

Université CADI AYYAD - Marrakech

Ecole Nationale des Sciences Appliquées

Rapport de stage d'observation

**Spécialité : Systèmes Electroniques Embarqués et Commande des
Systèmes**

Sujet :

La Conduite Autonome des Machines Stockeuses

Réalisé par :

- ELMADI ChoaiB

Encadré par :

- M. Abderahim FAHMI (OCP)
- M. Khalid EZZAHRAOUI (OCP)

Réalisé au sein du groupe OCP



Résumé :

Le marché mondial est aujourd'hui marqué par une concurrence de plus en plus féroce. Pour rester compétitives dans un tel contexte, les entreprises doivent améliorer la qualité de leurs produits et services. Elles doivent donc adopter une politique qui tient compte des évolutions économiques et technologiques actuelles et futures. Conscient de ces enjeux, l'OCP poursuit une vision stratégique en implémentant un programme ambitieux de Smart Mining pour ses installations. Dans le contexte de l'approche digitale de la mine de Benguerir et de l'implémentation des technologies de smart mining, ainsi que dans le cadre du projet de la conduite autonome des machines stockeuses, l'OCP a opté pour le renouvellement et la mise à niveau du système d'automatisation et de supervision pour les machines stockeuses. Ces machines assurent le déchargement du phosphate au niveau de l'épierrage, ce qui confère à cette installation une importance stratégique pour le fonctionnement normal et dégradé de la mine.

C'est dans cette optique que la Direction Exécutive Opérations Industrielles du Site Industriel de Gantour Production Benguerir a lancé une série de projets, dont mon stage d'observation. Ce stage porte sur la digitalisation de la gestion du stock du site OCP Benguerir. Il consiste en l'observation et l'étude des systèmes de pilotage permettant la gestion et la conduite autonome des machines stockeuses, afin de comprendre comment ces systèmes facilitent la prise de décisions et assurent un stockage de phosphate efficient et efficace en termes de durée, de qualité et de performance.

Le système permet de commander les machines de stockage et assure une supervision en temps réel des opérations de stockage du phosphate dans la zone, en utilisant les données fournies par les instruments de mesure. Il respecte les modalités et conditions décrites dans le descriptif technique, tout en prenant en compte les contraintes et obstacles présents sur le terrain. Ainsi, nous avons développé une application de supervision à distance qui simule le processus de stockage en recueillant les données.

Notre projet s'inscrit pleinement dans le cadre de cette stratégie de digitalisation du système par l'implémentation des technologies de smart mining.

Mots clés : OCP, Mine de Benguerir, Smart mining, Automatisation, Supervision, Digitalisation de stock, Industrie 4.0, Machine stockeuse (STACKER), Robotique, PLC

Table des matières :

Résumé	2
Tableau des matières	3
Introduction générale	4
I. Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil OCP	8
1. Introduction :.....	8
2. Présentation de l'organisme d'accueil OCP :.....	8
a) Lieu du stage Site de Gantour : Mine de Benguerir :.....	9
b) La méthode d'exploitation :.....	10
c) Situation graphique, plan d'ensemble de la mine de Benguerir :.....	13
3. Conclusion :	14
II. Chapitre 2 : Contexte et cahier des charges	15
4. Introduction :.....	15
5. L'industrie 4.0 aux portes du Maroc :	15
d) Nouveau défi de l'OCP :.....	15
e) La mine expérimentale de Benguerir :	15
6. Cadre du projet :.....	16
f) Consistance du travail :.....	16
g) Traitement et exploitation des données :.....	16
7. Conclusion :	17
III. Chapitre 3 : Etude du système.....	18
8. Introduction :.....	18
9. Machine stockeuse :	18
10. Analyse fonctionnelle :.....	19
h) Diagramme bête à cornes :.....	19
11. Organes principaux des stockeuses :.....	19
i) Enrouleurs de câbles :.....	19
j) Système de Translation :	20
k) Convoyeur à Flèche :.....	20
l) Système de Levage :.....	21
m) Système de Rotation :	21

n)	Architecture de Commande des Stockeuses :	21
12.	La pile de stock :	22
o)	Disposition des stocks :.....	22
p)	Stock longitudinal :	22
q)	Stock circulaire:	23
r)	Méthodes de stockage :.....	24
13.	Conclusion	24
IV.	Chapitre 4 : Modélisation du système :	25
14.	Introduction :.....	25
15.	Modélisation de la pile de stock :.....	25
s)	Disposition d'un parc de stockage :.....	25
t)	La forme du stock :	25
16.	Modélisation des machines stockeuses :	26
u)	Introduction au robot STACKER :.....	26
v)	Les paramètres du robot STACKER :	27
17.	Conclusion :	28
V.	Chapitre 5 : Environnement de Programmation	29
18.	Introduction :.....	29
19.	Automation Studio :.....	29
w)	Fonctionnalités Principales :	29
x)	Utilisations :.....	30
20.	Step7 SIMATIC Manager :	30
y)	Fonctionnalités Principales :	30
z)	Utilisations :.....	30
21.	Conclusion :	31
VI.	Chapitre 6 : Simulation et résultats :	32
22.	Programmation de l'automate programmable :.....	32
aa)	Modicon M580 :	32
bb)	Modicon M340 :	32
cc)	Structure du projet sur Automation Studio :.....	33
dd)	Programme LADDER :	34
ee)	Environnement de simulation :.....	34
ff)	Interface Homme-Machine (IHM) :.....	35

23. Conclusion :	36
VII. Conclusion générale :	37

Introduction générale :

Dans un monde où l'innovation technologique transforme chaque secteur, l'industrie minière n'échappe pas à cette révolution numérique. Le site minier de Benguerir, reconnu pour ses initiatives avant-gardistes, s'engage résolument dans l'ère du *smart mining*. Ce projet ambitieux vise à intégrer des technologies avancées pour optimiser les opérations, et l'un des aspects clés de cette transformation est la conduite autonome des machines stockeuses.

Dans ce contexte, le programme de stage proposé se concentre sur plusieurs axes majeurs :

- **Réalisation de l'Architecture Globale :** Conception d'une architecture numérique basée sur une API, permettant une intégration fluide et une gestion efficace des différents composants du système.
- **Dimensionnement et Gestion des Ressources :** Détermination des spécifications de la CPU et recensement des entrées/sorties nécessaires pour assurer une performance optimale et une communication efficace.
- **Étude Techno-Commerciale :** Analyse approfondie du système proposé, évaluant sa faisabilité technique et son coût, pour garantir une solution viable sur le plan économique et opérationnel.
- **Élaboration des Algorithmes :** Développement des algorithmes nécessaires pour les différents modes de fonctionnement de la stockeuse autonome, afin d'assurer une conduite précise et adaptée aux besoins du processus de stockage.
- **Programmation du Système :** Rédaction du code nécessaire pour la mise en œuvre du système, en veillant à son intégration harmonieuse avec les autres éléments de l'architecture.
- **Supervision à Distance :** Mise en place d'une salle de contrôle distante pour la gestion en temps réel et la surveillance continue des opérations de stockage, facilitant ainsi une gestion proactive et réactive.
- **Proposition d'Améliorations :** Identification des opportunités d'amélioration pour affiner et optimiser le système, en prenant en compte les retours d'expérience et les évolutions technologiques.
- **Intégration des Technologies Avancées :** Exploration des technologies de pointe qui peuvent être intégrées pour améliorer la performance et la fiabilité du système de stockage autonome.
- **Sécurité et Maintenance :** Évaluation des aspects liés à la sécurité des opérations et à la maintenance préventive et corrective du système pour garantir une longévité et une sécurité optimales.

I. Chapitre 1 : Présentation de l'organisme d'accueil OCP

1. Introduction :

Avant d'entamer le vif du sujet, nous allons essayer dans ce chapitre de présenter l'OCP. Dans lequel j'ai passé le mois du stage, du projet sur lequel j'ai travaillé, ainsi que son environnement. Cette phase reste indispensable pour cerner le sujet de notre présent rapport.

2. Présentation de l'organisme d'accueil OCP :

L'Office chérifien du phosphate (OCP) fondé le 7 août 1920 au Maroc et transformé en 2008 en une société anonyme (OCP SA), est le premier exportateur de phosphate brut, d'acide phosphorique et d'engrais phosphatés dans le monde. Le groupe OCP compte près de 20 000 collaborateurs implantés principalement au Maroc, sur quatre sites miniers et deux complexes chimiques, ainsi que sur d'autres sites internationaux. Le groupe détient plusieurs filiales à l'intérieur et à l'extérieur du Maroc. En 2018, son chiffre d'affaires s'élevait à 55,9 milliards de dirhams marocains, et à 54 milliards de dirhams en 2019.

Le groupe OCP est présent dans six zones géographiques du pays (4 sites d'exploitation minières et deux sites de transformation chimique, OCP constitue un vecteur de développement régional et national important.

Les principaux gisements se trouvent à :

- **OULAD ABDOUN** situé dans la région de Khouribga.
- **GANTOUR** situé dans la région de Youssoufia Benguerir.
- **BOUCRAA** situé dans la région de Boucraa Laâyoune.
- **MESKALA** se trouvant dans la région d'Essaouira, gisement non encore exploité.

L'industrie chimique des phosphates se trouve à :

- **Jorf Lasfar**
- **Safi**

Ports d'embarquement :

- **Casablanca**
- **Jorf Lasfar**
- **Safi**
- **Laâyoune**



Figure 1.1 - Carte des Sites OCP au Maroc

a) Lieu du stage Site de Gantour : Mine de Benguerir :

La PMG (Pôle Mine Gantour) a pour mission l'extraction, le traitement et la livraison des phosphates à partir du gisement de Gantour. Pour la superficie de 2500km², le gisement s'étend sur 125km du Nord en Ouest, sur 20km du Nord en sud, ses réserves sont estimées à environ 31 milliards des mètres cubes et représentant 35% des réserves reconnues à l'échelle nationale. Deux centres sont en exploitation :

- Le centre de **Youssoufia** (depuis 1931) : extraction sur deux mine **Bouchane** et **M'zinda** et bénification (calcination séchage et lavage).
- Le centre de **Benguerir** (depuis 1980) : extraction à ciel ouvert, **Lieu de stage**.

Le potentiel total de production est actuellement de 6.2 millions de tonnes de minerai par an, dont 3.7 millions de tonnes (60%) humide criblé et 2.5 millions de tonnes (40%) de phosphates secs et marchand.

La mine de Benguerir est entrée en production entre 1979 et 1980. Durant la première phase d'exploitation (1980-1994), 3,1 millions de tonnes de phosphate par

an ont été extraites. Durant la seconde phase d'exploitation (1994-2018), 4,5 millions de tonnes de phosphate sont extraites par an.

A 17 km à l'est de la ville de Benguerir et à 77 km de Youssoufia, la mine à ciel ouvert de Benguerir est implantée dans la partie orientale du gisement de Gantour. Depuis 1965, le site fait l'objet d'une série d'études géologiques de reconnaissance et de valorisation. Son plan de d'enveloppement a été conçu de façon à permettre une évolution progressive de la capacité de production. L'étape actuelle vise à faire passer le potentiel d'extraction de 3,10 à 4,5 millions 4 de tonnes par an à l'horizon 2018. Il est situé entre les massifs des **Rhamna** au Nord et les **Jbilet** au Sud. A l'ouest il est limité par les collines jurassiques de **Mouissat** et se prolonge à l'est jusqu'aux rives de l'ouest **Tassaout**. Le bassin des **Ganntour** renferme deux centres miniers, le premier à l'**Youssoufia** qui se trouve à l'extrémité occidentale du bassin et le deuxième à **Benguerir** au centre de celui-ci.

b) La méthode d'exploitation :

La mine de Benguerir est implantée dans la partie centrale du gisement de Gantour de nature sédimentaire, celui-ci consiste en une alternance de couche du phosphate et d'intercalaire. L'exploitation à Benguerir se fait à ciel ouvert. La méthode d'exploitation actuelle est une méthode s'élective de récupération des couches de phosphate : on procède au début par la récupération de la terre végétale le recouvrement stérile, après avoir été foré et sauté, est décapé au moyen de Draglines et de Bulldozers. Ensuite, on procède au défruitage qui consiste à gerber et charger le phosphate pour le transporter via des camions. Ces opérations se répètent jusqu'à l'exploitation de tous les niveaux et après aménagement des terres remuer on procède à la plantation des arbres. Nous présenterons, dans la **figure 1.2**, un aperçu global du processus d'extraction suivi au sein de la mine de Benguerir.

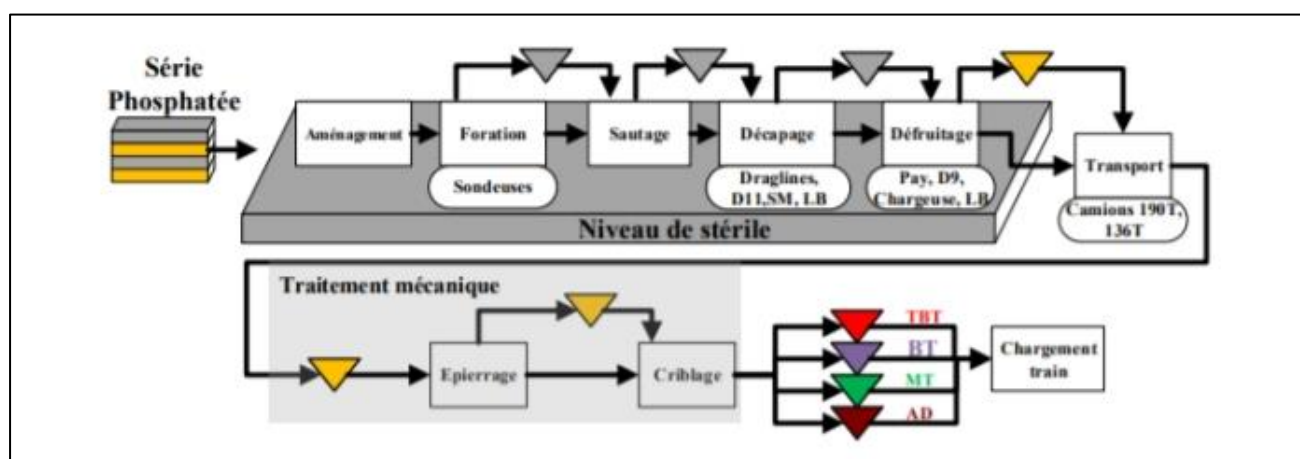


Figure 1.2 - Description du Processus Global de la Mine de Benguerir

La série phosphatée comme celle des autres zones du bassin de Gantour se présente sous forme d'alternance du niveau phosphaté et stérile. La coupe synthétique du gisement de Benguerir permet de distinguer les différentes couches phosphatées ainsi que leurs intercalaires. Ces derniers sont des niveaux repérés, sur lesquels,

l'exploitation se base pour faire une meilleure sélection. La production de Benguerir est expédiée :

- A **Safi** pour un traitement chimique avant sa valorisation.
- A **Yousoufia** pour être utilisée comme appoint au phosphate noir.

La production du phosphate se fait en étape comme suit :

- ❖ **Aménagement du terrain** : Cette phase est une étape préparatoire du terrain. Pour les étapes à venir, elle consiste en premier lieu à faire l'opération de surfacage qui a comme objectif d'enlever tous les éléments indésirables ou les obstacles existants sur la terre et de rendre la surface du terrain plus appropriée pour le déplacement de la machine qui va travailler dans cette zone. Cette étape inclut également la construction des pistes qui sont de deux types :
 - **Pistes principales** : ce sont des pistes de roulage (slots 1, 2, 3, 4, 5).
 - **Pistes secondaires** : ce sont des pistes ou des accès provisoires pour faciliter l'entrée ou la sortie des machines.

Cette étape est assurée par un parc d'équipement constitué (**figure 1.3**).



Figure 1.3 - Equipements d'Aménagement Niveleuse, Paydozer, Bulldozer D11 et D9

- ❖ **Foration** : La foration est un maillon dans la chaîne d'extraction. Elle consiste à confectionner des trous dans le sol pour y loger l'explosif. Il s'agit d'assurer la pénétration d'un outil dans le sol, appelé tricône, monté au bout d'une tige de 13 m, et de le relever une fois la profondeur désirée atteinte. Par ailleurs, la maille de foration, le diamètre des trous et le fonçage dépendent de la nature du terrain. Le parc matériel de l'OCP dispose de quatre sondeuses.



Figure 1.4 - Opération de Foration

- ❖ **Sautage** : Cette étape a comme objectif la fragmentation du terrain par des charges explosives (dynamite posée dans les trous) des morts-terrains (couches inutiles de terrain) suivant une granulation déterminée. Les trous forés sont remplis par l'explosif qui permet de fragmenter les intercalaires durs pour qu'ils puissent être enlevés par les engins de décapage.



Figure 1.5 - Opération de Sautage

- ❖ **Décapage** : Enlèvement des "terrains morts" qui recouvrent le premier niveau phosphaté exploitable. Cette opération est assurée par les engins (**figure 1.6**), chacun étant utilisé selon le niveau et les caractéristiques du terrain à décaper.



Figure 1.6 – Opération de Décapage

- ❖ **Défruitage** : C'est la phase de récupération de la couche phosphatée. La première sous-opération, dite de gerbage, consiste à ramasser le phosphate au milieu de la tranchée de manière diagonale afin de faciliter le chargement, d'augmenter le rendement de la chargeuse et de réduire le taux de salissement. La deuxième sous-opération consiste à charger le phosphate dans des camions qui vont le transporter par la suite vers la destination souhaitée.



Figure 1.7 – Opération de Défruitage par Pelle Hydraulique

- ❖ **Transport** : Le transport du phosphate ou du stérile vers la trémie ou vers les décharges se fait grâce à des camions-bennes de grande capacité (110 et 170 tonnes). La liaison entre ces différents points est assurée par un réseau de pistes. Le transport sur de courtes distances s'effectue par les camions de l'OCP.



Figure 1.8 – Opération de Transport par Camions

- ❖ **Épierreage de phosphate** : L'installation d'épierreage est située à 2 km de l'installation de criblage (KOCH). La liaison entre ces deux installations est assurée par le convoyeur T1. Elle est conçue pour pouvoir épierer des couches différentes de phosphate, chacune à part.
- ❖ **Criblage** : Le phosphate épieré est acheminé par le convoyeur T1 et déversé dans une goulotte de répartition à ouverture variable en 1, 2 ou 3 positions pour alimenter les cinq trémies (A, B, C, D, E).

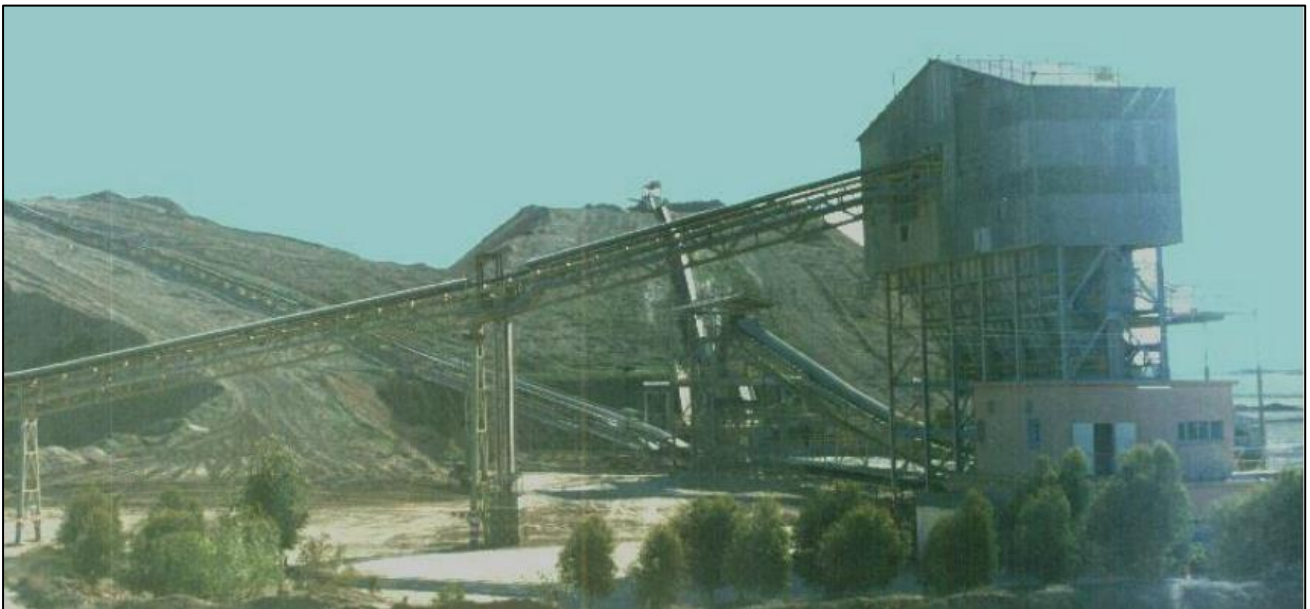


Figure 1.9 – Opération du Deuxième Criblage

Après l'extraction, le minerai de phosphate de Benguerir est acheminé par voie routière ou ferrée jusqu'aux usines chimiques de Safi et de Jorf Lasfar. La production destinée à l'export transite par le port minéralier de Safi.

c) Situation graphique, plan d'ensemble de la mine de Benguerir :

Le gisement de Benguerir constitue la partie centrale du bassin des Gantour. Il a fait l'objet d'une série d'études géologiques de reconnaissance et de valorisation ; les études ont été entamées en 1965, et l'exploitation n'a eu lieu qu'en 1985. Le secteur d'étude fait partie du bassin de Gantour. Dans ce paragraphe, nous présenterons ses principales caractéristiques. Il est l'un des quatre grands gisements de phosphate que recèle le pays. Il est situé au sud de la Meseta occidentale marocaine. Il est bordé au nord par le massif primaire de Rehamna, à l'est par le cours d'Oued Tassaout, au sud par le massif paléozoïque de Jbilet, et à l'ouest par le massif mésozoïque de Mouisset.

Il s'agit d'un gisement dont l'étendue est de 125 km d'est en ouest et de 20 km du nord au sud. Il recouvre une superficie de 2500 km² et ses réserves sont estimées à environ 31 milliards de m³, soit 35 % des réserves nationales. Indiqué sur la **(figure 1.10)**.

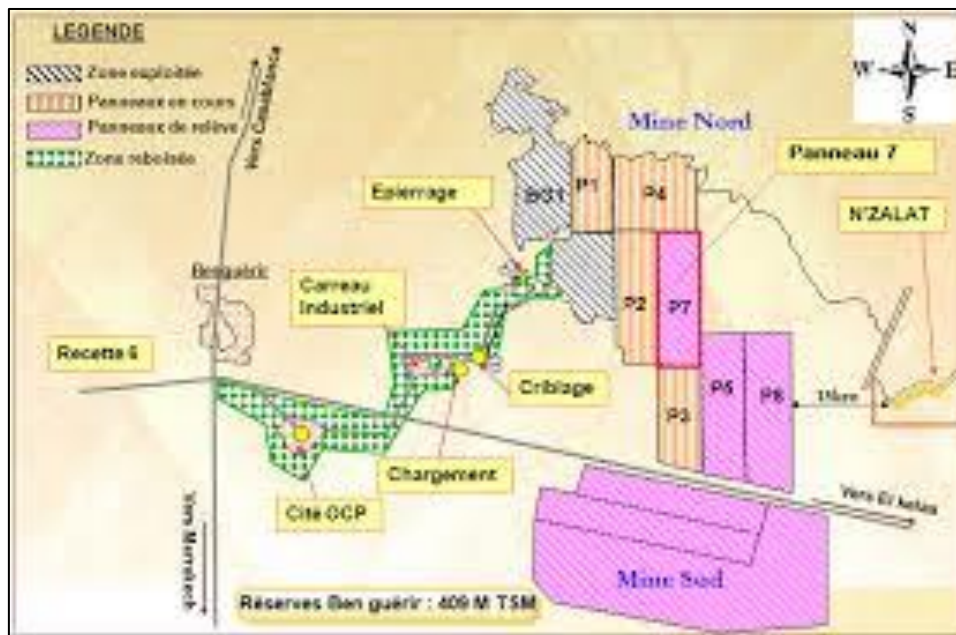


Figure 1.10 - Vue Globale de la Mine de Benguerir

3. Conclusion :

Nous avons essayé, dans ce chapitre, de présenter de manière synthétique l'industrie d'extraction de phosphate à la mine de Benguerir. Par la suite, nous avons expliqué en détail le processus extractif utilisé dans cette industrie pour obtenir une connaissance suffisante de ce type d'industrie, pouvoir mieux analyser les travaux existants dans ce domaine et justifier l'intérêt de ce projet.

II. Chapitre 2 : Contexte et cahier des charges

4. Introduction :

L'industrie moderne a beaucoup évolué depuis sa première édition au XVIIIe siècle. Pendant des siècles, la plupart des biens, y compris les armes, les outils, la nourriture, les vêtements et les logements, ont été fabriqués à la main ou en utilisant des outils très modestes. Cela a changé à la fin du XVIIIe siècle avec l'introduction des procédés de fabrication. La progression depuis l'Industrie 1.0 a connu une montée rapide menant à la prochaine ère industrielle : l'Industrie 4.0. Elle est définie comme la prochaine phase de la numérisation du secteur manufacturier. En effet, c'est une véritable révolution industrielle succédant aux trois phases d'évolution majeures qualifiées de révolutions : la mécanisation, l'industrialisation, et l'automatisation.

5. L'industrie 4.0 aux portes du Maroc :

d) Nouveau défi de l'OCP :

Le groupe Office Chérifien du Phosphate (OCP) s'est engagé dans plusieurs programmes industriels afin d'améliorer sa production dans ses différentes unités en relevant plusieurs défis. Parmi ces défis figure la révolution numérique et la digitalisation, afin de négocier le virage de la transformation profonde dans le but de développer l'usine 4.0.

Afin de délivrer le maximum de valeur, le Groupe a mis en place des Digital Factories au fonctionnement agile, favorisant la collaboration et l'échange d'idées, et sollicitant de nouvelles compétences. De plus, le Groupe OCP travaille en étroite collaboration avec l'Université Mohammed VI Polytechnique, pôle d'innovation et de recherche majeur, pour infuser l'innovation dans l'industrie minière. La transformation digitale implique également les communautés locales et favorise l'émergence d'un écosystème digital à part entière.

e) La mine expérimentale de Benguerir :

La mine expérimentale de Benguerir est un living lab de l'UM6P ouvert à l'expérimentation et marque une avancée significative dans la démarche de l'industrie 4.0. Elle fait partie des sites d'expérimentation de l'Université Mohammed VI Polytechnique qui sont au centre des programmes de recherche. Le projet de la mine a vu le jour en août 2017 et une vingtaine de projets, dont la majeure partie porte sur la digitalisation industrielle, ont été développés : des projets de pilotage industriel, d'intelligence artificielle, d'automatisation ou encore de maintenance. Tous ces projets innovants concernent l'amélioration des processus d'extraction ou l'automatisation.

Ainsi, plusieurs projets mettent l'accent sur le contrôle en temps réel des installations pour améliorer les retours d'information et les prises de décision. D'autres projets, axés sur l'automatisation, permettront de réduire les risques liés aux travaux des opérateurs humains et d'assurer une plus grande sécurité ainsi qu'un rendement plus élevé.

6. Cadre du projet :

Le présent projet a pour objectif de digitaliser le processus de stockage de phosphate et de concevoir un système d'aide au pilotage autonome des machines stockeuses du site OCP Benguerir.

f) Consistance du travail :

L'objectif global du projet est la digitalisation des opérations et des positions des machines stockeuses. Le travail consistera à étudier, concevoir et programmer les équipements nécessaires pour la conduite automatique des machines en question, de manière continue et sans intervention des opérateurs. Pour arriver à ce stade, les éléments suivants seront nécessaires :

- **Modélisation du système de la machine stockeuse STACKER** : Utilisation du logiciel Automation Studio pour concevoir les circuits électrotechniques.
- **Programmation du PLC** : Développement du programme Ladder pour implémenter la conduite manuelle et autonome des machines stockeuses.
- **Interfaces homme-machine (IHM)** : Création et intégration des interfaces pour le contrôle et la supervision des machines.
- **Deux types de machines stockeuses** : Adaptation des solutions pour les machines qui effectuent le stockage par cône et celles qui stockent par couche.
- **Sécurité en cas d'urgence** : Mise en place de protocoles de sécurité pour gérer les situations d'urgence, incluant des arrêts d'urgence et des systèmes d'alerte pour prévenir les opérateurs et le personnel en cas de défaillance ou de problème critique.
- **Sécurité lors du démarrage du système** : Développement de procédures de démarrage sécurisé pour assurer que toutes les vérifications préalables sont effectuées avant que le système ne soit mis en fonctionnement, réduisant ainsi les risques de dysfonctionnements et garantissant la sécurité du personnel.

De surcroît, les opérations suivantes doivent être prises en compte :

- La délimitation automatique des stocks par type de qualité.
- La gestion de la vitesse et de la longueur du parcours.
- L'optimisation des temps de balayage des talus (les passes du produit).
- Le suivi en temps réel des stocks de produits bruts et de produits finis.

g) Traitement et exploitation des données :

Les données fournies - mesures et signaux de commande - par ces équipements seront par la suite gérées par des automates programmables intégrés dans les

stockeuses. Ces API seront reliés au réseau installé sur le site, de type Ethernet. Les données seront échangées via un protocole fermé choisi ultérieurement.

7. Conclusion :

Dans ce chapitre, le cahier des charges a été détaillé afin de répondre aux besoins du client. Dans le chapitre suivant, nous allons réaliser une analyse fonctionnelle du processus de gestion de stock afin de maîtriser le fonctionnement.

III. Chapitre 3 : Etude du système

8. Introduction :

En but de bien assimiler le fonctionnement du processus de stockage, nous allons entamer, dans ce chapitre, une analyse fonctionnelle du système pour caractériser les fonctions offertes par l'ensemble du système et recenser ses entrées et sorties. Ainsi, nous présenterons les solutions techniques, la configuration matérielle et l'instrumentation nécessaires pour la conduite autonome de la machine stockeuse.

9. Machine stockeuse :

La stockeuse (**figure 3.1**) est une machine destinée au stockage des phosphates dans des parcs de stockage. Dans l'installation d'épierreage, il existe deux stockeuses. Le stockage est effectué dans un seul sens de versement des phosphates.

La machine stockeuse joue un rôle primordial dans la production parce qu'elle permet le stockage et la répartition des phosphates provenant du bâtiment concassage selon les différentes qualités correspondant aux différentes couches. Cela permet de mélanger ces couches pour obtenir, au final, un produit qui satisfait les besoins des clients.



Figure 3.1 – Machine Stockeuse

L'empilement (ou stockage) est une opération menée par des machines appelées stockeuses (**figure 3.1**). Ces dernières peuvent se déplacer dans deux sens le long du rail (horizontalement) et elles peuvent articuler leurs bras en les levant et en les baissant (verticalement). En plus de l'empilement, les stockeuses ont trois mouvements de base :

- **Levage** : c'est un mouvement selon un axe vertical. La stockeuse utilise soit un mécanisme de treuil avec un fil métallique, soit des cylindres hydrauliques, généralement deux.
- **Déplacement horizontal** : sur une voie ferrée, la stockeuse se déplace selon le besoin. Des moteurs de traction alimentés en courant continu et reliés par des engrenages se situent dans les fins de course des rails.
- **Pivotement** : Il s'agit de la rotation de la stockeuse autour de son axe pour placer le stock au bon endroit. Le mouvement est assuré avec un pignon pivotant qui tourne autour d'une base pivotante. Le type d'engrenage utilisé est un engrenage solaire et planétaire.

10. Analyse fonctionnelle :

h) Diagramme bête à cornes :

L'objectif de cette analyse est de définir le fonctionnement global de la machine stockeuse auquel cette étude doit répondre. La machine doit permettre le stockage de la matière de façon optimale et autonome. Elle doit être en mesure d'interagir en temps réel avec les différents capteurs et radars afin de réaliser les piles de stock désirées.

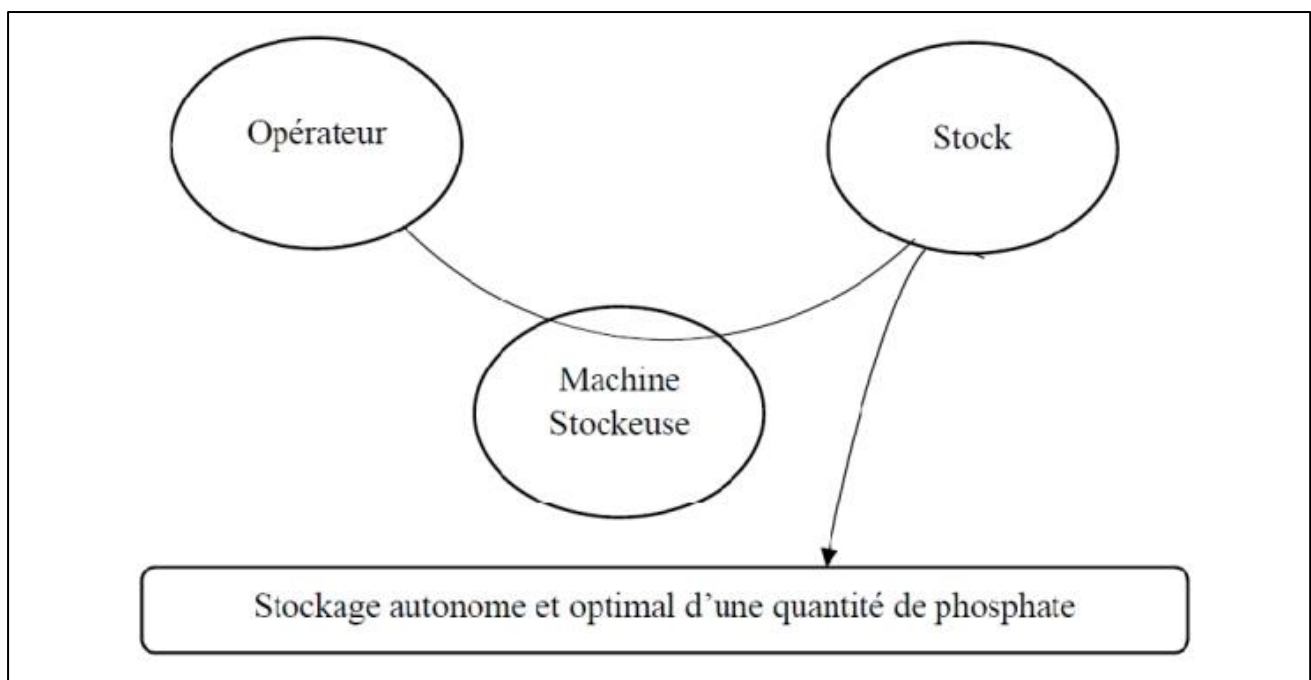


Figure 3.2 - Diagramme Bête à Cornes

11. Organes principaux des stockeuses :

i) Enrouleurs de câbles :

Ces enrouleurs sont destinés à l'alimentation des appareils mobiles et portatifs. Ils se caractérisent par leur résistance aux intempéries, aux rayons UV et aux chocs, ainsi que par leur rigidité mécanique (**figure 3.3**). L'enroulement et le déroulement du câble sont assurés par deux moteurs à accouplement magnétique. Lors de l'enroulement, le disque lié à l'enrouleur et l'aimant lié au moteur sont attachés

magnétiquement et tournés par le moteur. Ainsi : le couple moteur $>$ le couple résistant. Pendant le déroulement du câble, tandis que l'aimant tourne dans le même sens que le moteur, le disque tourne dans le sens opposé sous l'effet de son poids. Ainsi : le couple moteur $<$ le couple résistant.



Figure 3.7 – Exemple d'un Enrouleur de Câbles

j) Système de Translation :

Le mécanisme de translation est constitué de roues situées sur deux rails parallèles, entraînées par quatre moteurs triphasés asynchrones à cage. Le démarrage est contrôlé par un variateur de vitesse, tandis que le freinage est assuré par des électrofreins et un mécanisme hydraulique (pince rail). Le mouvement s'effectue dans les deux sens, avant et arrière, avec des vitesses variables.

k) Convoyeur à Flèche :

Le convoyeur à flèche est un mécanisme de transport du phosphate utilisé pour le chargement ou le déchargement progressif et la formation de sites de stockage en vrac. Il se compose de flèches guidées par un ensemble de galets et de chaînes. L'entraînement du tapis flèche est assuré par un moteur asynchrone à démarrage direct.

En plus du convoyeur à flèche, on trouve le tripper ou chariot de répartition, qui complète les convoyeurs en permettant le déchargement du phosphate sur toute sa longueur. Le tripper est un élément mobile qui traverse le convoyeur à travers des rails situés sur le châssis du convoyeur, permettant ainsi de décharger le produit à n'importe quel point du convoyeur.



Figure 3.4 – Convoyeur à Flèche Entouré par un Cercle d'une Machine Stockeuse

l) Système de Levage :

Le système de levage permet le mouvement vertical (montée et descente) de la flèche. Ce mouvement est assuré par un mécanisme de levage hydraulique, utilisant des vérins hydrauliques.

m) Système de Rotation :

La rotation de la stockeuse autour de son axe est principalement actionnée par un pignon pivotant qui tourne autour d'une base pivotante. Ce type d'engrenage est appelé engrenage solaire et planétaire. Le mécanisme de rotation est constitué d'une couronne d'orientation à denture extérieure, reliée à deux pignons. Ces pignons sont entraînés par des moteurs asynchrones et commandés par un variateur de vitesse.

n) Architecture de Commande des Stockeuses :

Comme mentionné précédemment, les stockeuses sont des machines semi-automatisées avec des paramètres prédéfinis à distance. Les équipements de terrain sont connectés via une liaison Ethernet TCP/IP.

L'automate programmable utilisé pour le contrôle est de type Allen-Bradley, avec les caractéristiques ci-dessous :

Quantité ST1	Matériel
1	Font d'alimentation CompactLogic 120/240 VAC A 24 VCC, 3A
1	Processeur CompactLogic Ethernet
1	Module Devicenet pour contrôleurs 1764 et 1769
1	Terminaison finale à Compactbus
2	Font d'alimentation 120/240 VAC A 24 VCC, 3 A à Flex IO
2	Adaptateur Flex IO pour Devicenet
11	Module de 16 ED 48 VDC pour Flex IO
2	Module de 16 SD 48 VDC pour Flex IO
1	Module de 8 EA 24 VDC pour Flex IO
1	Module de 8 EA 24 VDC pour Flex IO

Figure 3.5 – Équipement Utilisé pour l'API du Stacker ST1

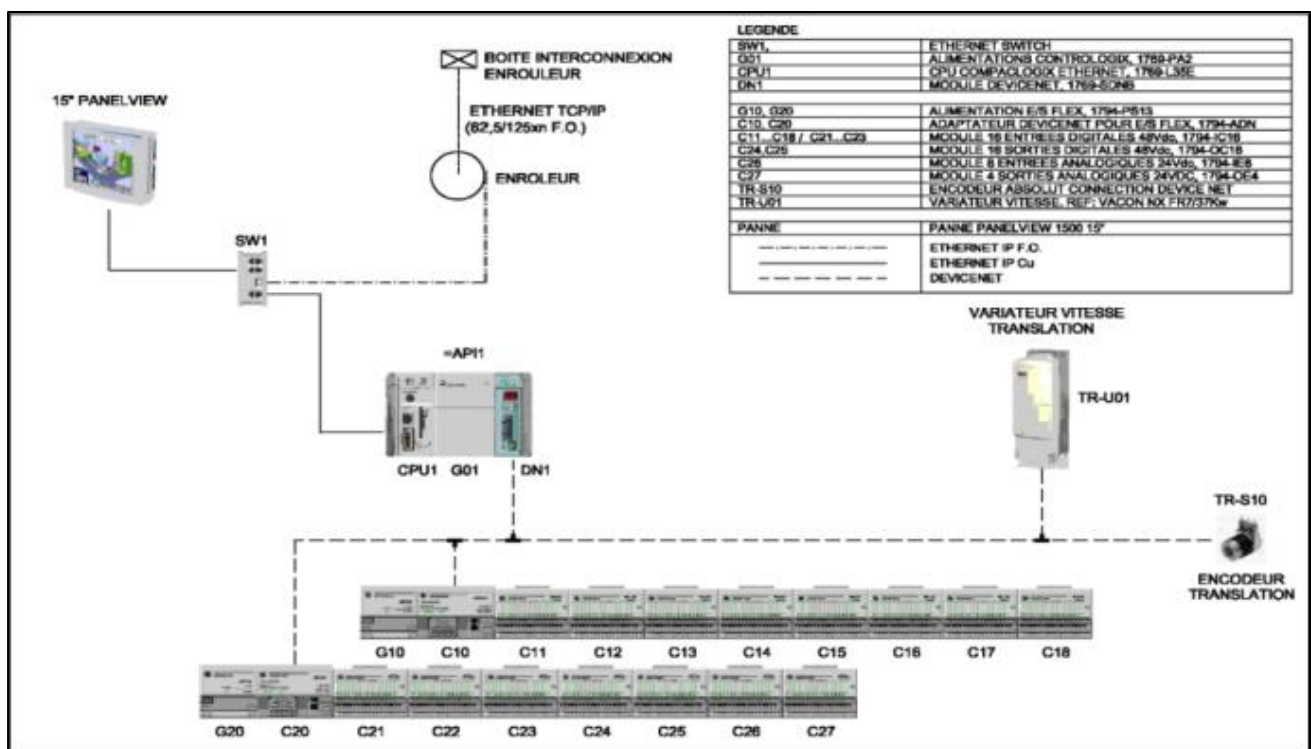


Figure 3.6 – Interconnexion du Système de Contrôle de la Stockeuse ST1

12. La pile de stock :

o) Disposition des stocks :

La disposition des stocks diffère selon plusieurs critères. Citons à titre d'exemple les opérations de stockage, les méthodes de stockage, et leurs géométries.

p) Stock longitudinal :

Un stock linéaire est un parc qui se compose d'au moins deux piles. La machine stockeuse se déplace généralement d'une extrémité de la pile jusqu'à l'autre, tandis que le grappeur ne travaille que sur une extrémité de la pile. L'inconvénient majeur des stocks linéaires est la grande variation des propriétés des matériaux aux extrémités des bords, appelée "effet de cône final".

Ce modèle de stockage est utilisé lorsque :

- La capacité de stockage est élevée (>1 000 000 tonnes)
- Possibilité d'expansion de stock dans le futur.

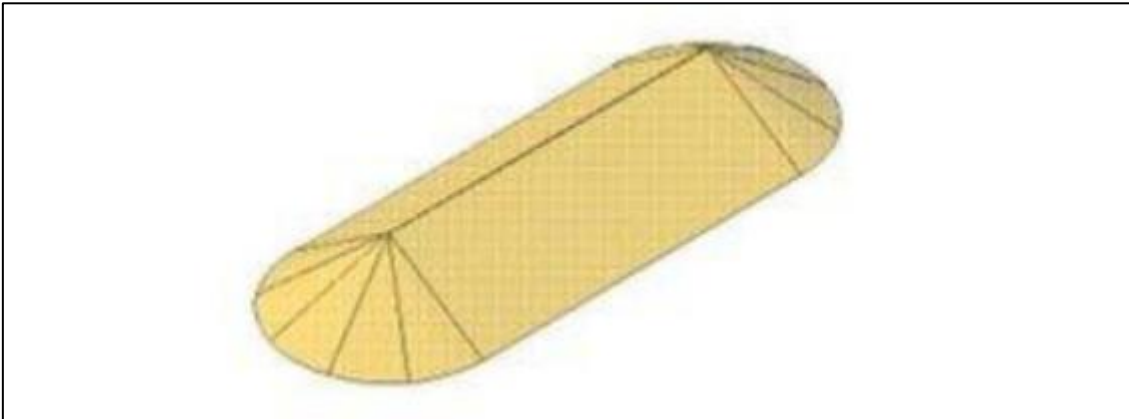


Figure 3.7 – Stock Longitudinal

q) Stock circulaire:

Dans le cas du stockage circulaire, les stockeuses et les roue-pelles tournent autour d'un axe dans une même direction. Ainsi, l'opération est continue, ce qui explique pourquoi les stocks circulaires présentent l'avantage de ne pas présenter l'effet cône final. Cette disposition est utilisée dans le monde entier depuis la fin des années 1970, notamment dans les industries du charbon, de l'acier et du ciment.

Ce modèle de stockage est utilisé lorsque :

- La capacité de stockage est limitée (qui peut atteindre 10 000 tonnes)
- Pas d'extension possible.

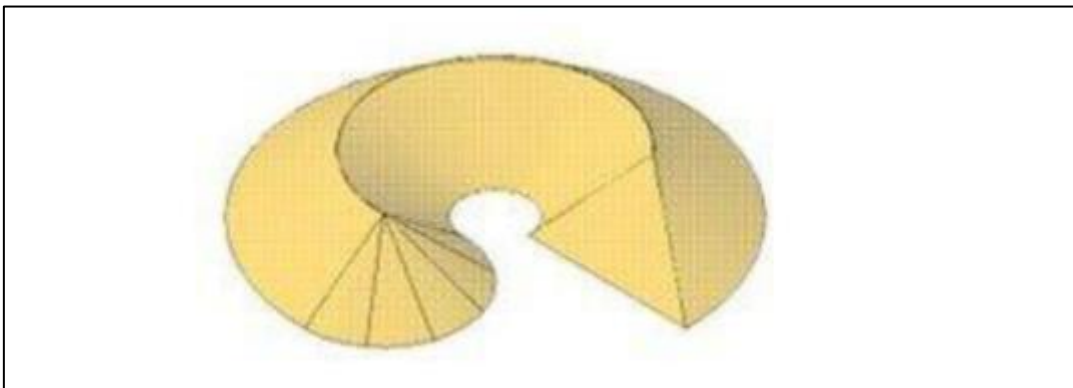


Figure 3.8 – Stock Circulaire

En conclusion, la disposition longitudinale permet une expansion plus facile du stockage, mais elle nécessite plus d'espace. La disposition circulaire empêche toute expansion de stockage ; par contre, elle offre un encombrement plus compact de la matière.

r) Méthodes de stockage :

Les méthodes de stockage dépendent principalement du taux de mélange de matière requis. Un meilleur taux de mélange est obtenu lorsque les méthodes de stockage sont plus complexes. Dans le cas où le stock est constitué d'un seul type de matière, la méthode du « cône shell » est suffisante pour le stockage. À cet égard, les mouvements de la machine seront restreints à la translation seulement (pas de rotation).

13. Conclusion

Le diagnostic et l'analyse fonctionnelle de la STOCKEUSE ont été réalisés pour identifier les mécanismes et les composants clés de son fonctionnement. Cette analyse a été suivie par l'étude des instruments et des technologies nécessaires pour l'automatisation du système, visant à améliorer le contrôle et l'efficacité des opérations de stockage.

IV. Chapitre 4 : Modélisation du système :

14. Introduction :

La modélisation du système est une phase importante dans la réalisation du projet. Elle comprend la modélisation du parc de stockage et des machines stockeuses. Ensuite, nous décrirons l'algorithme et la méthodologie suivie pour automatiser le processus.

15. Modélisation de la pile de stock :

Afin de suivre en continu l'état du stock, il est indispensable de maîtriser le volume disponible et la quantité débitée par la machine à tout instant. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer la forme du volume récupéré et la vitesse des mouvements pour pouvoir estimer la capacité du phosphate dans le stock.

s) Disposition d'un parc de stockage :

Le stockage du phosphate sur les sites d'OCP se fait sous forme d'une pile de stockage intermédiaire. Le stock est subdivisé en piles de stockage, chacune étant divisée en plusieurs zones à empiler, délimitées par des capteurs de fin de course. Il y a autant de zones à empiler que de types de qualité.

L'opération d'empilement s'effectue grâce aux machines stockeuses (stackers). Il s'agit d'un robot à trois axes RRP, où l'axe de translation permet de déplacer la machine sur les rails tout au long du stock afin de charger ou décharger le phosphate.

De l'autre côté du stock, on trouve les machines roue-pelles à godets, qui assurent la récupération du phosphate à partir des piles de stockage.

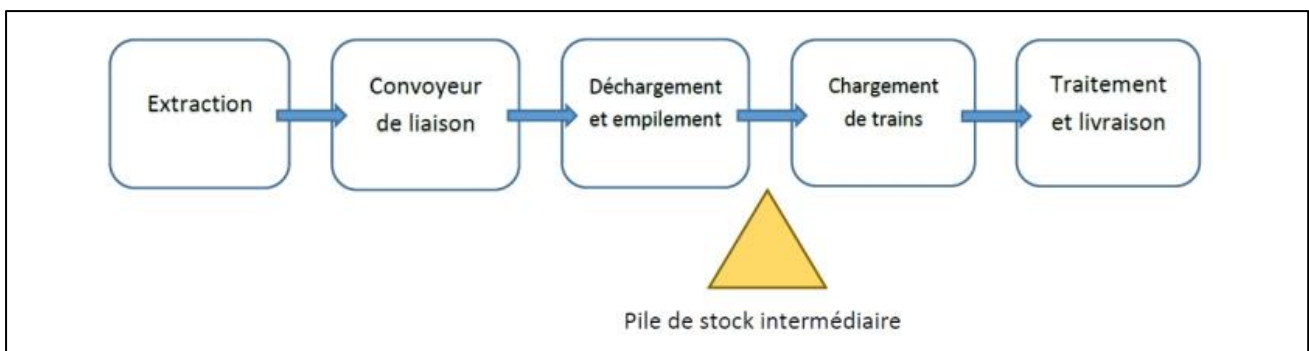


Figure 4.1 – Chaîne de Production dans un Parc de Phosphate Brut

t) La forme du stock :

Comme mentionné précédemment, l'OCP adopte la méthode du *cône shell* dans laquelle les piles de stock sont entreposées par les stockeuses et ont la forme d'un prisme triangulaire. Ce dernier a une section transversale triangulaire. Le stockage se

fait par qualité, chaque type devant être séparé des autres pour satisfaire au mieux les exigences du client.



Figure 4.2 – Mine de Benguerir - Pile de Stock Générée par la Méthode du Cône Shell



Figure 4.3 – Vue de Face (Gauche) et de Profil (Droite) d'une Pile de Stock Modélisée

16. Modélisation des machines stockeuses :

u) Introduction au robot STACKER :

Le robot STACKER est un robot à 3 degrés de liberté, à savoir : deux rotations, une rotation horizontale assurant le mouvement gauche/droite (Th1) et une rotation assurant le mouvement de levage haut/bas (Th2), et une translation le long du quai (d) (Figure 32 et Figure 33). Au niveau de l'OCP, l'exploitation de la machine stockeuse se fait différemment. En effet, les angles de rotation horizontale et de levage vertical (Th1 et Th2) sont fixés à des valeurs bien définies. Généralement, Th1 est nul pour que la machine soit face au stock, Th2 est fixé à un angle égal à 15° afin de pouvoir construire des dunes de phosphates de 12 m de hauteur, h1 égal à 5 m et h2 égal à 35 m. Voici par ailleurs le tableau des paramètres DH qui nous permettra de construire les matrices de passages.

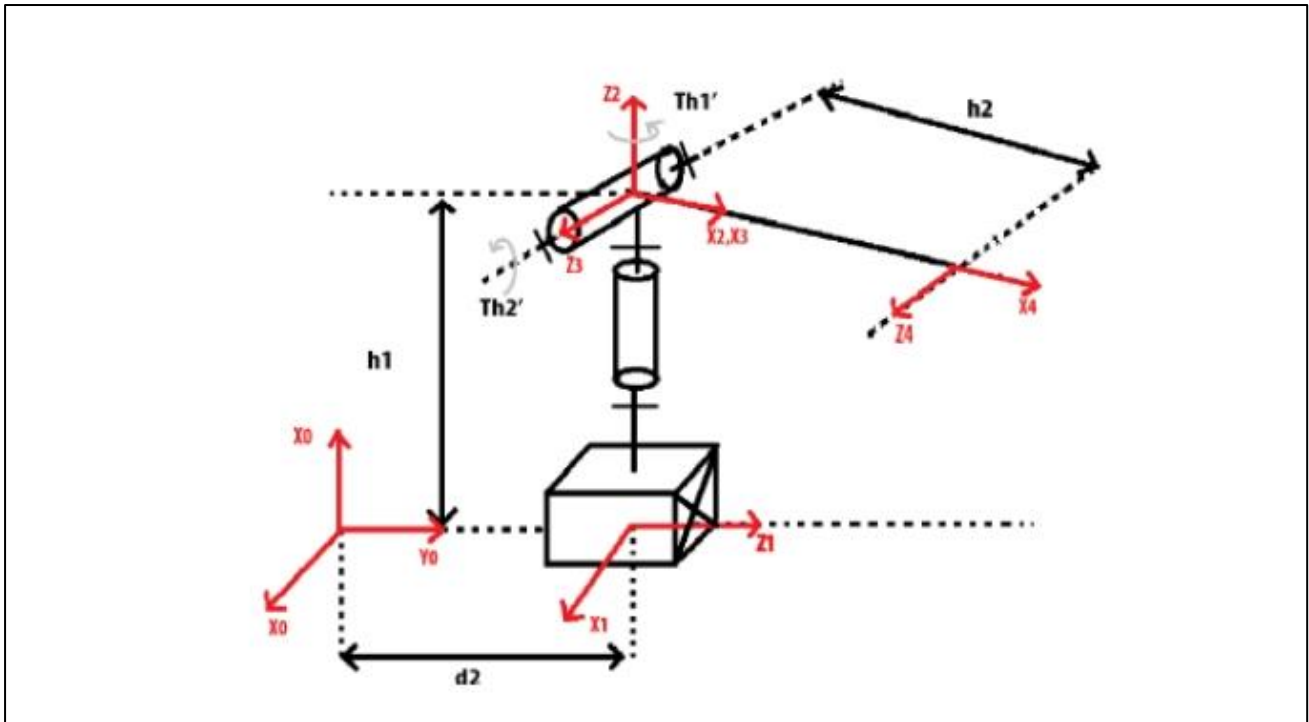


Figure 4.4 – Modélisation du Robot Stacker

v) Les paramètres du robot STACKER :

Sur la base de l'hypothèse que le robot étudié ici a les paramètres énumérés et les limites des articulations mentionnées au point (1), qui sont sujettes à des changements car différents paramètres du STACKER auront des valeurs différentes, la cinématique et la dynamique ont été calculées :

- $-160m \leq d1 \leq 160m$
- $-90^\circ < Th1 < 90^\circ$
- $-15^\circ < Th2 < 15^\circ$

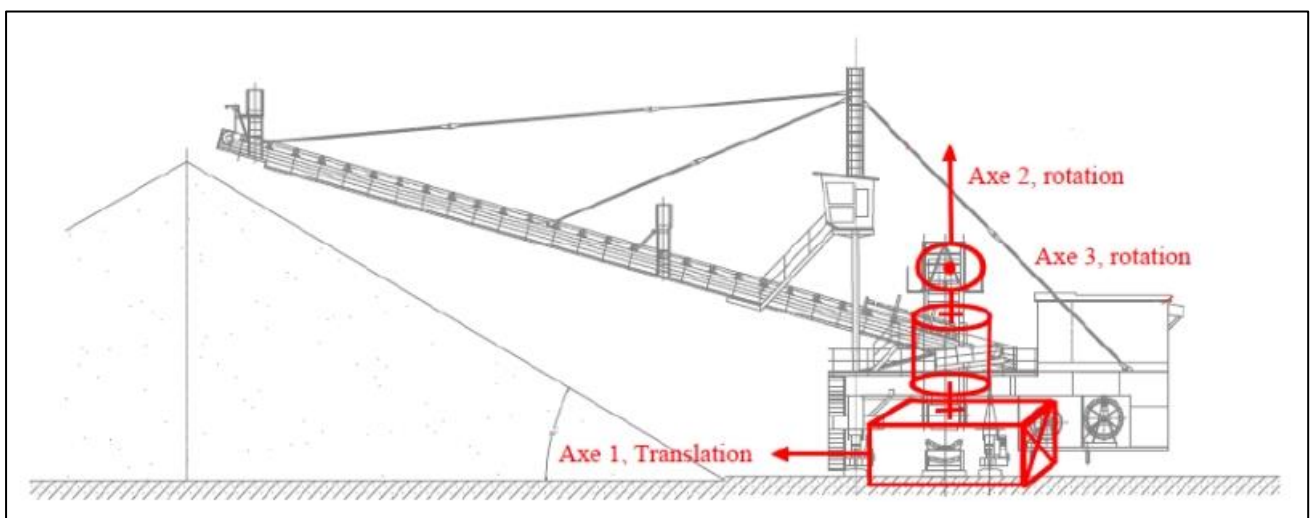


Figure 4.5 – Les Axes du Robot Stacker

17. Conclusion :

Ce chapitre a porté sur la modélisation du système, à travers une stratégie pour digitaliser le processus de stockage. Après avoir étudié et modélisé le système, l'étape suivante est la mise en œuvre de la solution proposée et le développement de l'application de gestion du stock.

V. Chapitre 5 : Environnement de Programmation

18. Introduction :

Afin de mettre en œuvre l'algorithme de gestion de stock, il faut choisir un environnement de programmation adéquat. Vu la complexité de l'algorithme et les calculs multiples qu'il comprend, l'utilisation d'un logiciel pour les calculs et la programmation s'avère judicieuse. Ainsi, le traitement des données sera indépendant du fonctionnement global de l'automate programmable industriel qui va commander les machines. Pour ce projet, **Automation Studio** et **Step 7 SIMATIC Manager** ont été utilisés. **Automation Studio** est connu pour ses capacités en simulation et en programmation de systèmes automatisés, tandis que **Step 7 SIMATIC Manager** est adapté à la configuration et à la gestion des automates Siemens. Ces outils offrent un environnement convenable pour le développement et l'intégration des solutions de contrôle.

19. Automation Studio :

Automation Studio est un logiciel développé par **Famic Technologies** pour la simulation et la programmation des systèmes automatisés. Il permet la conception, la simulation et le test de systèmes de contrôle et d'automatisation avant leur implémentation physique.



Figure 5.1 - Logo Automation Studio

w) Fonctionnalités Principales :

- **Simulation** : Crée des modèles virtuels pour tester des systèmes automatisés.
- **Programmation** : Programme des automates en utilisant des langages comme Ladder Diagram (LD) et Function Block Diagram (FBD).
- **Conception Électrique** : Réalise des schémas électriques détaillés.
- **Analyse et Débogage** : Surveille et corrige les erreurs dans les systèmes simulés.
- **Gestion des Systèmes Pneumatiques et Hydrauliques** : Simule des systèmes pneumatiques et hydrauliques.

x) Utilisations :

- **Créer des Projets** : Configurer les paramètres du projet.
- **Modéliser** : Concevoir des schémas et assembler les systèmes.
- **Programmer** : Développer des programmes pour les automates.
- **Simuler** : Tester et analyser les performances des systèmes.
- **Déboguer** : Identifier et corriger les erreurs.
- **Exporter** : Transférer les données et programmes vers les équipements réels.

20. Step7 SIMATIC Manager :

STEP 7 est un logiciel développé par Siemens, utilisé pour la programmation et la configuration des automates programmables Siemens (PLC). Il fait partie de la suite de logiciels **TIA Portal** (Totally Integrated Automation Portal) et est largement employé dans l'industrie pour l'automatisation des processus.



Figure 5.2 - Logo Step7

y) Fonctionnalités Principales :

- **Configuration du Matériel** : Permet la configuration des équipements matériels, tels que les automates, les entrées/sorties, et les modules de communication.
- **Programmation** : Offre divers langages de programmation pour les automates, notamment Ladder Diagram (LD), Function Block Diagram (FBD), Structured Text (ST), et Sequential Function Chart (SFC).
- **Diagnostic et Débogage** : Outils pour surveiller, diagnostiquer et corriger les erreurs dans les programmes.
- **Simulation** : Permet de tester les programmes et la configuration dans un environnement virtuel avant leur déploiement sur le matériel réel.
- **Mise en Service** : Facilite le déploiement et l'intégration des programmes sur les automates en fonctionnement.
- **Documentation** : Génération automatique de documentation pour les projets.

z) Utilisations :

- **Configuration Initiale** : Définir les paramètres matériels des automates et des périphériques.

- **Développement de Programmes** : Créer des programmes pour contrôler les processus industriels en utilisant les langages supportés.
- **Simulation et Test** : Tester les programmes dans un environnement virtuel pour valider leur fonctionnement.
- **Déploiement** : Transférer les programmes sur les automates pour la mise en service.
- **Maintenance et Débogage** : Identifier et résoudre les problèmes lors de la mise en service ou du fonctionnement du système.

21. Conclusion :

Ce chapitre décrit les outils de programmation que nous avons utilisés pour développer notre application. Nous avons expliqué les fonctionnalités offertes par ces outils et leur exploitation pour l'acquisition, le traitement et l'échange de données. Dans les chapitres suivants, l'étude se focalisera sur la modélisation du système et la génération des commandes du robot STACKER.

VI. Chapitre 6 : Simulation et résultats :

22. Programmation de l'automate programmable :

aa) Modicon M580 :

Le Modicon M580 est un automate programmable industriel de la gamme de haute performance conçu pour les applications d'automatisation complexes. Il est particulièrement adapté aux environnements industriels exigeants où la fiabilité, la flexibilité et la performance sont essentielles. Ce contrôleur offre une architecture évolutive et modulaire qui permet une intégration facile avec d'autres systèmes et équipements. Le Modicon M580 se distingue par ses capacités de communication avancées, incluant des options pour les réseaux Ethernet, les protocoles de communication ouverts et les intégrations tierces. Il est compatible avec le logiciel EcoStruxure Control Expert, qui simplifie la programmation et la mise en service tout en optimisant le temps de développement. Sa conception permet également une évolutivité importante, ce qui en fait une solution idéale pour les installations à long terme et les projets d'automatisation de grande envergure.



Figure 6.1 - Automate Modicon M580

bb) Modicon M340 :

Le Modicon M340 est conçu pour répondre aux besoins de l'industrie des processus ainsi qu'à un large éventail d'applications d'automatisation exigeantes. Il peut être utilisé individuellement ou en complément des automates Modicon Premium et Modicon Quantum, augmentant ainsi les performances, la qualité et la rentabilité des processus industriels, des installations ou des machines. Sa forme compacte offre à l'automate une flexibilité et des fonctions intégrées dans un format réduit. Au cœur du processus, il fournit des solutions Plug & Work avec des appareils Schneider Electric et de tiers. La grande capacité du logiciel SoCollaborative d'EcoStruxure Control Expert facilite et réduit le temps de programmation et de mise en service.



Figure 6.2 - Automate Modicon M340

cc) Structure du projet sur Automation Studio :

La capture d'écran ci-dessous illustre la structure des fichiers dans Automation Studio. Cette vue fournit un aperçu clair de l'organisation des différents composants et ressources dans un projet d'automatisation. On y voit la hiérarchie des éléments, y compris les modules matériels, les programmes, les configurations de communication, et les autres ressources essentielles au projet.

Cette organisation permet une gestion efficace du projet en regroupant toutes les informations pertinentes et en facilitant la navigation entre les différentes parties du système. La structure est conçue pour optimiser le développement, la simulation, et la mise en œuvre des projets d'automatisation, en offrant une vue d'ensemble cohérente et structurée.



Figure 6.3 - Structure du Projet

dd) Programme LADDER :

L'image ci-dessous présente un extrait du programme Ladder développé dans Automation Studio. Le langage Ladder, également connu sous le nom de langage de relais, est largement utilisé pour la programmation des automates programmables industriels (API). Il est basé sur une représentation graphique des circuits relais électriques, ce qui facilite la compréhension et le développement des logiques de contrôle.

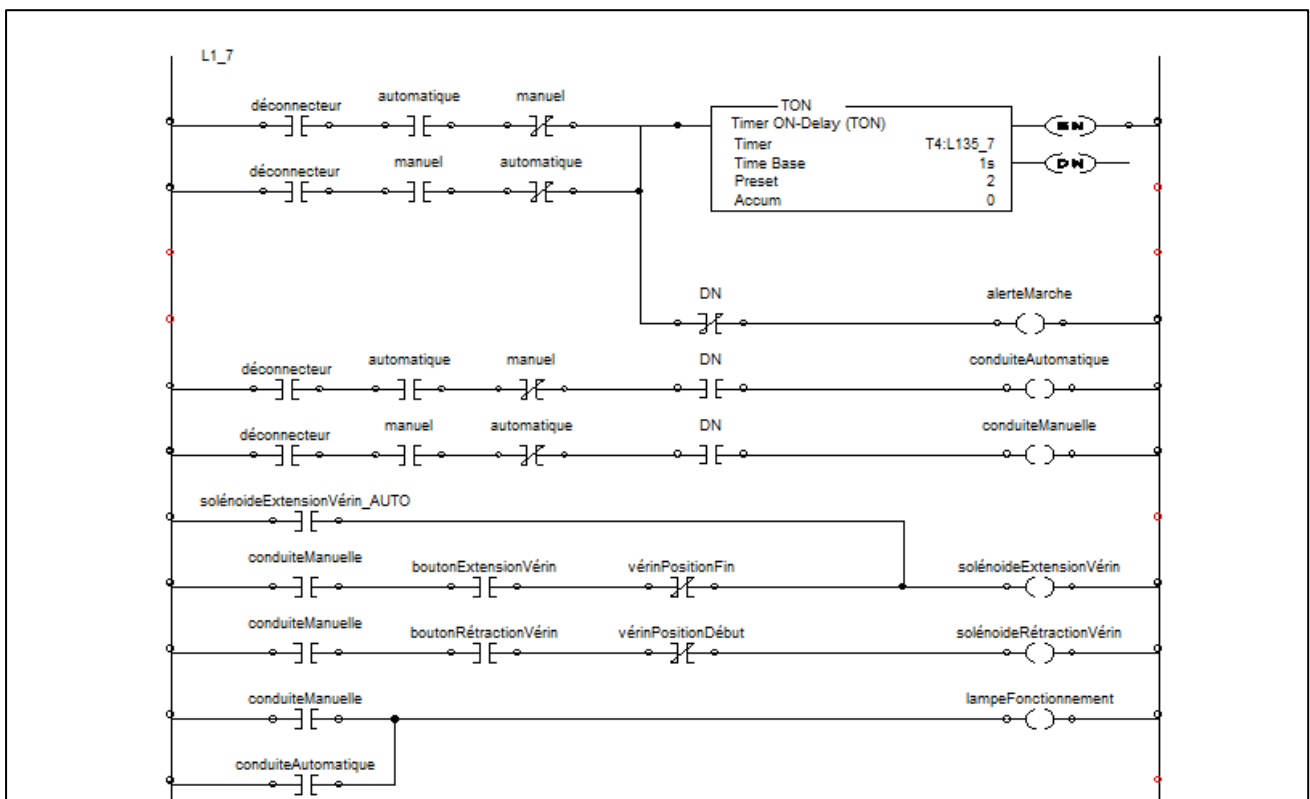


Figure 6.4 - Extrait du Programme LADDER

ee) Environnement de simulation :

L'image ci-dessous montre l'environnement de simulation utilisé dans Automation Studio pour tester et valider les programmes avant leur déploiement sur

le matériel réel. Cette vue d'ensemble présente la configuration du simulateur, où vous pouvez visualiser la simulation en temps réel des processus automatisés.

Dans cette simulation, vous pouvez observer la représentation graphique des différents éléments du système automatisé, y compris les capteurs, et les actionneurs, ... L'environnement de simulation permet de tester les algorithmes de contrôle et d'effectuer des ajustements nécessaires sans risque pour les équipements physiques. Il offre également des outils pour analyser le comportement du système, vérifier les interactions entre les composants, et s'assurer que le programme fonctionne comme prévu dans un cadre virtuel avant sa mise en œuvre sur le terrain.

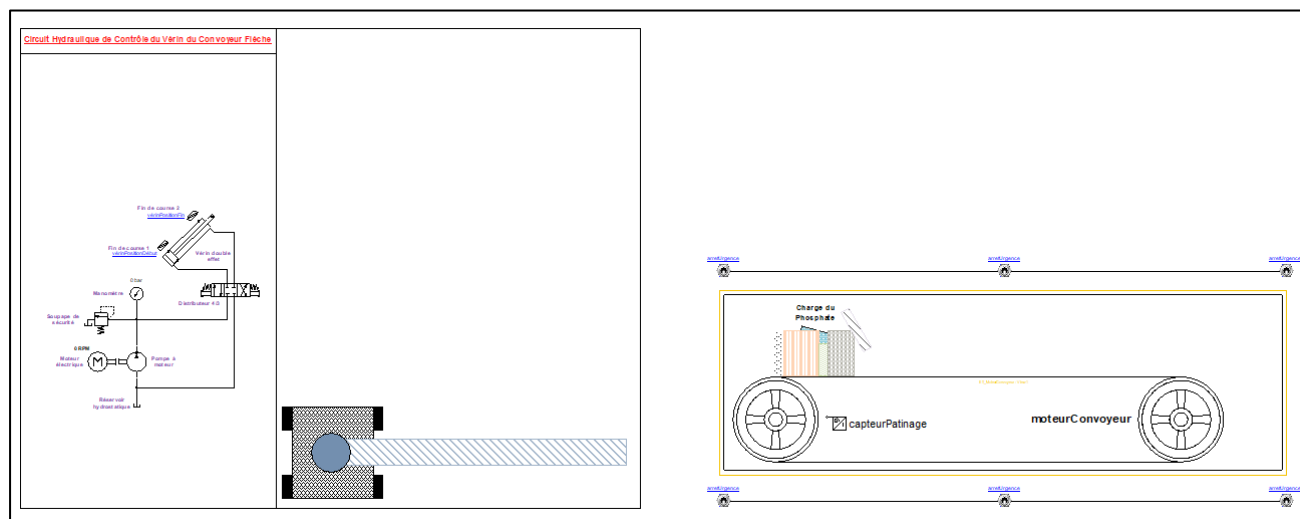


Figure 6.5 - Environnement de Simulation

ff) Interface Homme-Machine (IHM) :

L'image suivante illustre l'Interface Homme-Machine (IHM) utilisée pour interagir avec le système automatisé dans Automation Studio. Cette interface graphique permet aux opérateurs de surveiller et de contrôler les processus en temps réel.

Sur cette IHM, vous pouvez visualiser différents éléments essentiels tels que :

- **Tableaux de Bord** : Fournissent une vue d'ensemble des performances du système, incluant des indicateurs clés, des graphiques et des statistiques en temps réel.
- **Contrôles de Processus** : Permettent d'ajuster les paramètres de fonctionnement, de démarrer ou d'arrêter les processus, et de configurer les équipements selon les besoins opérationnels.
- **Alertes et Notifications** : Affichent les messages d'alerte et les notifications importantes concernant l'état des machines et les anomalies détectées.
- **Visualisation Graphique** : Montre les représentations graphiques des processus en cours, permettant une meilleure compréhension de l'état actuel et des opérations du système.

L'IHM joue un rôle crucial dans la gestion efficace des opérations en offrant une interface conviviale et intuitive pour les utilisateurs. Elle facilite l'accès aux informations critiques et aux commandes nécessaires pour assurer un fonctionnement optimal du système automatisé.

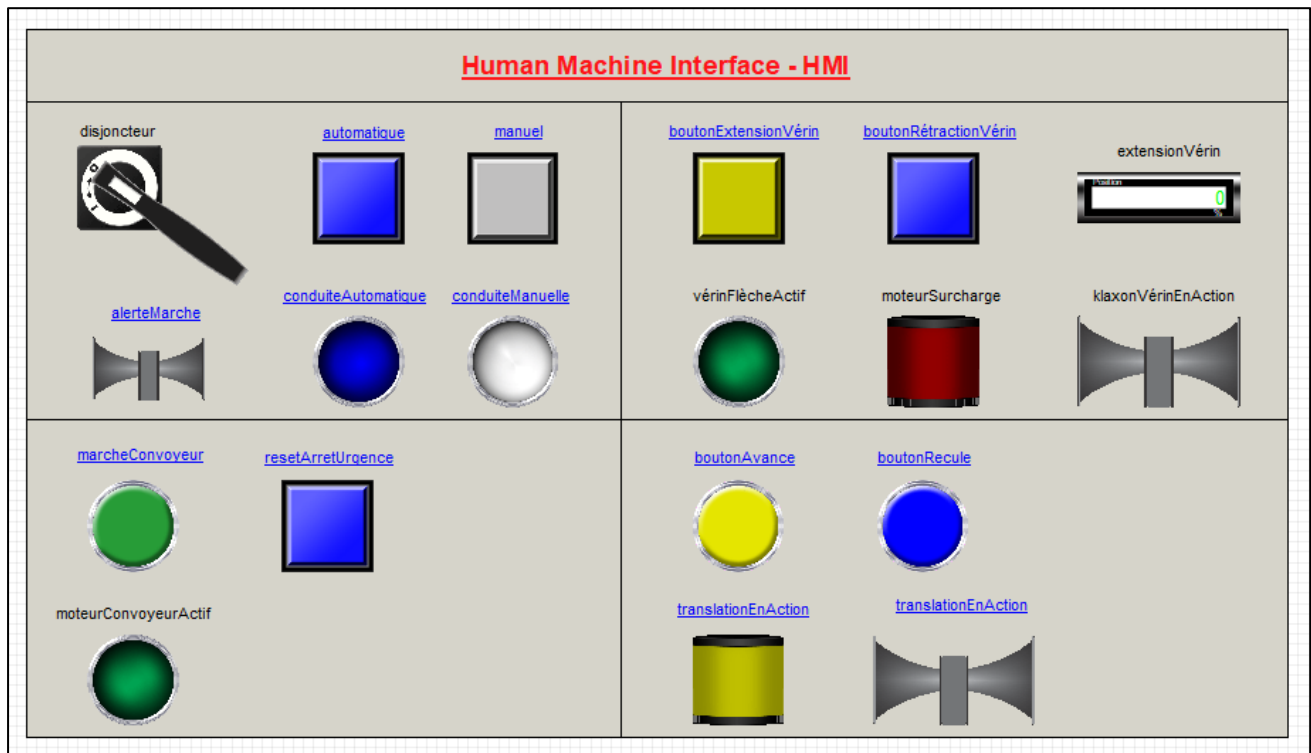


Figure 6.6 - Interface Homme Machine

23. Conclusion :

Ce chapitre a exploré les outils de programmation et les environnements utilisés pour développer notre application de gestion de stock, y compris Automation Studio et STEP 7 SIMATIC Manager. Nous avons détaillé la structure du projet, les programmes Ladder, et les environnements de simulation pour tester et visualiser le système. L'Interface Homme-Machine (IHM) a également été abordée, montrant son rôle crucial dans la supervision et le contrôle. En somme, ces outils assurent une gestion efficace du système automatisé, et le prochain chapitre se penchera sur les résultats et optimisations nécessaires.

VII. Conclusion générale :

Le présent travail, réalisé dans le cadre de mon stage d'observation, a consisté à analyser les opérations de stockage de phosphate à l'OCP et à comprendre le fonctionnement des systèmes de pilotage des machines stockeuses. Au début de mon stage, j'ai examiné les spécifications du cahier des charges et étudié le processus de gestion de stock, ainsi que ses limitations.

J'ai observé le choix du matériel et des instruments nécessaires à l'automatisation du système et assisté à la modélisation des machines stockeuses. J'ai notamment étudié le modèle PRR du robot stacker, les matrices de transformation, et les cinématiques directes et inverse.

J'ai également pris part à l'élaboration d'un algorithme pour le traitement des données acquises, ce qui permet d'identifier le stock, de repérer les zones non saturées, et de générer les commandes et les trajectoires du stacker.

Ce stage d'observation a été très enrichissant pour ma formation, me permettant de me familiariser avec les opérations industrielles et les systèmes de gestion, tout en mettant en pratique les connaissances acquises au cours de ma formation académique.

