidirectional	m11 A	s01	0		1	1	1.0
3	Network Link 3	Unidirectional	m11 A	m21 A	0		1	1	1.0
4	Network Link 4	Unidirectional	m21 A	m11 A	0		1	1	1.0
5	Network Link 5	Unidirectional	s02	m12 A	0		1	1	1.0
6	Network Link 6	Unidirectional	m12 A	s02	0		1	1	1.0
7	Network Link 7	Unidirectional	m12 A	m22 A	0		1	1	1.0
8	Network Link 8	Unidirectional	m22 A	m12 A	0		1	1	1.0
9	Network Link 9	Unidirectional	s03	m13 A	0		1	1	1.0
10	Network Link 10	Unidirectional	m13 A	s03	0		1	1	1.0
11	Network Link 11	Unidirectional	m13 A	m23 A	0		1	1	1.0
12	Network Link 12	Unidirectional	m23 A	m13 A	0		1	1	1.0
13	Network Link 13	Unidirectional	m11 S	c1	0		1	1	1.0
14	Network Link 14	Unidirectional	c1	m11 S	0		1	1	1.0
15	Network Link 15	Unidirectional	c1	c2	0		1	1	1.0
16	Network Link 16	Unidirectional	c2	c1	0		1	1	1.0
17	Network Link 17	Unidirectional	m21 S	c3	0		1	1	1.0
18	Network Link 18	Unidirectional	c3	m21 S	0		1	1	1.0
19	Network Link 19	Unidirectional	c3	c4	0		1	1	1.0
20	Network Link 20	Unidirectional	c4	c3	0		1	1	1.0

Figure 15 Les modules Network et Network Links

II.2.8 Algorithme : Modèle de simulation Arena du système SBS/RS

Afin de formaliser l'implémentation réalisée sous Arena et d'en faciliter la lecture et la reproductibilité, l'ensemble des modules décrits dans les sections précédentes est synthétisé sous forme d'un algorithme en pseudocode. Cet algorithme retrace le cycle complet de fonctionnement du système SBS/RS simulé, en intégrant les deux flux principaux — stockage et déstockage — ainsi que les mécanismes de mise à jour de l'état du rack et de collecte des indicateurs de performance. Il constitue la base sur laquelle les algorithmes d'optimisation de la gestion de l'ascenseur, présentés dans la section suivante, ont été développés et intégrés.

Entrée : Capacité totale C, temps d'inter-arrivée T_{ia}

Sortie : Indicateurs de performance du système

INITIALISATION

---

1 : Définir le réseau ascenseurs (12 liens unidirectionnels, distance = 1)

2 : Définir le réseau navettes (24 liens unidirectionnels, distance = 1)

3 : Initialiser 3 ascenseurs (vitesse en charge = 0,5 m/s, vitesse à vide = 1 m/s)

4 : Initialiser 6 navettes (vitesse en charge = 1,5 m/s, vitesse à vide = 2 m/s)

5 : Initialiser le tableau d'état test(1..C) ← 0

6 : Définir $T_{\text{debut}} \leftarrow T_{ia} \times C \times 0{,}75$

FLUX DE STOCKAGE [Create 1]

---

7 : À t = 0, générer une charge C_i toutes les T_{ia} unités de temps

8 : [Assign 6] Modifier l'apparence visuelle de l'entité

/* Sélection d'un emplacement libre */

9 : [Assign 1] Générer p ← AINT(UNIF(1, C+1))

10 : [Decide 1] Si test(p) ≠ 0 alors

11 : Retourner à l'étape 9

12 : Fin Si

/* Mise à jour de l'état du rack */

13 : [Assign 2] test(p) ← 1

14 : [Assign 4] passage ← 2

/* Routage vers l'ascenseur */

15 : [Station 1] Acheminer la charge vers la station d'entrée/sortie

16 : [Route 3] Router vers Arrivees(1 + AINT((p-1)/8))

/* Transport vertical */

17 : [Station 2] Identifier la station ascenseur correspondante

18 : [Request 1] Solliciter l'ascenseur (vitesse à vide = 1 m/s)

19 : [Transport 1] Transporter verticalement vers le niveau cible (vitesse = 0,5 m/s)

20 : [Free 1] Libérer l'ascenseur

/* Routage vers la navette */

21 : [Route 1] Router vers Niveaux_S(1 + AINT((p-1)/4))

/* Transport horizontal */

22 : [Station 4] Identifier la station navette correspondante

23 : [Decide 2/3/4] Si passage = 2 alors

24 : [Request 2] Solliciter la navette (vitesse à vide = 2 m/s)

25 : [Transport 2] Transporter horizontalement vers le casier p (vitesse = 1,5 m/s)

26 : [Free 2] Libérer la navette

27 : Fin Si

/* Stockage de la charge */

28 : [Station 3 / Queue] Déposer la charge dans le casier p

29 : Mettre à jour le taux d'occupation global du système

FLUX DE DÉSTOCKAGE [Create 2]

30 : À t = T_debut, générer une requête fictive R_i toutes les T_ia unités de temps

/* Sélection d'un emplacement occupé */
31 : [Assign 3] Générer p ← AINT(UNIF(1, C+1))
32 : [Decide 5] Si test(p) ≠ 1 alors
33 : Retourner à l'étape 31
34 : Fin Si

/* Mise à jour de l'état du rack */
35 : [Assign 5] test(p) ← 0
36 : [Dispose 2] Supprimer la requête fictive R_i

/* Routage vers l'ascenseur */
37 : [Station 3 / Queue] Extraire la charge du casier p
38 : [Route 2] Router vers Niveaux_A(1 + AINT((p-1)/4))

/* Transport horizontal */
39 : [Station 4] Identifier la station navette correspondante
40 : [Decide 2/3/4] Si passage ≠ 2 alors
41 : [Request 3] Solliciter la navette (vitesse à vide = 2 m/s)
42 : [Transport 3] Transporter horizontalement vers le point de transfert (vitesse = 1,5 m/s)
43 : [Free 4] Libérer la navette
44 : Fin Si

/* Transport vertical */
45 : [Station 2] Identifier la station ascenseur correspondante
46 : [Request 4] Solliciter l'ascenseur (vitesse à vide = 1 m/s)
47 : [Transport 4] Transporter verticalement vers le convoyeur de sortie (vitesse = 0,5 m/s)
48 : [Free 3] Libérer l'ascenseur

/* Évacuation de la charge */

49 : [Station 5] Déposer la charge sur le convoyeur de sortie

50 : [Station 1] Acheminer la charge vers la station d'entrée/sortie

51 : [Dispose 1] Supprimer la charge et enregistrer les statistiques

/* Mise à jour globale */

52 : Mettre à jour le taux d'occupation global du système

COLLECTE DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

---

53 : Enregistrer le temps d'attente devant l'ascenseur

54 : Enregistrer le temps d'attente devant les navettes

55 : Enregistrer le temps total de transport par charge

56 : Enregistrer le taux d'utilisation de chaque ascenseur

57 : Enregistrer le taux d'utilisation de chaque navette

58 : Calculer les indicateurs moyens en fin de simulation

II.4 Optimisation de l'exploitation de la ressource goulot : algorithmes de regroupement des commandes pour l'ascenseur

Les analyses précédentes ont confirmé que l'ascenseur constitue la ressource la plus sollicitée du système SBS/RS et représente, à ce titre, son principal goulot d'étranglement. Chaque sollicitation individuelle de l'ascenseur pour une seule charge engendre un cycle vertical complet (montée, dépôt ou prise en charge, descente), ce qui multiplie inutilement le nombre de cycles et accroît le taux d'occupation de la ressource. Afin de réduire ce nombre de cycles et d'améliorer le débit global du système, deux algorithmes de regroupement des commandes sont proposés. Tous deux reposent sur le même principe : au lieu de traiter chaque charge individuellement, les commandes en attente devant l'ascenseur qu'il s'agisse d'opérations de stockage ou de déstockage sont regroupées en lots, traités en un seul cycle vertical. Le premier algorithme déclenche ce regroupement dès qu'un nombre fixe de commandes s'est accumulé (regroupement par taille de lot), tandis que le second déclenche le regroupement à intervalles de temps réguliers, en traitant l'ensemble des commandes accumulées durant chaque intervalle (regroupement par durée fixe). Ces deux stratégies sont décrites ci-après, puis comparées dans la suite du chapitre.

II.3. Algorithme de regroupement par taille de lot

II.3.1 Principe

Le principe de cet algorithme consiste à fixer une taille de lot N_max. Les commandes de stockage et de déstockage s'accumulent dans une file d'attente devant l'ascenseur. Dès que cette file atteint N_max

commandes, l'ensemble de ces commandes est regroupé en un lot unique et traité par l'ascenseur en un seul cycle vertical.

II.3.2 Hypothèses

- Les commandes de stockage et de déstockage arrivent individuellement et sont placées dans une file d'attente commune devant l'ascenseur.
- L'ascenseur est déclenché dès que la file atteint la taille N_max.
- La capacité de transport de l'ascenseur est suffisante pour traiter un lot de N_max unités en un seul cycle.
- Le regroupement est appliqué exclusivement au niveau de l'ascenseur ; les navettes continuent de traiter les charges individuellement.

II.3.3 Algorithme

L'objectif est de réduire le nombre total de cycles verticaux de l'ascenseur en maximisant le nombre de commandes traitées par cycle.

Algorithme 1 : Regroupement par taille de lot

Entrée : File d'attente devant l'ascenseur File, taille de lot N_max

Sortie : Lots L traités par l'ascenseur

```
1  : tant que le système est en fonctionnement faire
2  :    si |File| ≥ N_max alors
3  :       L ← les N_max premières commandes de File
4  :       Envoyer L à l'ascenseur pour un cycle vertical unique
5  :       Retirer les commandes du lot L de File
6  :       pour chaque commande C ∈ L faire
7  :          si Type(C) = stockage alors
8  :             Acheminer C vers sa navette de destination
9  :          sinon
10 :             Acheminer C vers le poste de sortie
11 :          fin si
12 :       fin pour
13 :    fin si
14 : fin tant que
```

II.3.4 Discussion

Cet algorithme permet de réduire significativement le nombre de cycles de l'ascenseur, et donc son taux d'occupation, en garantissant que chaque cycle transporte un nombre constant et maximal de commandes. Sa limite réside dans le temps d'attente des commandes, qui dépend directement du rythme d'arrivée des charges : si le flux entrant est faible, l'attente avant que le seuil N_max soit atteint peut devenir importante, retardant le traitement des commandes.

II.4. Algorithme de regroupement par durée fixe

II.4.1.Principe

Le principe de cet algorithme consiste à fixer un intervalle de temps ΔT. Toutes les commandes de stockage et de déstockage accumulées dans la file d'attente devant l'ascenseur durant cet intervalle sont regroupées en un lot unique, traité par l'ascenseur en un seul cycle vertical à la fin de chaque intervalle, indépendamment du nombre de commandes accumulées.

II.4.2 Hypothèses

Les commandes de stockage et de déstockage arrivent individuellement et sont placées dans une file d'attente commune devant l'ascenseur.
L'ascenseur est déclenché à intervalles de temps fixes ΔT.
La capacité de l'ascenseur est suffisante pour traiter, en un seul cycle, l'ensemble des commandes accumulées durant un intervalle ΔT.
Le regroupement est appliqué exclusivement au niveau de l'ascenseur ; les navettes continuent de traiter les charges individuellement.

II.4.3 Algorithme

L'objectif est de réduire le nombre total de cycles verticaux de l'ascenseur tout en garantissant un temps d'attente borné pour chaque commande.
Algorithme 2 : Regroupement par durée fixe
Entrée : File d'attente devant l'ascenseur File, intervalle de temps ΔT
Sortie : Lots L traités par l'ascenseur
1 : $t \leftarrow 0$
2 : tant que le système est en fonctionnement faire
3 : attendre ΔT
4 : si File $\neq \emptyset$ alors
5 : L ← toutes les commandes accumulées dans File depuis t
6 : Envoyer L à l'ascenseur pour un cycle vertical unique
7 : Retirer les commandes du lot L de File
8 : pour chaque commande C ∈ L faire
9 : si Type(C) = stockage alors
10 : Acheminer C vers sa navette de destination
11 : sinon
12 : Acheminer C vers le poste de sortie

13 : fin si
14 : fin pour
15 : $t \leftarrow t + \Delta T$
16 : fin si
17 : fin tant que

II.4.4 Discussion

Cet algorithme permet de garantir un temps d'attente maximal ΔT pour chaque commande, indépendamment du rythme d'arrivée des charges, ce qui améliore la stabilité du système. En contrepartie, la taille des lots traités est variable : si peu de commandes s'accumulent durant un intervalle, le cycle de l'ascenseur est sous-exploité, tandis qu'un afflux important peut conduire à des lots dépassant la capacité réelle de l'ascenseur, ce qui doit être pris en compte lors du choix de ΔT.

II.4.5 Synthèse

Les deux algorithmes proposés reposent sur le même principe de mutualisation des cycles verticaux de l'ascenseur, mais selon des logiques de déclenchement différentes : l'un fondé sur un seuil de quantité (N_max), l'autre sur un seuil de temps (ΔT). Ces deux procédures se substituent, dans le modèle de simulation, aux sollicitations individuelles de l'ascenseur décrites dans la section 2.3 (modules Request 1 et Request 4), une charge n'étant désormais transportée qu'au sein d'un lot constitué selon l'une ou l'autre de ces stratégies. Leur implémentation sous Arena ainsi que leur comparaison en termes de performances sont présentées dans la suite de ce chapitre.

II.5 Présentation du logiciel CATIA

- **Definition : CATIA (Computer-Aided Three-dimensional Interactive Application)**

Un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) développé par Dassault Systèmes. Il permet de modéliser, concevoir et simuler des pièces et des assemblages en 3D.

Il est largement utilisé dans les domaines industriels tels que l'aéronautique, l'automobile et la mécanique, afin de réaliser des conceptions précises et optimisées.

La conception mécanique avec CATIA

La conception mécanique consiste à concevoir des pièces et systèmes mécaniques fonc- tionnels (engrenages, arbres, moteurs, etc.).

Avec CATIA, cette conception se fait en plusieurs étapes :

Modélisation des pièces. Création de formes solides (extrusion, révolution. . .) Définition des dimensions précises

Assemblage. Assemblage des pièces entre elles Définition des liaisons mécaniques (pivot, glissière. . .) Vérification. Vérification des interférences Simulation des contraintes

Les pièces réalisées par CATIA

Le shuttle : est l'élément mobile chargé d'assurer le transport horizontal des unités de charge dans les rayonnages.

Il permet d'effectuer les opérations de stockage et de déstockage entre les emplacements et les points

d'entrée/sortie.

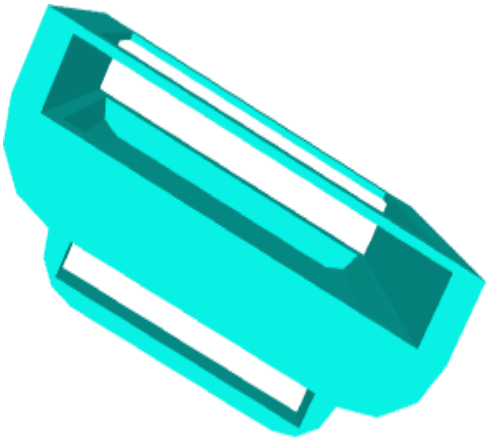


Figure 16 Représentation du shuttle dans l'animation

— **La pièce (charge) :** représente l'unité de stockage manipulée dans le système automatisé.

Elle correspond aux produits ou bacs qui sont **transportés, stockés et récupérés** par le shuttle. Son flux permet d'évaluer les performances du système, notamment en termes de temps de stockage et de débit

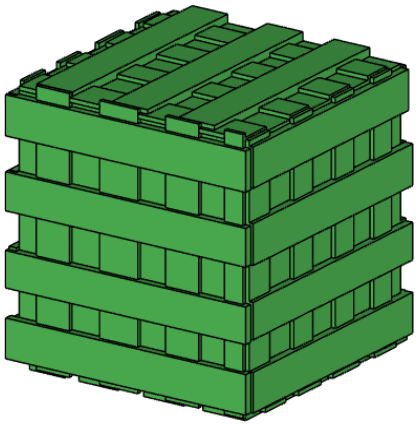


Figure 17 Représentation de la pièce (charge) dans l'animation

— **La structure générale du système :** est constituée de casiers (emplacements de stockage) d'ascenseurs assurant les mouvements verticaux.

Les casiers permettent l'organisation et le stockage des charges, tandis que les ascenseurs assurent le transfert entre différents niveaux.

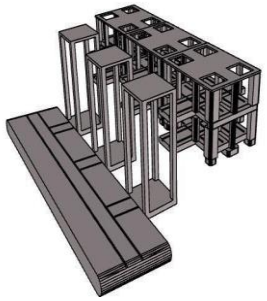


Figure 18 La structure générale du système

L'ascenseur : assure le transport vertical des unités de charge entre les différents niveaux du système SBS/RS.

Il permet la coordination entre les shuttles situés à chaque étage en transférant les charges d'un niveau à un autre.

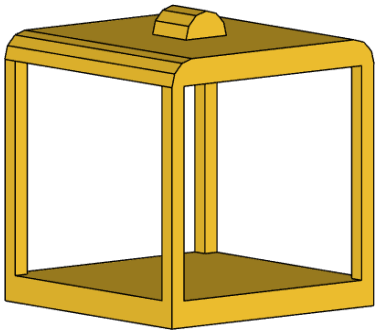


Figure 19 Représentation de l'ascenseur dans le système SBS/RS

II.5.1 Implémentation des pièces de conception réalisées pour l'animation

Le Network Link est utilisé dans l'animation pour représenter le chemin de déplacement des transporteurs dans le système.Il permet de visualiser le mouvement des charges entre deux intersections pendant la simulation.Ainsi, il rend l'animation plus réaliste en mon- trant le trajet réel suivi dans le réseau SBS/RS

La configuration des images associées aux différents états d'un trans- porteur dans le logiciel Arena.

Chaque état est représenté visuellement : Idle (inactif), Busy (occupé).Le vert représente la pièce (charge) dans le système pendant l'animation.La couleur jaune correspond à l'état "Busy", indiquant que le transporteur ou la ressource est occupé.

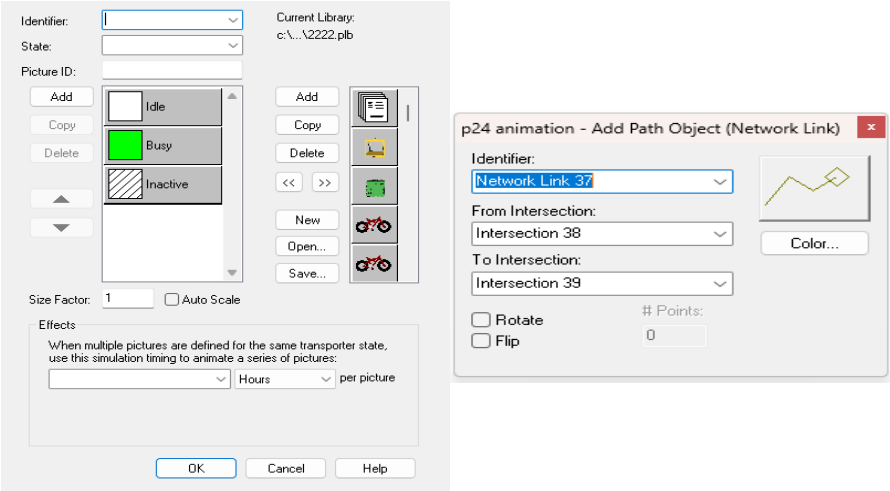


Figure 20 Création d'un chemin de déplacement

La confguration des images associées aux différents états d'un trans- porteur dans le logiciel Arena. Chaque état est représenté visuellement : Idle (inactif), Busy (occupé).Le vert représente la pièce (charge) dans le système pendant l'animation.La couleur jaune correspond à l'état "Busy", indiquant que le transporteur ou la ressource est occupé.

II.6 Conclusion

Ce chapitre a constitué le cœur de la démarche de simulation développée dans ce mémoire, en posant les fondements méthodologiques et techniques nécessaires à l'évaluation des performances du système SBS/RS. Dans un premier temps, le choix d'Arena Simulation Software comme outil de simulation a été justifié au travers d'une analyse comparative avec FlexSim. Si les deux logiciels présentent des atouts complémentaires, Arena s'est imposé comme le choix le plus pertinent pour ce travail, en raison de ses capacités d'analyse statistique avancée, de sa modélisation orientée processus et de la disponibilité d'une licence au sein du laboratoire MELT. Dans un second temps, un modèle de simulation fidèle au comportement dynamique du système SBS/RS a été construit sous Arena, en définissant rigoureusement les entités, les ressources, les réseaux de transport et la logique opérationnelle des cycles de stockage et de déstockage. Trois configurations de taille variable petite, intermédiaire et grande ont été retenues afin d'évaluer les performances des stratégies proposées dans des conditions de charge diversifiées. Enfin, deux algorithmes de regroupement des commandes au niveau de l'ascenseur ont été conçus et formalisés : le premier fondé sur un seuil de quantité, le second sur un intervalle de temps fixe. Tous deux visent à réduire le nombre de cycles verticaux de l'ascenseur, ressource identifiée comme le principal goulot d'étranglement du système, afin d'améliorer le débit global et de diminuer les temps d'attente. L'ensemble de ces éléments constitue le socle sur lequel reposera l'analyse comparative présentée dans le chapitre suivant, qui permettra de quantifier l'apport réel de chaque stratégie et d'identifier les conditions dans lesquelles chacune se révèle la plus efficace.

Chapitre III

Évaluation des performances du système SBS/RS et comparaison des stratégies de regroupement

Ce chapitre est consacré à l'exploitation des résultats issus des simulations du système SBS/RS réalisées sous Arena. L'objectif est d'évaluer, pour chacune des trois configurations définies au chapitre précédent (24, 160 et 500 emplacements), les performances du système selon trois stratégies de gestion de l'ascenseur: l'algorithme de base, sans regroupement, qui sert de référence ; l'Algorithme 1, fondé sur un regroupement par taille de lot ; et l'Algorithme 2, fondé sur un regroupement par durée fixe. Les indicateurs analysés sont le taux d'occupation de l'ascenseur, le temps d'attente devant l'ascenseur et le temps de transport des charges. L'analyse vise à identifier, pour chaque configuration et chaque stratégie, les conditions dans lesquelles l'ascenseur devient un goulot d'étranglement, puis à formuler des recommandations d'amélioration. Une synthèse comparative des trois stratégies est présentée en fin de chapitre.

III.1 Protocole expérimental et indicateurs de performance

III.1.1 Configurations simulées

Les trois configurations présentées au chapitre 2 (24, 160 et 500 emplacements, voir Tableau 6) sont reprises pour l'ensemble des simulations de ce chapitre. Pour chaque configuration, les trois stratégies de gestion de l'ascenseur — algorithme de base, Algorithme 1 (taille de lot N_max) et Algorithme 2 (durée fixe ΔT) — sont testées dans des conditions identiques de charge, afin de garantir la comparabilité des résultats.

III.1.2 Paramètres testés

Pour chaque configuration et chaque stratégie, le temps inter-arrivée T_ia des charges a été varié sur une plage de 1 à 10 unités de temps, couvrant des régimes allant de la forte charge (T_ia faible) à la faible charge (T_ia élevé).

Pour l'Algorithme 1, la taille de lot N_max a été testée pour les valeurs 1, 2, 3, 4, 6, 8 et 10 selon les configurations. Le cas N_max = 1 correspond au cas particulier où chaque commande est traitée individuellement dès son arrivée : il est donc, par construction, équivalent à l'algorithme de base, et sert de point de référence/validation entre les deux modèles.

Pour l'Algorithme 2, l'intervalle de regroupement a été fixé à $\Delta T = 5$ unités de temps pour l'ensemble des configurations testées dans ce chapitre. Les résultats présentés en section 3.4 correspondent donc au comportement du système pour cette valeur de ΔT, le temps inter-arrivée T_ia étant varié de 1 à 10 unités de temps.

III.1.3 Conditions d'exécution

Chaque scénario a été exécuté sur une durée de simulation de 10 000 unités de temps, précédée d'une période de chauffe (warm-up) de 1 000 unités de temps, écartée du calcul des indicateurs afin de neutraliser les effets transitoires liés au démarrage du système. Chaque scénario a fait l'objet de 5 réplications indépendantes, les valeurs présentées correspondant à la moyenne de ces réplications.

III.1.4 Indicateurs de performance

Les indicateurs suivis tout au long des simulations sont les suivants. Le taux d'occupation de l'ascenseur, noté (s) lorsqu'il est mesuré directement en simulation et (a) lorsqu'il correspond à une valeur de référence calculée analytiquement à partir d'un modèle de file d'attente théorique. Le temps d'attente devant l'ascenseur, correspondant au temps écoulé entre l'arrivée d'une charge dans la file de l'ascenseur et le début de son cycle de transport. Et le temps de transport, correspondant à la durée du déplacement effectif de la charge.

III.2 Algorithme de base (sans regroupement)

L'algorithme de base correspond au fonctionnement initial du système, dans lequel chaque charge sollicite individuellement l'ascenseur dès son arrivée à la station de transfert, sans aucune mutualisation des cycles verticaux. Il sert de référence pour évaluer l'apport des deux stratégies de regroupement présentées aux sections 3.3 et 3.4.

III.2.1 Configuration à 24 emplacements

Tableau 9 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée (configuration à 24 emplacements)

Temps entre deux arrivées	Taux d'utilisation (s)	Taux d'utilisation (a)	Temps d'attente	Temps de transfert
1	13.64	99	53	3.5
2	20.1	97.15	17.3	4.12
3	13.41	74.82	4.13	4.5
4	9.93	58.19	2.87	4.6
5	7.88	46.91	1.7	4.7
6	6.54	39.26	1.24	4.71
7	5.57	33.68	1.11	4.7
8	4.87	29.51	1.05	4.71
9	4.34	26.19	0.97	4.7
10	3.9	23.57	1.01	4.7

III.2.1.1 Analyse des performances du système

La Figure 3.1 présente l'évolution du taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée T_ia, pour la configuration à 24 emplacements.

Les résultats montrent une relation claire entre le temps inter-arrivée et les indicateurs de performance du système. Pour de faibles valeurs de T_ia (1 à 3 unités de temps), le système est fortement chargé : le taux d'occupation de l'ascenseur atteint des valeurs élevées, jusqu'à 99 %, et le temps d'attente devant l'ascenseur est important, atteignant 53 unités de temps pour T_ia = 1. À mesure que T_ia augmente, le taux d'occupation diminue progressivement, de 99 % à 23,57 %, tandis que le temps d'attente chute

fortement, de 53 à environ 1 unité de temps, traduisant un système plus fluide et plus stable.
Ces résultats confirment que, dans cette configuration de petite taille, le comportement de l'ascenseur est directement piloté par le rythme d'arrivée des charges : plus celui-ci est élevé, plus le système se rapproche de la saturation.

III.2.1.2 Identification des goulots d'étranglement

L'analyse des résultats permet de distinguer trois zones de fonctionnement.
La zone critique correspond à un temps inter-arrivée compris entre 1 et 3 unités de temps, pour un taux d'occupation de l'ascenseur supérieur à 74 % et un temps d'attente pouvant atteindre 53 unités. Dans cette zone, l'ascenseur est quasi continuellement sollicité, la file d'attente devant lui s'allonge fortement, et le système présente un risque de blocage.
La zone intermédiaire correspond à un temps inter-arrivée compris entre 4 et 6 unités de temps, pour un taux d'occupation compris entre 39 % et 58 % et un temps d'attente modéré. Le système fonctionne correctement mais reste sensible aux fluctuations de la demande.
La zone stable correspond à un temps inter-arrivée supérieur ou égal à 7 unités de temps, pour un taux d'occupation inférieur à 35 % et un temps d'attente proche de 1 unité de temps. Le système fonctionne alors sans congestion notable.
Le goulot d'étranglement observé dans cette configuration est donc directement lié à un flux d'arrivée trop élevé par rapport à la capacité de traitement de l'ascenseur.

III.2.1.3 Recommandations

Sur la base de ces résultats, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées. La première consiste à augmenter la capacité de traitement de l'ascenseur, par exemple en ajoutant un ascenseur supplémentaire ou en améliorant sa vitesse de déplacement. La deuxième consiste à réguler le flux entrant, par un espacement contrôlé des arrivées des charges. La troisième vise à optimiser le service en réduisant les temps de chargement et de déchargement aux postes de transfert. Enfin, il est recommandé de surveiller en continu le taux d'occupation de l'ascenseur afin de le maintenir dans une plage idéale comprise entre 30 % et 70 %, en évitant toute saturation au-delà de 80 %.

III.2.2 Configuration à 160 emplacements

Tableau 10 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée (configuration à 160 emplacements)

Temps entre deux arrivées	Taux d'utilisation (s)	Taux d'utilisation (a)	Temps d'attente	Temps de transfert
1	9.7	100	600	3.4
2	9.36	100	4900	5.46
3	11	92.07	10.7	8.19

4	8.31	75.83	3.3	8.72
5	6.62	62.71	1.6	8.94
6	5.51	53.4	0.88	9.05
7	4.73	46.15	0.61	9.11
8	4.13	40.54	0.36	9.13
9	3.67	36.18	0.26	9.16
10	3.3	32.53	0.16	9.1

III.2.2.1 Analyse des performances du système

La Figure 3.2 présente l'évolution du taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée, pour la configuration à 160 emplacements.

Pour des temps inter-arrivée très faibles (1 et 2 unités de temps), le taux d'occupation de l'ascenseur atteint 100 %, et le temps d'attente devient extrêmement élevé, passant de 600 à 4900 unités de temps. Le système se trouve alors dans un état de surcharge totale. Lorsque le temps inter-arrivée augmente, le taux d'occupation diminue progressivement, de 100 % à 32,53 %, et le temps d'attente chute fortement, de 4900 à 0,16 unité de temps, traduisant un retour progressif vers un fonctionnement stable.

Le temps de transport reste quant à lui relativement stable, compris entre 3,4 et 9,1 unités de temps, ce qui indique que le problème observé ne provient pas du temps de déplacement de l'ascenseur, mais bien du flux d'arrivée des charges.

III.2.2.2 Identification des goulots d'étranglement

Une zone de saturation sévère est observée pour un temps inter-arrivée compris entre 1 et 2 unités de temps, avec un taux d'occupation de l'ascenseur de 100 % et un temps d'attente extrêmement élevé, compris entre 600 et 4900 unités de temps. Dans cette zone, l'ascenseur est constamment sollicité, la file d'attente devient quasiment infinie, et le système est instable.

Une zone critique est observée pour un temps inter-arrivée compris entre 3 et 4 unités de temps, avec un taux d'occupation compris entre 75 % et 92 % et un temps d'attente encore élevé, diminuant de 10,7 à 3,3 unités de temps. Le système commence à s'améliorer mais reste fragile.

Une zone stable est observée pour un temps inter-arrivée supérieur ou égal à 6 unités de temps, avec un taux d'occupation inférieur ou égal à 53 % et un temps d'attente inférieur à 1 unité de temps.

Le goulot d'étranglement observé dans cette configuration résulte d'un déséquilibre entre un taux d'arrivée très élevé et la capacité limitée de l'ascenseur : plus la charge augmente, plus le temps d'attente explose.

III.2.2.2 Recommandations

La première recommandation consiste à ajouter un ou plusieurs ascenseurs supplémentaires, ce qui permettrait de réduire immédiatement le temps d'attente en répartissant la charge entre plusieurs ressources de transport vertical. La deuxième consiste à contrôler le flux des arrivées, par la mise en place de files

d'attente régulées ou de règles de priorité. La troisième vise à optimiser le service en réduisant les temps de traitement et en automatisant les tâches répétitives. Enfin, il est recommandé de maintenir un taux d'occupation idéalement compris entre 30 % et 70 %, en évitant absolument de dépasser 90 %.

III.2.3 Configuration à 500 emplacements

Tableau 11 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée (configuration à 500 emplacements)

Temps entre deux arrivées	Taux d'utilisation (s)	Taux d'utilisation (a)	Temps d'attente	Temps de transfert
1	94	95	1305	3.4
2	99	81	4900	5.46
3	99	87	10.7	8.19
4	99	90	3.3	8.72
5	99	92	1.6	8.94
6	99	93	0.88	9.05
7	99	94	0.61	9.11
8	94	95	0.36	9.13
9	86	95	0.26	9.16
10	79	96	460.2	4602

III.2.3.1 Analyse des performances du système

La Figure 3.3 présente l'évolution du taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée, pour la configuration à 500 emplacements.

Cette configuration présente un comportement très différent des deux précédentes. Le taux d'occupation simulé (s) de l'ascenseur reste très élevé et presque constant : il varie entre 94 % et 99 % pour des temps inter-arrivée compris entre 1 et 8 unités de temps, et reste encore élevé (79 %) pour des temps inter-arrivée plus importants. Le taux d'occupation théorique (a) reste également élevé, oscillant entre 81 % et 96 %, sans jamais redescendre vers les valeurs faibles observées dans les configurations précédentes.

Ce résultat indique que le système, dans cette configuration, fonctionne en régime quasi saturé en permanence, ce qui traduit une insuffisance structurelle des ressources de transport vertical par rapport à la demande.

III.2.3.2 Identification des goulots d'étranglement

Une saturation généralisée est observée pour un temps inter-arrivée compris entre 1 et 8 unités de temps, avec un taux d'occupation de l'ascenseur proche de 99 %. Le système se trouve alors en état de surcharge continue, l'ascenseur est constamment occupé, et les charges s'accumulent en permanence.

Pour des temps inter-arrivée de 9 et 10 unités de temps, une légère amélioration est observée, le taux

d'occupation descendant respectivement à 86 % puis 79 %. Cette amélioration reste toutefois insuffisante : le système demeure fortement chargé et n'atteint, contrairement aux configurations à 24 et 160 emplacements, aucune zone réellement stable.
Le goulot d'étranglement observé dans cette configuration est donc structurel : la capacité de traitement de l'ascenseur est insuffisante face au volume de charges à traiter, et l'augmentation du temps inter-arrivée seule ne suffit pas à résoudre le problème.

III.2.3.3 Recommandations

Compte tenu de l'ampleur de la saturation observée, la première recommandation consiste à augmenter fortement la capacité de transport vertical, par l'ajout de plusieurs ascenseurs fonctionnant en parallèle — alors qu'un seul ascenseur peut suffire pour la configuration à 24 emplacements, il devient clairement insuffisant ici. La deuxième recommandation porte sur la répartition de la charge entre plusieurs ressources, par exemple via plusieurs files d'attente ou plusieurs ascenseurs dédiés à des zones distinctes du système. La troisième vise une optimisation avancée du service, par la réduction du temps de cycle de l'ascenseur et l'utilisation d'équipements plus rapides. Enfin, une gestion intelligente des flux, limitant le nombre d'entrées simultanées et priorisant certaines opérations, pourrait contribuer à atténuer la saturation.
En perspective, l'étude de configurations comportant plusieurs ascenseurs en parallèle, ainsi que l'application des deux stratégies de regroupement présentées au chapitre 2, permettront d'évaluer dans quelle mesure ces solutions peuvent réduire la saturation observée dans cette configuration de grande taille.

III.2.4 Synthèse de l'algorithme de base

L'analyse des trois configurations selon l'algorithme de base met en évidence une dégradation progressive des performances du système avec l'augmentation de sa taille. La configuration à 24 emplacements présente un fonctionnement globalement stable, avec une zone de saturation limitée aux temps inter-arrivée les plus faibles. La configuration à 160 emplacements fait apparaître des goulots d'étranglement plus marqués, avec des temps d'attente nettement plus élevés. La configuration à 500 emplacements, enfin, présente une saturation quasi permanente de l'ascenseur, quel que soit le temps inter-arrivée considéré, confirmant que l'ascenseur constitue, dans cette configuration, le facteur limitant principal du système.
Ces résultats constituent la base de comparaison pour évaluer l'apport des deux stratégies de regroupement présentées dans les sections suivantes.

III.3 Algorithme 1 : regroupement par taille de lot

L'Algorithme 1, présenté au chapitre 2 (section 2.4.1), regroupe les commandes de stockage et de déstockage en lots de taille fixe N_max, traités par l'ascenseur en un seul cycle vertical. Cette section analyse l'effet de ce regroupement sur le taux d'occupation de l'ascenseur, le temps d'attente et le temps de transport, pour les trois configurations étudiées.

III.3.1 Configuration à 24 emplacements

Tableau 12 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction de la taille de lot N_max (configuration à 24 emplacements)

Temps entre deux arrivées	Taux util (s)	Taux util (a)	Taille de lot	Temps d'attente	Temps de transfert
1	13.64	99	1	7.52	3.33
2	20.1	97.15	2	15.72	3.64
3	13.41	74.82	3	27.01	4.71
4	9.93	58.19	4	45.88	3.78
5	7.88	46.91	-	-	-
6	6.54	39.26	-	-	-
7	5.57	33.68	-	-	-
8	4.87	29.51	-	-	-
9	4.34	26.19	-	-	-
10	3.9	23.57	-	-	-

III.3.1.1 Analyse des performances du système

La Figure 3.4 présente l'évolution du taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée et de la taille de lot N_max, pour la configuration à 24 emplacements.

Cas particulier N_max = 1 : validation par rapport à l'algorithme de base. Pour N_max = 1, l'Algorithme 1 traite chaque commande individuellement dès son arrivée, exactement comme l'algorithme de base. Les résultats obtenus pour ce cas — taux d'occupation passant de 99 % (T_ia = 1) à 23,57 % (T_ia = 10) — sont donc identiques à ceux de la Figure 3.1 (section 3.2.1). Cette correspondance confirme la cohérence entre les deux modèles et constitue une validation du modèle d'Algorithme 1 : pour N_max = 1, il se réduit bien au comportement de référence.

Effet de la taille de lot N_max (à T_ia fixé). L'apport propre de l'Algorithme 1 apparaît lorsque N_max augmente. Le taux d'occupation de l'ascenseur passe d'environ 13,64 % pour N_max = 1 à environ 24,95 % pour N_max = 4, traduisant une meilleure exploitation de sa capacité de transport lorsque les cycles regroupent davantage de commandes.

En contrepartie, le temps d'attente devant l'ascenseur augmente fortement avec N_max : il passe de 7,52

unités de temps pour N_max = 1, à 15,72 pour N_max = 2, 27,01 pour N_max = 3 et 45,88 pour N_max = 4. Cette augmentation s'explique par le temps nécessaire à l'accumulation des commandes avant que le seuil N_max ne soit atteint et que le cycle de l'ascenseur ne soit déclenché.
Le temps de transport varie peu avec la taille de lot, restant compris entre 3,33 et 4,71 unités de temps : son influence reste donc faible comparée à celle observée sur le temps d'attente.

III.3.1.2 Identification des goulots d'étranglement

Pour un temps inter-arrivée faible (1 à 3 unités de temps), le taux d'occupation de l'ascenseur dépasse 70 %, pouvant atteindre 99 %. Le système travaille alors à pleine capacité, avec un risque de blocage.
Pour les tailles de lot élevées (N_max = 3 et 4), le temps d'attente devant l'ascenseur devient très important, atteignant jusqu'à 45,88 unités de temps. L'accumulation des commandes en attente du seuil N_max constitue alors un goulot d'étranglement à part entière, qui ralentit l'ensemble du flux de production.
Lorsque ces deux phénomènes se cumulent — flux d'arrivée important et taille de lot élevée — le système devient instable.

III.3.1.3 Recommandations

Afin de limiter la surcharge du système, il est recommandé d'éviter les temps inter-arrivée trop faibles (de l'ordre de 1 unité de temps) et de privilégier un intervalle compris entre 4 et 6 unités de temps, qui assure un meilleur équilibre entre occupation de l'ascenseur et stabilité du système.
Concernant la taille de lot, les résultats suggèrent de privilégier de petites valeurs de N_max (1 ou 2), qui limitent le temps d'attente tout en conservant un bénéfice du regroupement, plutôt que des valeurs élevées qui dégradent fortement la fluidité du flux.
Enfin, l'ajout de ressources supplémentaires (ascenseur ou navette) et l'optimisation de l'ordonnancement des commandes pourraient permettre de réduire davantage les temps morts du système. En perspective, il serait pertinent de tester d'autres combinaisons de temps inter-arrivée et de tailles de lot, notamment pour les configurations à 160 et 500 emplacements présentées ci-après.

III.3.2 Configuration à 160 emplacements

Table 13 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction de la taille de lot N_max (configuration à 160 emplacements)

Temps entre deux arrivées	Taux util (s)	Taux util (a)	Taille de lot	Taux(s) lot	Taux(a) lot	Temps attente	Temps transfert
1	9.7	100	1	9.7	100	568.35	5.46
2	9.36	100	2	33	99	844.34	6.79
3	11	92.07	-	-	-	-	-
4	8.31	75.83	4	37.06	74	55.4	8.9

5	6.62	62.71	-	-	-	-	-
6	5.51	53.4	6	37	74	55.4	8.9
7	4.73	46.15	-	-	-	-	-
8	4.13	40.54	8	37.57	38.05	127.93	9
9	3.67	36.18	-	-	-	-	-
10	3.3	32.53	10	32.87	36.25	132.39	9.48

III.3.2.1 Analyse des performances du système

La Figure 3.5 présente l'évolution du taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée et de la taille de lot, pour la configuration à 160 emplacements.

Cas particulier N_max = 1 : validation. Comme pour la configuration précédente, le cas N_max = 1 reproduit le comportement de l'algorithme de base (Figure 3.2) : le taux d'occupation passe de 100 % (T_ia = 1) à 32,53 % (T_ia = 10). Cette correspondance confirme à nouveau la cohérence entre les deux modèles pour cette configuration.

Effet de la taille de lot N_max. Le taux d'occupation augmente globalement avec N_max, passant d'environ 9,7 % pour N_max = 1 à environ 37,06 % pour N_max = 4, avant de se stabiliser légèrement autour de 32,87 % pour N_max = 10. Pour une configuration de charge plus intense, le taux d'occupation atteint 100 % pour N_max = 1, puis diminue à 74 % pour N_max = 6 et 36,25 % pour N_max = 10 : le système est rapidement saturé pour les petites tailles de lot lorsque le flux est intense, puis l'occupation diminue lorsque la charge devient moins critique.

Le temps d'attente devant l'ascenseur est particulièrement élevé pour les petites tailles de lot : il atteint 568,35 unités de temps pour N_max = 1, augmente à 844,34 pour N_max = 2, puis diminue à 132,39 pour N_max = 10 — une réduction partielle de la congestion grâce au regroupement, après une phase initiale fortement congestionnée.

Le temps de transport augmente légèrement avec la taille de lot, passant de 5,46 unités de temps pour N_max = 1 à 8,90 pour N_max = 4 et 9,48 pour N_max = 10, son impact restant modéré comparé à celui du temps d'attente.

III.3.2.2 Identification des goulots d'étranglement

Le taux d'occupation de l'ascenseur, qui descend jusqu'à 9,7 % pour N_max = 1 mais atteint 100 % en régime de charge intense, traduit une grande sensibilité de cette configuration au couple (T_ia, N_max).

Le temps d'attente devant l'ascenseur, qui peut atteindre 844,34 unités de temps, constitue un goulot critique : il traduit une accumulation massive de commandes avant traitement et une mauvaise répartition du flux entre les périodes de regroupement.

De manière plus générale, le système présente un déséquilibre entre la capacité de traitement de l'ascenseur et le volume de commandes à transporter, ce déséquilibre se traduisant par une augmentation des délais et une dégradation globale des performances lorsque le flux d'arrivée est important et la taille de lot mal

calibrée.

III.3.2.3 Recommandations

Il est recommandé d'éviter les temps inter-arrivée trop faibles (1 ou 2 unités de temps), qui conduisent rapidement à la saturation de l'ascenseur. Concernant la taille de lot, les résultats indiquent que les très petites tailles entraînent une surcharge du système tandis que les tailles intermédiaires (de l'ordre de 4 à 6) offrent le meilleur compromis entre occupation de l'ascenseur et temps d'attente : il est donc recommandé de privilégier ces valeurs.

La réduction des temps d'attente critiques pourrait également passer par l'ajout de ressources supplémentaires (ascenseur ou navette) et par une meilleure planification du déclenchement des cycles de l'ascenseur. En perspective, une comparaison systématique avec les configurations à 24 et 500 emplacements, ainsi que l'introduction de scénarios incluant des variations de charge ou des pannes, permettrait d'approfondir cette analyse.

Contrairement à la configuration à 24 emplacements, le système à 160 emplacements se révèle nettement plus sensible à la saturation, le temps d'attente devenant ici un facteur critique majeur de performance.

III.3.3 Configuration à 500 emplacements

Table 14 Taux d'occupation de l'ascenseur en fonction de la taille de lot N_max (configuration à 500 emplacements)

Temps entre deux arrivées	Taux util (s)	Taux util (a)	Taille de lot	Taux(s) lot	Taux(a) lot	Temps d'attente	Temps de transfert
1	94	95	1	94	95	792	3304
2	99	81	2	99	86	592	5600
3	99	87	-	-	-	-	-
4	99	90	4	99	88	54784	7984
5	99	92	-	-	-	-	-
6	99	93	6	99	53	90589	8623
7	99	94	-	-	-	-	-
8	94	95	8	98	34	134000	7859
9	86	95	-	-	-	-	-
10	79	96	10	98	15	15400	4130

III.3.3.1 Analyse des performances du système

La Figure 3.6 présente l'évolution du taux d'occupation de l'ascenseur en fonction du temps inter-arrivée et de la taille de lot, pour la configuration à 500 emplacements.

Cas particulier N_max = 1 : validation. Le cas N_max = 1 reproduit le comportement de l'algorithme de base (Figure 3.3) : taux d'occupation simulé d'environ 94 % pour T_ia = 1, proche de 99 % pour T_ia compris entre 2 et 7, et chutant à environ 29 % pour T_ia = 10. Cette correspondance valide à nouveau le modèle pour le cas dégénéré N_max = 1.

Effet de la taille de lot N_max. Le taux d'occupation reste élevé quelle que soit la valeur de N_max, passant de 94 % pour N_max = 1 à 99 % pour N_max = 4 et 98 % pour N_max = 10, confirmant une surcharge globale du système indépendamment de la stratégie de regroupement.

Le temps d'attente devant l'ascenseur atteint des valeurs extrêmement élevées et augmente fortement avec la taille de lot : il passe de 792 unités de temps pour N_max = 1, à 592 pour N_max = 2, puis explose à 54 784 pour N_max = 4, 90 589 pour N_max = 6, 134 000 pour N_max = 8 et 154 000 pour N_max = 10.

Le temps de transport devient lui aussi très élevé, passant de 3304 unités de temps pour N_max = 1 à 7984 pour N_max = 4 et 7130 pour N_max = 10, ce qui montre que la congestion impacte également les déplacements effectifs des charges.

III.3.3.2 Identification des goulots d'étranglement

Le taux d'occupation de l'ascenseur, proche de 100 % dans presque tous les scénarios testés, indique une saturation extrême : l'ascenseur est constamment occupé et ne dispose d'aucune marge de flexibilité.

Le temps d'attente, qui atteint jusqu'à 154 000 unités de temps pour les grandes tailles de lot, constitue un goulot critique majeur, traduisant une accumulation excessive de commandes avant traitement et un blocage global du flux de production.

Ce goulot résulte de l'effet combiné de trois facteurs : un volume de charges très important (500 emplacements), des tailles de lot élevées, et une cadence d'arrivée non régulée. La combinaison de ces facteurs place le système dans un état de congestion extrême.

III.3.3.3 Recommandations

Compte tenu de la sévérité de la saturation observée, plusieurs actions sont recommandées. La première consiste à réduire la charge entrante, en augmentant le temps inter-arrivée ou en limitant le nombre de commandes en circulation simultanément. La deuxième, jugée indispensable, consiste à limiter la taille des lots à des valeurs inférieures ou égales à 4, les lots de taille supérieure provoquant une explosion du temps d'attente. La troisième consiste à augmenter la capacité de transport vertical, par l'ajout d'ascenseurs supplémentaires ou la mise en place de lignes de traitement parallèles. Enfin, une optimisation globale du flux, s'appuyant sur des principes de gestion Lean (flux tiré, limitation des en-cours), pourrait contribuer à réduire les blocages observés.

En perspective, l'étude de stratégies complémentaires telles que le juste-à-temps ou le Kanban, ainsi que l'évaluation de l'Algorithme 2 (regroupement par durée fixe) présentée dans la section suivante, permettront de déterminer si une régulation temporelle du déclenchement de l'ascenseur peut atténuer cette saturation pour les grandes configurations.

III.3.4 Synthèse de l'Algorithme 1

L'analyse de l'Algorithme 1 sur les trois configurations confirme que le regroupement par taille de lot permet, dans une certaine mesure, d'améliorer l'exploitation de l'ascenseur en augmentant le nombre de commandes traitées par cycle. Toutefois, ce bénéfice s'accompagne systématiquement d'une augmentation du temps d'attente, d'autant plus marquée que la taille de lot est élevée et que la configuration est de grande taille.Pour la configuration à 24 emplacements, l'effet reste maîtrisé. Pour la configuration à 160 emplacements, le compromis devient plus délicat, les petites tailles de lot saturant rapidement le système tandis que les grandes tailles génèrent des temps d'attente importants. Pour la configuration à 500 emplacements, enfin, l'augmentation de la taille de lot conduit à une explosion du temps d'attente, indiquant que cette stratégie, appliquée seule, atteint ses limites pour les systèmes de grande envergure.
Pour les trois configurations, le cas N_max = 1 reproduit exactement le comportement de l'algorithme de base, ce qui valide la cohérence du modèle d'Algorithme 1 développé sous Arena par rapport au modèle.

III.4 Algorithme 2 : regroupement par durée fixe

L'Algorithme 2, présenté au chapitre 2 (section 2.4.2), regroupe l'ensemble des commandes accumulées devant l'ascenseur durant un intervalle de temps fixe ΔT, indépendamment de leur nombre. Pour l'ensemble de cette section, $\Delta T = 5$ unités de temps. Cette valeur est volontairement intermédiaire par rapport à la plage de temps inter-arrivée testée (1 à 10 unités de temps), ce qui permet d'observer le comportement du système à la fois lorsque $T_ia < \Delta T$ (forte charge, plusieurs commandes par intervalle) et lorsque $T_ia \geq \Delta T$ (faible charge, intervalles partiellement ou totalement vides).

III.4.1 Configuration à 24 emplacements

Table 15 Taux d'occupation de l'ascenseur et temps d'attente en fonction du temps inter-arrivée, pour $\Delta T = 5$ (configuration à 24 emplacements)

Temps entre deux arrivées	Taux util (s)	Taux util (a)	Temps d'attente	Temps de transfert
1	32	56	7	5
2	21	30	19	4
3	15	20	39	4
4	12	15	54	4
5	9	12	69	4
6	8	10	82	4
7	7	8	105	4
8	6	7	125	4
9	5	6	133	4
10	4	5	142	4

III.4.1.1 Analyse des performances du système

La Figure 3.7 présente l'évolution du taux d'occupation de l'ascenseur (mesuré, noté s, et théorique, noté a) ainsi que du temps d'attente, en fonction du temps inter-arrivée, pour $\Delta T = 5$ et la configuration à 24 emplacements.

Le taux d'occupation diminue progressivement lorsque T_ia augmente : le taux mesuré (s) passe de 32 % pour T_ia = 1 à 9 % pour T_ia = 5, puis à 4 % pour T_ia = 10 ; le taux théorique (a) suit la même tendance, de 56 % à 12 % puis 5 %, restant systématiquement supérieur à (s). Lorsque $T_ia < \Delta T$, plusieurs commandes s'accumulent à chaque intervalle et l'ascenseur est davantage sollicité ; lorsque $T_ia \geq \Delta T$, chaque intervalle ne contient plus, en moyenne, qu'une commande ou moins, et l'ascenseur devient sous-exploité.

Le temps d'attente devant l'ascenseur, en revanche, augmente avec T_ia : il passe de 7 unités de temps pour T_ia = 1, à 69 pour T_ia = 5, puis à 142 pour T_ia = 10. Ce résultat, à l'opposé de celui observé pour l'algorithme de base et l'Algorithme 1, s'explique par la nature même du déclenchement temporel : le cycle de l'ascenseur est déclenché tous les $\Delta T = 5$, indépendamment du contenu de la file. Lorsque $T_ia \geq \Delta T$, une commande peut arriver juste après un déclenchement et doit alors patienter jusqu'au déclenchement suivant, voire plusieurs cycles si la file reste vide entre-temps (le pseudocode de l'Algorithme 2 ne déclenche un cycle que si $L \neq \emptyset$). Plus T_ia est grand par rapport à ΔT, plus les intervalles « vides » se multiplient, et plus le délai cumulé avant qu'une commande isolée ne soit effectivement prise en charge s'allonge — d'où la croissance du temps d'attente avec T_ia.

Le temps de transport reste quasiment constant, valant 5 unités de temps pour T_ia = 1 et environ 4 unités de temps pour T_ia compris entre 2 et 10.

III.4.1.2 Identification des goulots d'étranglement

Pour $T_ia \geq \Delta T$ ($T_ia \geq 5$), le taux d'occupation de l'ascenseur devient très faible (jusqu'à 4 %), tandis que le temps d'attente atteint 142 unités de temps. Le goulot identifié ici n'est donc pas une saturation de l'ascenseur, mais un goulot de déclenchement : le rythme fixe de $\Delta T = 5$, adapté aux régimes de forte charge ($T_ia < \Delta T$), pénalise fortement les régimes de faible charge ($T_ia \geq \Delta T$), où les commandes isolées doivent attendre un ou plusieurs cycles de déclenchement avant d'être traitées.

III.4.1.3 Recommandations

Il est recommandé d'adapter ΔT au régime de charge attendu : une valeur de ΔT proche du temps inter-arrivée moyen permettrait de limiter le temps d'attente des commandes isolées dans les régimes de faible charge. Une stratégie de ΔT adaptatif (ΔT réduit lorsque la file est vide depuis longtemps) constitue une piste pertinente. En perspective, il serait utile de tester plusieurs valeurs de ΔT (par exemple 2, 5 et 8 unités de temps) pour cette configuration, avant de comparer ces résultats à ceux des configurations à 160 et 500 emplacements.

III.4.2 Configuration à 160 emplacements

Tableau 16 Taux d'occupation de l'ascenseur et temps d'attente en fonction du temps inter-arrivée, pour $\Delta T = 5$ (configuration à 160 emplacements

Temps entre deux arrivées	Taux util (s)	Taux util (a)	Temps d'attente	Temps de transfert
1	31	33	119	8
2	17	17	238	8
3	12	11	375	8
4	9	8	515	8
5	7	6	635	8
6	6	5	793	8
7	5	4	934	8
8	5	4	1074	8
9	4	3	1214	8
10	3	4	1304	8

III.4.2.1 Analyse des performances du système

Pour $\Delta T = 5$ et la configuration à 160 emplacements, le taux d'occupation diminue rapidement lorsque T_ia augmente : le taux mesuré (s) passe de 31 % pour T_ia = 1 à 7 % pour T_ia = 5, puis à 3 % pour T_ia = 10 ; le taux théorique (a) suit une évolution très proche, de 33 % à 6 % puis 4 %. Les deux mesures restent ici très proches l'une de l'autre, ce qui indique une bonne cohérence entre comportement observé et comportement théorique pour cette taille de système.

Le temps d'attente devant l'ascenseur augmente de façon continue et marquée, de 119 unités de temps pour T_ia = 1, à 635 pour T_ia = 5, puis à 1304 pour T_ia = 10. Comme pour la configuration à 24 emplacements, cette croissance s'explique par le déclenchement à intervalle fixe $\Delta T = 5$: pour T_ia $\geq \Delta T$, les commandes isolées doivent attendre un ou plusieurs cycles de déclenchement, et l'effet est ici amplifié par la taille plus importante du système (davantage de niveaux et de navettes à synchroniser avec chaque déclenchement).

Le temps de transport reste quasiment constant, de l'ordre de 8 à 9 unités de temps sur l'ensemble de la plage testée.

III.4.2.2 Identification des goulots d'étranglement

Le même goulot de déclenchement que pour la configuration à 24 emplacements est observé ici, de façon amplifiée : pour T_ia $\geq \Delta T$, le taux d'occupation descend jusqu'à 3 % tandis que le temps d'attente atteint 1304 unités de temps. L'écart entre $\Delta T = 5$ et T_ia élevé pénalise donc d'autant plus le système que sa taille augmente.

III.4.2.3 Recommandations

Comme pour la configuration précédente, un ajustement de ΔT au régime de charge est recommandé. Pour cette configuration de taille intermédiaire, une valeur de ΔT plus faible (par exemple 2 à 3 unités de temps) pourrait être testée pour les régimes de faible charge (T_ia ≥ 5), afin de réduire le délai d'attente des commandes isolées sans dégrader excessivement le regroupement aux fortes charges.

III.4.3 Configuration à 500 emplacements

Tableau 17 Taux d'occupation de l'ascenseur et temps d'attente en fonction du temps inter-arrivée, pour ΔT = 5 (configuration à 500 emplacements)

Temps entre deux arrivées	Taux util (s)	Taux util (a)	Temps d'attente	Temps de transfert
1	97	1	641	439
2	97	0.5	838	439
3	97	0.3	1011	439
4	97	0.2	1403	439
5	97	0.2	1590	439
6	97	0.2	1680	439
7	97	0.2	1740	439
8	97	0.2	1860	439
9	97	0.2	2010	439
10	97	0.2	2090	439

III.4.3.1 Analyse des performances du système

Pour ΔT = 5 et la configuration à 500 emplacements, le taux d'occupation mesuré (s) reste élevé et quasiment constant, autour de 97 %, sur l'ensemble de la plage testée — y compris pour T_ia ≥ ΔT, contrairement aux deux configurations précédentes. Le taux théorique (a), en revanche, diminue fortement avec T_ia : il vaut 1 pour T_ia = 1, 0,5 pour T_ia = 2, et environ 0,2 pour T_ia ≥ 4.

Le temps d'attente devant l'ascenseur augmente fortement avec T_ia, passant de 641 unités de temps pour T_ia = 1, à 1590 pour T_ia = 5, puis à 2090 pour T_ia = 10.

Le temps de transport reste nul dans tous les scénarios testés.

III.4.3.2 Identification des goulots d'étranglement

Contrairement aux configurations à 24 et 160 emplacements, où le taux d'occupation chutait fortement pour T_ia ≥ ΔT, le taux mesuré reste ici proche de 97 % quel que soit T_ia : le volume de 500 emplacements génère, même pour T_ia = 10, suffisamment de commandes en attente pour qu'aucun cycle de ΔT = 5 ne soit « vide ». Le goulot observé ici n'est donc plus un goulot de déclenchement, mais une saturation structurelle : l'écart croissant entre le taux mesuré (s ≈ 97 %) et le taux théorique (a, jusqu'à 0,2)

traduit un déséquilibre entre la charge réelle absorbée par l'ascenseur et la capacité de référence du modèle théorique, et le temps d'attente continue de croître (jusqu'à 2090) faute de capacité de transport suffisante pour traiter les lots constitués à chaque déclenchement.

III.4.3.3 Recommandations

Pour cette configuration, l'ajustement de ΔT seul ne suffira probablement pas à résorber la saturation, celle-ci étant structurelle (capacité de transport insuffisante, comme déjà identifié pour l'algorithme de base et l'Algorithme 1). L'augmentation du nombre d'ascenseurs en parallèle reste donc la recommandation prioritaire ; une fois cette capacité augmentée, un ajustement de ΔT pourra être étudié pour affiner le compromis occupation/temps d'attente.

III.4.4 Synthèse de l'Algorithme 2

Pour ΔT = 5, l'Algorithme 2 révèle deux comportements distincts selon la taille du système. Pour les configurations à 24 et 160 emplacements, où T_ia peut dépasser ΔT, un goulot de déclenchement apparaît : l'ascenseur est sous-exploité mais les commandes isolées subissent des temps d'attente croissants, faute de pouvoir déclencher un cycle en dehors des intervalles fixes de ΔT. Pour la configuration à 500 emplacements, le volume de commandes est tel qu'aucun intervalle ΔT n'est vide, et le système retrouve un comportement de saturation structurelle comparable à celui observé pour les deux autres stratégies. Ces résultats indiquent que la performance de l'Algorithme 2 dépend fortement de l'adéquation entre ΔT et le régime de charge, et qu'un ΔT adaptatif constituerait une piste d'amélioration pertinente, notamment pour les configurations de petite et moyenne taille.

III.5 Analyse comparative des trois stratégies

La comparaison des trois stratégies algorithme de base, Algorithme 1 (regroupement par taille de lot) et Algorithme 2 (regroupement par durée fixe) — met en évidence des comportements complémentaires selon la taille du système et le régime de charge considéré.

Pour la configuration à 24 emplacements, l'algorithme de base présente un fonctionnement globalement stable, à l'exception des temps inter-arrivée les plus faibles. L'Algorithme 1 permet d'augmenter l'occupation de l'ascenseur pour de petites tailles de lot, au prix d'une augmentation du temps d'attente proportionnelle à N_max. L'Algorithme 2, quant à lui, conduit à une sous-utilisation de l'ascenseur pour les temps inter-arrivée élevés ($\Delta T = 5$), associée à des temps d'attente croissants, ce qui suggère que cette stratégie nécessite un ajustement fin de ΔT pour cette configuration.

Pour la configuration à 160 emplacements, l'algorithme de base présente des goulots d'étranglement marqués pour les faibles temps inter-arrivée. L'Algorithme 1 offre un compromis intéressant pour des tailles de lot intermédiaires (4 à 6), réduisant le temps d'attente par rapport aux très petites tailles de lot. L'Algorithme 2, en revanche, amplifie le phénomène de goulot de déclenchement observé pour la configuration à 24 emplacements, avec des temps d'attente atteignant plus de 1300 unités de temps pour les temps inter-arrivée élevés.

Pour la configuration à 500 emplacements, les trois stratégies font apparaître une saturation structurelle de l'ascenseur. L'algorithme de base et l'Algorithme 2 maintiennent un taux d'occupation élevé sur l'ensemble de la plage testée, tandis que l'Algorithme 1 conduit, pour les tailles de lot élevées, à une explosion du temps d'attente largement supérieure à celle observée pour les deux autres stratégies. Cette configuration met en évidence les limites des deux stratégies de regroupement lorsqu'elles sont appliquées seules à un système dont la capacité de transport vertical est insuffisante.

De manière générale, l'Algorithme 1 apparaît plus adapté aux configurations de petite et moyenne taille, à condition de limiter la taille des lots, tandis que l'Algorithme 2 nécessite un ajustement de ΔT en fonction de la taille du système et du régime de charge pour éviter une dégradation du temps d'attente. Pour les systèmes de grande taille, les résultats suggèrent qu'une augmentation de la capacité de transport vertical (ajout d'ascenseurs) constitue un préalable nécessaire avant que l'une ou l'autre des stratégies de regroupement ne puisse produire un bénéfice net.

III.6 Conclusion

Les résultats présentés dans ce chapitre ont permis d'évaluer les performances du système SBS/RS selon trois stratégies de gestion de l'ascenseur algorithme de base, regroupement par taille de lot et regroupement par durée fixe pour trois configurations de tailles croissantes. L'analyse a confirmé que l'ascenseur constitue, dans toutes les configurations étudiées, la ressource la plus critique du système, et que ses performances sont fortement dépendantes du rythme d'arrivée des commandes ainsi que du paramétrage des stratégies de regroupement.

Pour les configurations de petite et moyenne taille, les deux stratégies de regroupement apportent des bénéfices sous certaines conditions : l'Algorithme 1 améliore l'occupation de l'ascenseur pour de petites tailles de lot, tandis que l'Algorithme 2 nécessite un ajustement de ΔT pour éviter une dégradation du

temps d'attente. Pour la configuration de grande taille, les deux stratégies atteignent leurs limites, et une augmentation de la capacité de transport vertical apparaît nécessaire pour résorber la saturation observée. Ces résultats ouvrent plusieurs perspectives pour la suite de ce travail, notamment l'étude de configurations comportant plusieurs ascenseurs en parallèle, l'optimisation conjointe des paramètres N_max et ΔT, ainsi que l'introduction de scénarios incluant des variations de charge ou des aléas opérationnels.

Conclusion Générale

Ce projet de fin d'études avait pour ambition d'analyser les performances d'un système de stockage et de récupération automatisé de type SBS/RS, en portant une attention particulière à l'ascenseur, identifié comme la ressource critique constituant le principal goulot d'étranglement et conditionnant l'ensemble du flux opérationnel.

La contribution centrale de ce travail réside dans la conception et l'implémentation d'une simulation sous *Arena Simulation Software*, fidèlement représentative du comportement dynamique d'un SBS/RS. Ce cadre de simulation a constitué le socle à partir duquel deux algorithmes de gestion des flux, fondés sur le principe du regroupement des charges, ont été développés, implémentés et évalués. Le premier algorithme regroupe les charges par seuil de quantité, tandis que le second opère un regroupement basé sur des fenêtres temporelles. Dans les deux cas, la logique est identique : solliciter l'ascenseur de manière plus rationnelle et plus productive à chaque déplacement, en regroupant plusieurs charges avant chaque transfert vertical.

Les résultats obtenus à l'issue des simulations, menées sur trois volumes de charges distincts (24, 160 et 500 charges), ont permis de mettre en évidence un arbitrage fondamental inhérent à cette approche : le regroupement des charges améliore sensiblement le taux d'utilisation de l'ascenseur et augmente le débit global du système, au prix d'une augmentation contrôlée des temps d'attente individuels. Cet arbitrage, bien que non formalisé sous la forme d'un problème d'optimisation multi-objectif, reflète néanmoins une logique d'optimisation équilibrée, adaptée aux contraintes réelles d'exploitation d'un entrepôt automatisé.

Ces résultats confirment par ailleurs la pertinence et la puissance de la simulation comme outil d'aide à la décision en ingénierie logistique. En permettant de tester et de comparer différentes stratégies de gestion sans perturber un système réel, la simulation offre un cadre expérimental précieux, particulièrement adapté à des systèmes aussi complexes et interdépendants que les SBS/RS.

Toutefois, ce travail comporte certaines limites qu'il convient de reconnaître. Les simulations développées reposent sur des hypothèses simplificatrices, notamment l'absence de prise en compte des pannes, des variations stochastiques des temps opératoires ou encore des priorités différenciées entre commandes. Ces simplifications, nécessaires dans le cadre d'un projet de fin d'études, ouvrent naturellement la voie à des approfondissements futurs.

En perspective, plusieurs axes d'amélioration peuvent être envisagés. L'enrichissement des scénarios de simulation avec des paramètres plus réalistes constituerait une première évolution significative. Le recours à des méthodes d'optimisation formelles permettrait par ailleurs de traiter plus rigoureusement l'arbitrage entre débit et temps d'attente. Enfin, l'intégration de technologies issues de l'industrie 4.0, notamment l'intelligence artificielle et les systèmes de contrôle connectés, ouvre des perspectives prometteuses pour une gestion dynamique et en temps réel des flux au sein des entrepôts automatisés de demain.

En définitive, ce travail illustre l'apport indéniable de la simulation dans l'analyse et l'amélioration des systèmes logistiques modernes, et pose les premières bases d'une réflexion plus large sur l'exploitation optimale des ressources critiques dans les entrepôts automati

Référence Bibliograpiques

[1] Groover, M. P. (2008). Automation, Production Systems,and Computer-Integrated Manufacturing (3rd ed.). Pearson Education.
[2] Bartholdi, J. J., & Hackman, S. T. (2016). Warehouse & Distribution Science. Supply Chain and Logistics Institute, Georgia Institute of Technology.
[3] Fédération Européenne de la Manutention (FEM). (2001). Automated Storage and Retrieval Systems – Terminology (FEM 9.851).
[4] Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., & Tanchoco, J. M. A. (2010). Facilities Planning (4th ed.). John Wiley & Sons.
[5] Demag. (1956). Archives historiques Demag. Wetter, Allemagne.
[6] White, J. A. (2005). Evolution of Material Handling. Material Handling Industry of America.
[7] IBM. (1968). System/360 Warehouse Management Guide. International Business Machines Corporation.
[8] Van den Berg, J. P. (1999). A literature survey on planning and control of warehousing systems. IIE Transactions, 31(6), 507–521.
[9] Fédération Européenne de la Manutention (FEM). (1978). Automated Storage and Retrieval Systems(Première édition de la norme FEM 9.851).
[10] Material Handling Institute. (1980). Double-Deep Storage Survey.
[11] Laubier, P. (1986). Les codes-barres en logistique. Techniques de l'Ingénieur.
[12] McKesson Corporation. (1995). Annual Report 1995.
[13] United States Patent No. 5,431,523. (1995). Mobile Rack System.
[14] SSI Schaefer. (1999). Micro-Load Catalogue Technique.
[15] Swisslog. (2003). Lancement du système Shuttle. Communiqué de presse.
[16] Gartner. (2009). ROI Analysis for Automated Storage Systems.
[17] Cisco Systems. (2012). Internet of Things in Logistics.
[18] Glaessgen, E. H., & Stargel, D. S. (2012). The Digital Twin Paradigm for Future NASA and U.S. Air Force Vehicles. In 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference.
[19] McKinsey & Company. (2020). Logistics During COVID-19*.
[20] Swisslog. (2024). Hybrid AS/RS Solution.
[21] DHL. (2022). Logistics Trend Radar 2030.
[22] Boysen, N., Briskorn, D., Emde, S., & Schwerdfeger, S. (2019). Shuttle-based storage and retrieval systems. European Journal of Operational Research, 276(1), 1–18.
[23] Weidinger, F. (2018). Design of Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems. Technische Hochschule Darmstadt.
[24] Roodbergen, K. J., & Vis, I. F. A. (2009). A survey of literature on automated storage and retrieval systems. European Journal of Operational Research, 194(2), 343–362.
[25] KNAPP AG. (1998). Prototype Textile. Rapport technique

Résumé

Les systèmes de stockage et de récupération automatisés (SBS/RS : Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems) sont des systèmes logistiques avancés permettant le stockage et la manipulation automatisée des produits dans des entrepôts à haute densité. Le système comporte deux types de ressources principales : les shuttles (navettes) assurant les déplacements horizontaux, et l'ascenseur dédié aux déplacements verticaux. Dans cette configuration, l'ascenseur constitue souvent un goulot d'étranglement, limitant la performance globale en raison de sa capacité et de ses temps de déplacement. Dans ce projet de fin d'études nous mettons en évidence l'impact critique de cette ressource sur le flux des opérations. Afin d'améliorer les performances, une approche par simulation a été adoptée en utilisant le logiciel Arena Simulation Software. Plusieurs algorithmes de gestion et d'ordonnancement ont été modélisés et testés afin de réduire la charge de l'ascenseur. Les résultats obtenus ont permis d'identifier des stratégies efficaces pour diminuer les temps d'attente et améliorer le débit global du système.

Mots-clés : SBS/RS, goulot d'étranglement, simulation, Arena Simulation Software, algorithmes de gestion, taux d'utilisation des ressources, temps d'attente.

Abstract

Shuttle-Based Storage and Retrieval Systems (SBS/RS) are advanced logistics systems that enable the automated storage and handling of products in high-density warehouses. The system consists of two main types of resources: shuttles, which handle horizontal movements, and an elevator dedicated to vertical transport. In this configuration, the elevator often constitutes a bottleneck, limiting overall system performance due to its capacity and travel times. In this final-year project, we highlight the critical impact of this resource on the flow of operations. To improve performance, a simulation-based approach was adopted using Arena Simulation Software. Several management and scheduling algorithms were modeled and tested in order to reduce the elevator workload. The obtained results made it possible to identify effective strategies to reduce waiting times and improve the overall system throughput.

Keywords: SBS/RS, bottleneck, simulation, Arena Simulation Software, management algorithms, resource utilization rate, waiting time.

ملخص

الأنظمة اللوجستية المتطورة تُمكّن من التخزين الآلي للمنتجات (SBS/RS) أنظمة التخزين والاسترجاع القائمة على النقل المكوكية ومناولتها في مستودعات عالية الكثافة. يتألف النظام من نوعين رئيسيين من الموارد: المكوكية للحركة الأفقية والمصاعد للحركة الرأسية. في هذا التكوين، غالبًا ما يُمثل المصعد نقطة اختناق، مما يُحد من الأداء العام نظرًا لسعته ووقت تنقله. في هذا المشروع النهائي، نُسلط الضوء على التأثير الحاسم لهذا المورد على سير العمليات. ولتحسين الأداء، تم اعتماد منهجية المحاكاة باستخدام برنامج Arena Simulation. تم تصميم واختبار العديد من خوارزميات الإدارة والجدولة لتقليل حمولة المصعد. سمحت لنا النتائج المُتحصل عليها بتحديد استراتيجيات فعّالة لتقليل أوقات الانتظار وتحسين إنتاجية النظام الإجمالي

الكلمات المفتاحية :

أنظمة التخزين والاسترجاع القائمة على النقل المكوكية، نقطة الاختناق، المحاكاة، برنامج Arena Simulation، خوارزميات الإدارة، معدل استخدام الموارد، وقت الانتظار