

Développement d'un ERP modulaire conçu pour l'optimisation de la chaîne logistique

BENALI Walid¹, BENBETKA MOHAMED ELAMINE¹,
KOUADRI BOUDJELTHIA Abdelkadir¹ et OUADI Souhaib¹

Encadrés par :BADJARA Mohamed el Amine¹, ANNAD Oussama¹ et SELLIDJ Wassila¹
RÉSUMÉ

Depuis la création des premiers MRP (material requirement planning) au début des années 1970, les progiciels ERP (Enterprise Resource Planning) se concentrent sur la gestion des flux physiques et informationnels ainsi que les transactions monétaires des entreprises. Ils centralisent et automatisent également les processus opérationnels. Ce travail innovant se distingue par le développement d'un ERP qui non seulement gère mais aussi optimise les processus logistiques, apportant ainsi une valeur ajoutée significative par rapport aux ERP classiques. Les méthodologies adoptées incluent des méthodes de recherche opérationnelle, telles que les approches d'optimisation combinatoire et les outils d'analyse multicritères d'aide à la décision, intégrées dans cet ERP pour la gestion et l'optimisation de la chaîne logistique. Ces outils optimisent divers processus, comme le choix des fournisseurs, la planification des tournées de véhicules, la sélection des emplacements de stockage et l'affectation équilibrée des machines de production aux ordres de fabrication. Le travail a abouti à un prototype fonctionnel d'ERP capable de gérer et d'optimiser les processus logistiques. Ce prototype améliore la gestion de la chaîne logistique grâce à des approches d'optimisation combinatoire et des outils d'analyse multicritères. Il optimise les choix de fournisseurs, la planification des tournées de véhicules, les emplacements de stockage et l'affectation des machines de production. Ces améliorations réduisent les coûts et augmentent l'efficacité opérationnelle ainsi que la prise de décision stratégique.

Mots-clés : ERP ,Optimisation, Achat, Gestion des stocks, Logistique de production, Transport.

1 INTRODUCTION

Le concept de solution logicielle intégrée couvrant l'ensemble des processus d'une entreprise n'est pas nouveau. Dès les prémices de l'informatisation de la gestion de production, certains acteurs avaient développé des suites applicatives intégrées englobant les fonctions commerciales, comptables et administratives, en plus de la production. Aux États-Unis, le terme Manufacturing Resource Planning (MRP) était utilisé pour désigner la planification des moyens de production. Ce concept couvrait la gestion du plan directeur de production, des ressources humaines et équipements, des stocks, des approvisionnements, des commandes et de la logistique. Naturellement, les MRP s'adaptaient aux différentes méthodes de gestion de production. Les ERP (Enterprise Resource Planning) constituent une généralisation des MRP, visant à prendre en charge l'intégralité des processus d'une entreprise : gestion des ressources humaines, comptabilité et finance, administration, ventes, achats, production et logistique.

L'évolution de la stratégie de gestion des opérations, sous l'égide des technologies de l'information, a traversé quatre phases majeures, chacune marquant une avancée significative dans la manière dont les entreprises planifient et gèrent leurs processus de production. La première phase, le MRP (Material Requirements Planning) des années 1970-1980, se concentrait sur la gestion interne des opérations en mettant l'accent sur les matériaux et en utilisant des bases de données produits (nomenclatures) et inventaires. La seconde phase, le MRP II (Manufacturing Resource Planning) des années 1980-1990, élargissait cette perspective vers la fabrication, incluant la gestion de la demande, la planification des ressources, le contrôle de la production et la gestion des coûts.

La troisième phase, l'ERP (Enterprise Resource Planning) des années 1990-2000, recentrait la gestion interne sur l'ensemble de l'entreprise, englobant les activités commerciales, financières, administratives, de ressources humaines ainsi que les activités industrielles de production. Cette méthodologie repose sur une base de données unique, soutenant une approche de gestion des opérations basée sur des processus intégrés interentreprises et un accès illimité aux données opérationnelles. Enfin, la quatrième phase, l'ERP II (Extended Enterprise Resource Planning) à partir des années 2000, élargit la gestion des opérations aux partenariats internes et externes, intégrant la gestion des relations avec les consommateurs, la gestion de la chaîne d'approvisionnement et la gestion du cycle de vie des produits, ainsi que la communication internet avec les partenaires commerciaux. [4] [5] [10]

Les ERP modernes visent à relever divers défis logistiques que les entreprises rencontrent. Parmi ces défis figurent la gestion des stocks, la planification des tournées de livraison, l'optimisation des emplacements de stockage, la traçabilité des produits et la gestion des retours. La gestion des stocks inclut le suivi en temps réel, la

¹ Département de Génie Logistique et transport, École Nationale Supérieure de Technologie (ENST) Dergana, Algérie.

prévision de la demande et l'optimisation des niveaux de stock, ce qui est crucial pour éviter les ruptures de stock et les surstocks. La planification des tournées de livraison implique l'optimisation des itinéraires et la gestion des contraintes, afin de minimiser les coûts de transport et les délais de livraison. L'optimisation des emplacements de stockage vise à organiser efficacement l'espace, facilitant ainsi la préparation des commandes et la réduction des coûts de manutention.

Ces problématiques logistiques ont un impact significatif sur l'efficacité opérationnelle et les coûts. Une mauvaise gestion peut entraîner des perturbations dans les opérations, immobiliser du capital et réduire la satisfaction client, ce qui affaiblit la compétitivité de l'entreprise. Les ERP modernes cherchent à améliorer ces processus en offrant une vision intégrée de la chaîne logistique, des outils d'analyse prédictive et des algorithmes d'optimisation. Par exemple, les technologies de l'intelligence artificielle et de l'Internet des objets (IoT) sont de plus en plus intégrées dans les ERP pour fournir des données en temps réel et des analyses avancées, aidant les entreprises à prendre des décisions plus éclairées et à optimiser leurs opérations logistiques.

Cependant, malgré leurs avancées, les ERP traditionnels présentent plusieurs limites en termes de flexibilité et d'optimisation. Leur rigidité structurelle complique l'adaptation aux changements rapides du marché, et leurs capacités d'analyse prédictive sont souvent limitées. De plus, ils peinent à intégrer des technologies émergentes comme l'IoT ou l'intelligence artificielle avancée. Les entreprises modernes recherchent des solutions plus modulaires et évolutives, capables de s'ajuster à leur croissance et à leurs besoins spécifiques sans nécessiter de lourdes modifications ou mises à niveau coûteuses. Elles exigent également des interfaces plus intuitives et personnalisables, une meilleure intégration avec les systèmes externes, et des capacités avancées de simulation et de modélisation pour la prise de décision stratégique.

Aujourd'hui, plusieurs éditeurs dominent le marché des ERP, proposant des suites complètes et intégrées. Parmi eux, SAP, ORACLE Business Suite et Microsoft avec sa gamme Dynamics sont particulièrement notables. D'autres grands éditeurs, tels que SAGE, offrent également des suites de gestion intégrées qui peuvent être considérées comme des ERP. Les ERP les plus connus et les plus populaires incluent Acumatica Cloud ERP, Deltek Vision, Epicor ERP, FinancialForce ERP, IFS Applications, Microsoft Dynamics 365, Odoo, Oracle, Oracle NetSuite, Ramco ERP Suite, Rootstock ERP, Sage Intacct, SAP ERP, Tyler Technologies ERP, Unit4 ERP, et Workday. Ces solutions variées permettent aux entreprises de choisir l'ERP le mieux adapté à leurs besoins spécifiques, tout en tenant compte des défis logistiques et des exigences de flexibilité et d'optimisation. [1] [6] [7]

2 DÉFINITIONS

2.1 ERP

Somers et Nelson (2003) soulignent que "les systèmes ERP sont les outils logiciels utilisés pour gérer les données de l'entreprise" et qu'ils "aident les organisations à gérer la chaîne d'approvisionnement, la réception, la gestion des stocks, la gestion des commandes clients, la planification de la production, l'expédition, la comptabilité, la gestion des ressources humaines et d'autres fonctions commerciales." [9]

2.2 La gestion des stocks

La gestion des stocks est une activité essentielle dans le domaine de la logistique et de la gestion des opérations. Elle consiste à planifier, organiser et contrôler les niveaux de stocks d'une entreprise afin de garantir un approvisionnement adéquat des produits nécessaires à son fonctionnement, tout en minimisant les coûts liés à la détention des stocks. [8]

2.3 Logistique de distribution

La logistique de distribution fait référence à l'ensemble des activités et processus impliqués dans la gestion efficace du flux de produits finis depuis le point de production jusqu'au point de consommation. Cette composante essentielle de la chaîne logistique vise à assurer la livraison des produits aux clients de manière rapide, fiable et rentable. [8]

2.4 La logistique de production

La logistique de production englobe l'ensemble des activités logistiques liées à la gestion des flux de matières premières, des composants et des produits semi-finis à l'intérieur de l'unité de production. Son objectif principal est

d'optimiser les processus de fabrication en assurant un approvisionnement en temps voulu des matières premières et des composants nécessaires, tout en minimisant les coûts et en maximisant l'efficacité opérationnelle. [8]

3 MÉTHODOLOGIE

Notre méthodologie est répartie sur quatre grands domaines : Achat, Production, WMS et TMS. Notre prototype bien qu'il semble limité à ces quatre secteurs mais il est bel et bien extensibles à d'autres domaines dans le futur. Dans ce qui suit, on va mettre le point sur les méthodes utilisées dans le domaine d'optimisation pour ces quatre domaines.

3.1 Achat

AHP

L'Analytic Hierarchy Process (AHP) est une méthode de décision multicritères développée par Thomas L. Saaty dans les années 1970. Elle structure un problème complexe en une hiérarchie composée de plusieurs niveaux : l'objectif global, les critères, les sous-critères et les alternatives. Chaque élément de la hiérarchie est comparé par paires en termes de leur contribution relative à l'élément supérieur, en utilisant une échelle de jugement allant de 1 (également important) à 9 (extrêmement plus important). Ces comparaisons par paires sont utilisées pour établir des matrices de jugement dont les valeurs propres sont calculées pour déterminer les poids relatifs de chaque élément. L'AHP intègre à la fois des aspects quantitatifs et qualitatifs, permettant ainsi une analyse systématique et cohérente des choix possibles, facilitant ainsi la prise de décision dans des contextes complexes où de multiples critères doivent être pris en compte. [11]

Modèle Mathématique pour AHP avec Automatisation des Comparaisons par Paires

Notations

- $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$: Ensemble des alternatives (fournisseurs).
- $C = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$: Ensemble des critères.
- v_{ik} : Valeur de l'alternative A_i pour le critère C_k .
- p_k : Pire valeur possible pour le critère C_k (fournie par l'utilisateur).
- M_{jk} : Meilleure valeur parmi les alternatives pour le critère C_k .
- $e_{ijk} = |v_{ik} - v_{jk}|$: Écart entre la valeur de l'alternative A_i et la valeur de l'alternative A_j pour le critère C_k .

Calcul des "pas"

Pour chaque critère C_k :

$$s_k = \frac{|p_k - M_{jk}|}{9}$$

Remplissage de la Matrice de Comparaison par Paires

Pour chaque critère C_k , remplir la matrice de comparaison par paires $A^{(k)}$ où chaque élément $a_{ij}^{(k)}$ est calculé en fonction du nombre de "pas" entre les alternatives A_i et A_j :

Si v_{ik} est meilleur que v_{jk} , Alors :

$$a_{ij}^{(k)} = \left\lceil \frac{e_{ijk}}{s_k} \right\rceil$$

si non

$$a_{ji}^{(k)} = \left\lceil \frac{e_{ijk}}{s_k} \right\rceil$$

Ensuite, l'étape suivante consiste à faire la normalisation de ces valeurs.

Normalisation de la Matrice et Calcul des Poids

Pour chaque matrice $A^{(k)}$:

1. Somme des colonnes :

$$S_j^{(k)} = \sum_{i=1}^m a_{ij}^{(k)}$$

2. Normalisation des éléments de la matrice :

$$a_{ij}^{\text{norm}(k)} = \frac{a_{ij}^{(k)}}{S_j^{(k)}}$$

3. Calcul des poids :

$$w_i^{(k)} = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ij}^{\text{norm}(k)}}{m}$$

Agrégation des Poids

Pour obtenir le score global W_i de chaque alternative A_i :

1. Poids des critères :

$$w_k$$

obtenus à partir de la matrice de comparaison des critères (similaire à la méthode utilisée pour les alternatives).

2. Score global :

$$W_i = \sum_{k=1}^n w_k \cdot w_i^{(k)}$$

Interprétation des Résultats

L'alternative avec le score global W_i le plus élevé est considérée comme la meilleure option parmi les fournisseurs.

3.2 Production

Branch and Bound :

L'algorithme de Branch and Bound (BB) est une méthode algorithmique utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation combinatoire et de programmation mathématique, en particulier les problèmes NP-difficiles. Introduit par A.H. Land et A.G. Doig en 1960, cet algorithme se base sur l'exploration systématique de l'espace de solution en le subdivisant (branching) et en éliminant (bounding) les sous-espaces qui ne peuvent pas contenir la solution optimale. [2]

Modèle mathématique

Programmation par contrainte

La programmation par contrainte (Constraint Programming en anglais) est un paradigme de programmation où les problèmes sont formulés en termes de variables dont les valeurs doivent respecter un ensemble de contraintes. Ce paradigme est particulièrement efficace pour résoudre des problèmes combinatoires complexes, où de nombreuses variables interdépendantes doivent satisfaire certaines conditions simultanément.

Fonctionnement des PPC

Dans la PPC, on définit un problème en décrivant les variables de décision et les contraintes qui les relient.

- **Variables de décision :** Elles représentent les éléments inconnus du problème que l'on cherche à déterminer. Par exemple, dans un problème d'ordonnancement de tâches, les variables de décision pourraient être les dates de début et de fin de chaque tâche.
- **Contraintes :** Elles expriment les relations entre les variables de décision et limitent les valeurs possibles qu'elles peuvent prendre. Par exemple, dans le problème d'ordonnancement de tâches, une contrainte pourrait stipuler qu'une tâche ne peut pas commencer avant que sa tâche précédente ne soit terminée.

L'objectif de la PPC est de trouver une solution qui satisfasse à toutes les contraintes.

Notations :

- $M = \{M_1, M_2, \dots, M_m\}$: Ensemble de machines, où m est le nombre total de machines.
- $J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\}$: Ensemble des ordres de fabrication (OF), où n est le nombre total d'ordres de fabrication.

- O_{ij} : Opération j de l'ordre de fabrication i , où i représente l'indice de l'ordre de fabrication et j l'indice de l'opération dans cet ordre.
- p_{ij} : Temps de traitement de l'opération O_{ij} sur la machine assignée.
- s_{ij} : Temps de début de l'opération O_{ij} .
- C_{ij} : Temps de fin de l'opération O_{ij} .
- T_k : Temps total d'utilisation de la machine M_k , où k représente l'indice de la machine.

Variables de décision

- x_{ijk} : Variable binaire, vaut 1 si l'opération O_{ij} est assignée à la machine M_k , sinon 0.
- C_{max} : Temps total pour terminer toutes les opérations (makespan).

Contraintes

1. Assignment unique

Chaque opération doit être assignée à exactement une machine.

$$\sum_{k=1}^m x_{ijk} = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad \forall j = 1, \dots, \text{nb_op}(i)$$

où $\text{nb_op}(i)$ représente le nombre d'opérations dans l'ordre de fabrication i .

2. **Ordonnancement des opérations sur la même machine** Si O_{ij} précède O_{il} sur la même machine M_k , alors :

$$s_{il} \geq s_{ij} + p_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad \forall j, l = 1, \dots, \text{nb_op}(i) \\ \text{avec } j \neq l \quad \text{et } x_{ijk} = 1 \quad \text{et } x_{ilk} = 1$$

3. **Contraintes de précédence des opérations dans un OF** Si O_{ij} précède $O_{i(j+1)}$ dans l'ordre de fabrication i , alors :

$$s_{i(j+1)} \geq s_{ij} + p_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, n, \quad \forall j = 1, \dots, \text{nb_op}(i) - 1$$

4. **Non-conflit sur les machines** Deux opérations ne peuvent pas être exécutées en même temps sur la même machine :

$$(s_{ij} \geq s_{ik} + p_{ik}) \vee (s_{ik} \geq s_{ij} + p_{ij}) \quad \forall i, j, k \quad \text{avec } x_{ijm} = 1 \quad \text{et } x_{ikm} = 1 \quad \text{et } j \neq k$$

5. **Temps total d'utilisation de la machine** Le temps total d'utilisation de la machine M_k est la somme des temps de traitement des opérations assignées à cette machine :

$$T_k = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{\text{nb_op}(i)} p_{ij} x_{ijk} \quad \forall k = 1, \dots, m$$

6. **Équilibrage de la charge de travail** Les temps d'utilisation des machines doivent être équilibrés pour minimiser la différence entre le temps d'utilisation maximum et minimum :

$$\min \left(\max_{k=1, \dots, m} (T_k) - \min_{k=1, \dots, m} (T_k) \right)$$

Fonction Objectif L'objectif est de minimiser la différence entre le temps d'utilisation maximum et minimum des machines, de maximiser leur utilisation et de minimiser les temps d'arrêt. Pour cela, nous combinons ces objectifs dans une fonction linéaire pondérée :

$$\min \left(\alpha \left(\max_{k=1,\dots,m} (T_k) - \min_{k=1,\dots,m} (T_k) \right) + \beta \sum_{k=1}^m \text{idle_time}_k \right)$$

où :

- α et β sont des poids pour équilibrer les objectifs.
- idle_time_k est le temps d'arrêt (temps où la machine M_k n'est pas utilisée).

3.3 WMS

NSGA-II

L'algorithme NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) est un algorithme évolutionnaire développé par Kalyanmoy Deb et al. en 2002 pour résoudre des problèmes d'optimisation multi-objectifs. Cet algorithme améliore les méthodes précédentes en introduisant des mécanismes efficaces pour le tri non-dominé et la diversité de la population.

Il utilise une approche de tri en front de Pareto pour classer les solutions en différents niveaux de domination, où les solutions de front 1 sont non dominées par aucune autre solution, celles de front 2 sont dominées par celles de front 1, et ainsi de suite.

Pour maintenir la diversité, NSGA-II emploie un opérateur de crowding distance, qui calcule la densité de solutions autour d'une solution donnée, afin de favoriser la diversité dans la population. En utilisant des opérateurs génétiques comme la sélection, le croisement et la mutation, NSGA-II itère pour générer des populations successives de solutions, recherchant un équilibre entre les différents objectifs en compétition. L'algorithme est largement utilisé pour sa robustesse et son efficacité dans diverses applications d'optimisation multi-objectifs. [3]

Variables de Décision

- $x_{pi,x,y,z}$: Variable continue représentant la proportion de la quantité du produit p_i stockée dans la cellule (x, y, z) .

$$0 \leq x_{pi,x,y,z} \leq 1$$

Paramètres

- P : Ensemble de produits.
- q_i : Quantité du produit p_i .
- v_i : Volume unitaire du produit p_i .
- r_i : Valeur de rotation du produit p_i .
- W : Entrepôt avec dimensions $X \times Y \times Z$.
- E : Ensemble de points d'expédition.
- $d_{(x1,y1,z1),(x2,y2,z2)}$: Distance entre deux cellules $(x1,y1,z1)$ et $(x2,y2,z2)$.
- $\text{Distance}((x,y,z), e_j)$: Distance entre la cellule (x,y,z) et le point d'expédition e_j .
- $\text{Capacité}_{(x,y,z)} = 0.96$: Capacité d'une cellule.

Objectifs

- **Minimiser la distance entre les produits à grande rotation et les points d'expédition :**

$$f_1 = \sum_{p_i \in P} \sum_{e_j \in E} r_i \cdot \left(\sum_{(x,y,z) \in W} x_{pi,x,y,z} \cdot \text{Distance}((x,y,z), e_j) \right)$$

— **Minimiser la distance entre les produits du même type :**

$$f_2 = \sum_{p_i \in P} \sum_{(x_1, y_1, z_1) \in W} \sum_{(x_2, y_2, z_2) \in W, (x_1, y_1, z_1) < (x_2, y_2, z_2)} d_{(x_1, y_1, z_1), (x_2, y_2, z_2)} \cdot x_{pi, x_1, y_1, z_1} \cdot x_{pi, x_2, y_2, z_2}$$

Contraintes

— **Capacité de l'entrepôt :** Le volume total de produit i dans chaque cellule ne doit pas dépasser la capacité de la cellule.

$$\sum_{p_i \in P} x_{pi, x, y, z} \leq 0.96, \quad \forall (x, y, z) \in W$$

3.4 TMS

Modélisation Mathématique du Problème de Tournées de Véhicules avec Capacités (CVRP) :

L'objectif est de déterminer un ensemble de routes pour une flotte de véhicules, de manière à desservir tous les clients tout en minimisant le coût total et en respectant les contraintes de capacité.

Données et Paramètres :

- $G = (V, E)$: un graphe où $V = \{0, 1, \dots, n\}$ est l'ensemble des sommets, avec 0 représentant le dépôt et $1, \dots, n$ représentant les clients.
- c_{ij} : le coût (ou la distance) de déplacement entre le sommet i et le sommet j .
- d_i : la demande du client i .
- Q : la capacité maximale de chaque véhicule.
- K : le nombre de véhicules disponibles.

Variables de Décision :

- x_{ij}^k : variable binaire indiquant si le véhicule k utilise l'arête (i, j) (1 si vrai, 0 sinon).
- u_i : variable continue représentant la charge cumulée livrée au sommet i .

Fonction Objectif : Minimiser le coût total de distribution :

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n c_{ij} x_{ij}^k$$

Contraintes :

1. Chaque client est visité exactement une fois par un seul véhicule :

$$\sum_{k=1}^K \sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij}^k = 1 \quad \forall i = 1, \dots, n$$

2. Les véhicules partent et reviennent au dépôt :

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0}^k = 1 \quad \forall k = 1, \dots, K$$

3. Flux de véhicules pour assurer des routes fermées :

$$\sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij}^k = \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ji}^k \quad \forall j = 1, \dots, n, \forall k = 1, \dots, K$$

4. Capacité des véhicules :

$$\sum_{i=1}^n d_i \left(\sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij}^k \right) \leq Q \quad \forall k \in \{1, 2, \dots, m\}$$

$$\forall i = 1, \dots, n$$

5. Conservation des flux :

$$\sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ij} = \sum_{j=0, j \neq i}^n x_{ji} \quad \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$$

6. Domaines des variables :

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad \forall i, j = 0, \dots, n, \forall k = 1, \dots, K$$

$$u_i \geq 0 \quad \forall i = 1, \dots, n$$

4 IMPLEMENTATION

Environnement de Développement et Architecture Logicielle

PostgreSQL : PostgreSQL a été choisi comme système de gestion de base de données relationnelle (SGBDR) en raison de sa stabilité, de sa fiabilité et de sa conformité aux standards SQL, en faisant une base solide pour la gestion des données d'un ERP.

Java : Java a été sélectionné pour développer l'ERP en raison de ses nombreux avantages, notamment sa modularité, sa portabilité via la JVM, son vaste écosystème de bibliothèques open source, sa sécurité renforcée et sa grande communauté de développeurs.

Architecture

Couche de Présentation : La couche de présentation utilise JavaFX pour créer une interface graphique riche et interactive, facilitant ainsi la gestion des diverses opérations logistiques au sein de l'entreprise. L'utilisation de CSS permet de styliser les composants de l'interface de manière flexible et uniforme, assurant une cohérence visuelle à travers toute l'application.

- Interface Graphique Utilisateur (GUI) : JavaFX permet de créer des interfaces visuellement attrayantes et interactives avec un ensemble de contrôles et de composants graphiques sophistiqués.
- Personnalisation avec CSS : CSS permet de styliser les composants de l'interface, assurant une cohérence visuelle et facilitant l'adaptation aux préférences des utilisateurs.

Couche de Logique Métier :

La couche de logique métier encapsule toutes les règles et processus nécessaires pour gérer efficacement les opérations logistiques. Java est utilisé pour implémenter les règles métiers et les processus, garantissant la fiabilité et la portabilité.

- Gestion des Règles Métier : Application des règles et politiques de l'entreprise, incluant des règles de validation des données et des calculs spécifiques.
- Coordination des Processus : Gestion du flux de travail depuis la réception d'une commande jusqu'à l'expédition finale.
- Interactions entre Modules :
 - Module Achat : Gère les processus d'approvisionnement et la gestion des fournisseurs.
 - Module Production : Gère la planification et l'exécution de la production.
 - Module Production : Gère la planification et l'exécution de la production.
 - Module Entrepôt : Gère les stocks, incluant l'inventaire et le réapprovisionnement. jMetal est utilisé pour développer l'algorithme d'optimisation des stocks.

- Module Transport : Coordonne les expéditions et les livraisons. VROOM optimise les itinéraires et s'intègre avec OpenStreetMap pour des calculs précis.

Couche d'Accès aux Données :

Cette couche assure la communication avec PostgreSQL, exécutant des requêtes SQL et gérant les transactions de données.

- Communication avec la Base de Données : Établir et maintenir la connexion avec PostgreSQL.
- Gestion des Transactions : Garantir des opérations de modification des données atomiques, cohérentes, isolées et durables.
- JDBC (Java Database Connectivity) : Fournit une API pour exécuter des requêtes SQL.
- ORM (Object-Relational Mapping) : Hibernate simplifie les opérations sur les données en mappant les objets Java aux tables de la base de données.

Couche de Données :

La couche de données stocke et gère toutes les informations du système ERP, offrant un stockage sécurisé et structuré des données essentielles aux opérations de l'entreprise. PostgreSQL est utilisé comme SGBD pour cette couche.

5 TESTS ET RÉSULTATS

5.1 ACHAT

Test : Problème de Choix de Fournisseur

Les étapes suivantes présentent une méthodologie structurée et implémentée dans notre logiciel pour résoudre le problème de sélection de fournisseur.

Problème à résoudre :

- On a trois fournisseurs (Fournisseur A, Fournisseur B, Fournisseur C)
- On a trois critères :
 - Prix : à minimiser
 - Délai : à minimiser
 - Qualité : à maximiser

	PRIX	DELAI	QUALITE
Fournisseur A	437 140 DA	20 j	Moyenne
Fournisseur B	309 100 DA	45 j	Mauvaise
Fournisseur C	506 000 DA	30 j	Très bonne

Pour le critère qualitatif 'QUALITE' on met :

- Très mauvaise : 1
- Mauvaise : 2
- Moyenne : 3
- Bonne : 4
- Très bonne : 5
- **Résultat** : https://drive.google.com/drive/folders/1ZdaGyV6ZenLVH3vyFrIkObgaICzI_nl5?usp=sharing

5.2 PRODUCTION

Test : Ordonnancement

L'ordonnancement des ordres de fabrication sur les machines dans un environnement de production à capacité limitée, pose des défis importants en termes d'optimisation des ressources et des délais. Ce problème est complexe pour les entreprises qui cherchent à maximiser leurs efficacité tout en réduisant les coûts opérationnels.

Problème à résoudre :

On a fait la simulation des affectation avec un exemple de plusieurs machines, dont 5 sont disponibles, et 15 Ordres de Fabrication, chaque ordre est composé de 3 opérations, avec différentes temps d'exécution, générer aléatoirement.

Le résultat obtenu représente l'affectation des OF et des Opérations aux machines, avec une utilisation des ressources équilibrée, et des temps d'arrêts minimales

- **Résultat :** https://drive.google.com/drive/folders/1ZdaGyV6ZenLVH3vyFrIkObgaICzI_nl5?usp=sharing

5.3 Warehouse Management System

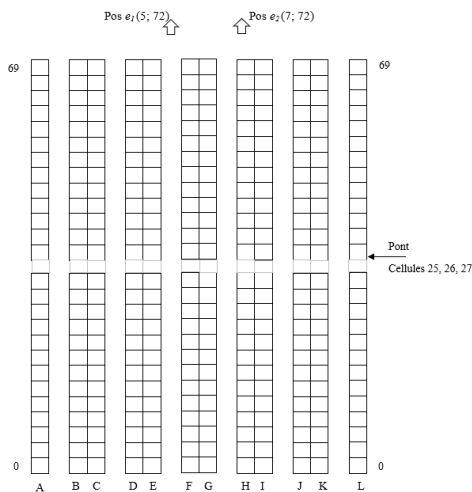
Test : Problème de Choix d'emplacement dans un Entrepôt

La gestion des entrepôts est essentielle pour garantir l'efficacité et la précision des opérations. Le choix d'emplacement est important pour assurer une gestion efficace. Ce processus est automatisé grâce à notre logiciel qui propose des affectations optimisées, ce qui permet de minimiser les erreurs humaines.

Problème à résoudre

L'entrepôt de Sidi-Moussa est un dépôt appartenant à ELKendi Pharma où cette dernière stocke uniquement les produits finis.

Schéma zone de stockage entrepot Sidi Moussa :



- Nombre de racks : 12 (de A à L)
- Rayonnage : 69 (78 A)
- Niveau : 5 niveaux (de 0 à 5)
- Pont vide (niveau 1 et 2) 252627
- Points d'expédition situés à la fin de l'entrepôt (e1, e2)

Pos e2 (7 ; 72)

Pos e1 (5 ; 72)

Forme du médicament	Exemple de médicament	Nombre de boîte par colis	Nombre de colis par palette	volume/boîte	rotation	Quantité
Liquide	EZILAX Syrup	24	40	1000	0,9	89280
	FLAZOL Oral Suspension	60	30	533,3333333	0,85	129600
	MENTEX Syrup	60	30	533,3333333	0,88	106200
	PROF Oral Suspension	60	30	533,3333333	0,8	109800
	CALEVIT Syrup	60	30	533,3333333	0,6	91800
Semi-solide	TABETA pommade	150	64	100	0,2	76800
	ZETA Cream	150	64	100	0,82	9600
	ZETA POMMADE	150	64	100	0,89	9600
	ZETACORT Cream	150	64	100	0,65	105600
	TABIFLEX COOL Gel	150	24	266,6666667	0,3	133200
Comprimé	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	160	24	250	0,7	99840
	LANZAPPREX	160	18	333,3333333	0,6	129600
	FLAZOL 500 Coat Tablets	200	50	96	0,94	80000
	RAPIDUS	200	70	68,57142857	0,96	28000

- **Résultat :** https://drive.google.com/drive/folders/1ZdaGyV6ZenLVH3vyFrIkObgaICzI_nl5?usp=sharing

5.4 Transport Management System

Test : **Problème de Tournées de Véhicules avec Capacités (CVRP)**

Optimiser les opérations logistiques est essentiel pour garantir l'efficacité des services tout en minimisant les coûts opérationnels. Le Problème de Tournées de Véhicules avec Capacités (CVRP) est une problématique cruciale dans ce domaine, car il permet de planifier des tournées de livraison de manière optimale.

PROBLÈME À RÉSOUDRE

- On a onze clients (Client 1, Client 2, Client 3, Client 4, Client 5, Client 6, Client 7, Client 8, Client 9, Client 10, Client 11).
- On a divers produits à livrer à chaque client, chaque produit ayant une demande spécifique.
- L'objectif est d'optimiser les tournées des véhicules pour minimiser le coût total de distribution tout en respectant les contraintes de capacité des véhicules.

- **Résultat :** https://drive.google.com/drive/folders/1ZdaGyV6ZenLVH3vyFrIkObgaICzI_nl5?usp=sharing

Données des commandes

Client	Produit	Quantité commandée
Client 1	PROF Oral Suspension	33245
	TABETA pommade	23108
	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	17314
Client 2	RAPIDUS	21134
	TABIFLEX COOL Gel	36355
Client 3	PROF Oral Suspension	14628
	TABIFLEX COOL Gel	11689
	ZETACORT Cream	36706
Client 4	FLAZOL Oral Suspension	25834
	ZETA POMMADE	8347
Client 5	ZETACORT Cream	33344
	EZILAX Syrup	11074
	PROF Oral Suspension	27330
Client 6	TABIFLEX COOL Gel	26093
	FLAZOL Oral Suspension	45790
	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	13091
Client 7	TABIFLEX COOL Gel	11349
	MENTEX Syrup	43563
Client 8	MENTEX Syrup	44638
	TABETA pommade	42018
Client 9	TABIFLEX COOL Gel	10891
	ZETACORT Cream	13818
	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	28386
Client 10	TABIFLEX COOL Gel	22606
	FLAZOL Oral Suspension	33987
	ZETACORT Cream	2528
Client 11	FLAZOL Oral Suspension	13730
	ZETA Cream	7169
	CO-SARTEG 160/12.5 F/C	28837

6 CONCLUSION

L'intégration de l'optimisation dans un système ERP classique apporte une valeur ajoutée considérable en transformant la gestion des opérations en un processus plus efficace et intelligent. L'optimisation permet avant tout de réduire les coûts d'achat des matières premières grâce à une analyse multicritère d'aide à la décision pour le choix des fournisseurs. Cette approche permet de sélectionner les fournisseurs offrant le meilleur rapport qualité-prix ainsi que d'autres critères souhaités par l'utilisateur.

En ce qui concerne la gestion des entrepôts, l'optimisation des espaces de stockage est une autre contribution majeure. En suggérant les emplacements optimaux pour les produits en fonction de leur classe et de leurs caractéristiques, le système permet une utilisation plus efficace de l'espace disponible. Cela facilite également l'accès rapide aux produits, améliorant ainsi l'efficacité des opérations de stockage et de récupération.

L'optimisation des tournées de véhicules apporte également des bénéfices significatifs en termes de coûts et de délais. En planifiant les itinéraires de manière à minimiser les distances parcourues et à respecter les contraintes de livraison, le système réduit les coûts de transport et améliore la ponctualité des livraisons. Enfin, l'optimisation de l'utilisation des machines de fabrication permet une meilleure allocation des ressources, réduisant les temps d'arrêt et augmentant la productivité globale.

Pour maximiser encore plus les avantages de l'optimisation, il est prévu d'intégrer de nouveaux modules tels que les ressources humaines, la comptabilité, la distribution et les ventes, ainsi que le CRM. De plus, l'incorporation de technologies avancées comme l'OCR (Reconnaissance Optique de Caractères), des outils de prévision basés sur le machine-learning, l'IoT pour la gestion des actifs, et l'intelligence artificielle pour l'automatisation des processus promet de rendre le système ERP encore plus performant et adaptable aux besoins futurs des entreprises.

RÉFÉRENCES

- [1] Blain, F. A. (2006). Présentation générale des ERP et leur architecture modulaire. Developpez.com.
- [2] Boyd, S., Mattingley, J. (2007). Branch and bound methods. Notes for EE364b, Stanford University, 2006, 07.
- [3] Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., Meyarivan, T. A. M. T. (2002). A fast and elitist multiobjective genetic algorithm : NSGA-II. IEEE transactions on evolutionary computation, 6(2), 182-197.
- [4] Ganesh, K., Mohapatra, S., Anbuudayasankar, S. P., Sivakumar, P. (2014). Enterprise resource planning : fundamentals of design and implementation. Springer.
- [5] Harwood, S. (2017). ERP : the Implementation Cycle. Routledge.
- [6] Lequeux, J. L. (2011). Manager avec les ERP : architecture orientée services (SOA). Editions Eyrolles.
- [7] Panorama Consulting Group. (n.d.). THE 2024 TOP 10 ERP Systems Report. In Panorama Consulting.
- [8] Pimor, Y., Fender, M. (n.d.). Logistique : Production, distribution, soutien. L'usine Nouvelle.
- [9] Somers, T. M., Nelson, K. G. (2003). The impact of strategy and integration mechanisms on enterprise system value : Empirical evidence from manufacturing firms. European Journal of Operational Research, 146(2), 315-338.
- [10] Sumner, M. (2013). Enterprise resource planning. Pearson Education.
- [11] Vaidya, O. S., Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process : An overview of applications. European Journal of operational research, 169(1), 1-29.