



Université Sidi Mohamed Ben Abdellah
Faculté des Sciences et Techniques de Fès
Département de Chimie



Année Universitaire : 2021-2022

**Master Sciences et Techniques GMP
Génie des Matériaux et des Procédés**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES
Pour l'Obtention du Diplôme de Master Sciences et Techniques**

Sous le thème

**Optimisation du processus de mûrissage des
plaques des batteries de démarrage**

Présenté par :

BOUROUAIL Hanane

Encadré par :

Pr. ZEROUALE Abdelaziz

Soutenu le 18 Juillet devant le jury composé de :

- **Pr. IDRISSI KANDRI Nouredine**
- **Pr. El GHAZOUALI Ahmed**
- **Pr. ZEROUALE Abdelaziz**

Stage effectué à : Afrique Câbles - ELECTRA Batterie

Remerciements

Ce présent travail n'aurait jamais existé sans l'aide précieuse de certaines personnes, que j'aimerais bien remercier.

Tout d'abord, j'adresse me remerciement à Mme. EZZOHRA SAMOUH la directrice générale de la société AFRIQUE CABLES pour me donner l'opportunité d'effectuer ce stage à AFRIQUE CABLES.

Mes expressions de remerciement s'adressent à M. BABLAH ADAM le responsable de la section plaque et mon encadrant de la société. Pour son effort considérable ses conseils précieux ses orientations professionnelles et son suivi de toutes les étapes de projet du début jusqu'à son acheminement.

J'adresse aussi mes sincères remerciements à M. ZEROUALE Abdelaziz, mon encadrant académique. Pour son encadrement, pour le temps qui a consacré pour moi, pour ses orientations et ses conseils pertinents.

Mes profondes gratitudes s'adressent aussi à M. Yassine REDOUANY, Manager R&D et méthode qui n'a jamais hésité de fournir tout type d'aide tout au long de mon stage.

Je remercie également toute l'équipe de la société, pour le rôle majeur qu'ils ont joué durant cette période.

Et finalement je tiens à remercier toute personne à AFRIQUE CABLES, à la FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES ou ailleurs qui a contribué de près ou de loin à la réussite de ce travail.

Dédicaces

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut
Tous les mots ne seraient exprimer la
gratitude, l'amour, le respect, et la reconnaissance que j'ai :

Je dédie ce travail à :

A ceux qui m'ont indiqué la bonne voie en me rappelant que la volonté fait les grands
Hommes. A ceux qui ont attendu avec patience les fruits de leur bonne éducation :

« A mes très chers parents qui ont été là pour moi, et qui m'ont donné un magnifique modèle
de labeur et de persévérance J'espère que vous trouverez dans ce travail toute ma
connaissance et tout mon amour et respect profond ».

A mon petite sœur Abir,

Pour son grand amour et son soutien, qu'il trouve ici l'expression de ma haute gratitude

A ma grande famille :

« Vous avez toujours été présents pour les bons conseils. Veuillez trouver dans ce modeste
travail ma reconnaissance pour tous vos efforts ».

À mes très chers amis,

« Avec qui j'ai partagé de bons moments, qui m'ont offert l'occasion de sentir la valeur de la
véritable amitié ».

Merci de faire partie de ma vie !

Résumé

Ce travail consiste à l'**amélioration** du processus de mûrissage des plaques des batteries en gagnant du temps et de l'énergie en suivant la démarche **PDCA**.

En premier lieu, on a déterminé les **facteurs** des **plans d'expériences** et leur domaine d'étude par la réalisation d'un **brainstorming**, ensuite on a établi un diagramme d'**Ishikawa** pour classer les facteurs collectés.

En deuxième lieu, on a réalisé des **essais** afin de déterminer les facteurs qui influencent le plus la réponse, les résultats obtenus ont été analysés à l'aide d'un logiciel Nemrodw.

En troisième lieu, on a vérifié la validité des facteurs en mettant en place des essais de vérification, on élimine 10 h de cycle de séchage supplémentaires du processus de mûrissage des plaques des batteries. Au cours de la phase de séchage, on observe un retard de 6h, ce retard est dû à un défaut des résistances de la chambre de mûrissage.

En quatrième lieu, on a proposé le plan d'action présentant les actions correctives pour les équipements des chambres de mûrissage des plaques des batteries. On a pu gagner 6 heures de durée du programme original du processus de mûrissage des plaques et par conséquent on a optimisé le temps du cycle du processus en gagnant 16h en termes de consommation d'électricité.

Mots-clés : Amélioration, PDCA, facteurs, plans d'expériences, brainstorming, Ishikawa, essais.

Abstract

This work consists of improving the process of maturing battery plates by saving time and energy by following the PDCA approach.

First, we determined the factors of the design of experiments and their field of study by carrying out a brainstorming, then we established an Ishikawa diagram to classify the collected factors.

Secondly, tests were carried out to determine the factors that most influence the response, the results obtained were analyzed using Nemrodw software.

Third, the validity of the factors was verified by implementing verification tests, eliminating an additional 10 hour drying cycle from the battery plate curing process. During the drying phase, there is a delay of 6 hours, this delay is due to a fault in the resistances of the ripening chamber.

Fourthly, the action plan presenting the corrective actions for the equipment of the battery plate maturing chambers was proposed. We were able to save 6 hours of duration of the original program of the slab ripening process and consequently we optimized the cycle time of the process by saving 16 hours in terms of electricity consumption

Keywords: Improvement, PDCA, factors, design of experiments, brainstorming, Ishikawa, trials.

Liste des figures

Figure 1: Secteur d'activité du groupe Chaâbi "Ynna holding"	3
Figure 2: Organigramme d'AFRIQUECABLES	5
Figure 3: Batteries produites par l'entreprise	5
Figure 4: Câbles produits par l'entreprise	6
Figure 5: Différents éléments d'une batterie.....	8
Figure 6: Mouvement des ions sur les plaques de la batterie	8
Figure 7: Sections du processus de fabrication de la batterie	10
Figure 8: unité de recyclage entrée et sortie	10
Figure 9: Constituants d'une batterie usagée après broyage	11
Figure 10: Section plaques entrée et sortie.....	12
Figure 11: Section assemblage entrée et sortie	15
Figure 12: Section finition entrée et sortie	16
Figure 13: Chambres de murissage ou hydrosetting.....	18
Figure 14: Moniteur de supervision.....	21
Figure 15: Matière active de la plaque	21
Figure 16: Hygromètre	21
Figure 17: Forme d'un diagramme 5M.....	24
Figure 18: Système de boîte noire	25
Figure 19: Représentation graphique d'un facteur	25
Figure 20: Espace expérimental.....	26
Figure 21: Domaine expérimental d'intérêt	26
Figure 22: Courbes d'interaction	27
Figure 23 : Diagramme cause et effet	32
Figure 24 : Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai.....	33
Figure 25: Moniteur de supervision.....	40
Figure 26: Moniteur de supervision.....	40

Liste des tableaux

Tableau 1: Fiche représentative de la société.....	4
Tableau 2: Composants de la chambre de murissage et leurs caractéristiques.....	19
Tableau 3: Paramètres du programme de murissage	20
Tableau 4: Facteurs et leur domaine expérimental.....	32
Tableau 5: Matrice des expériences du plan factoriel complet	34
Tableau 6: Suivi des plaques des batteries	35
Tableau 7: Plan d'expérimentation et résultats expérimentaux	36
Tableau 8:Estimations des coefficients	37
Tableau 9: Solutions proposées pour les causes potentielles	41
Tableau 10: Consommation d'électricité liée à chaque composant de la chambre	43

Abréviations

T : Température.

HR : Humidité relative.

SAV : service après-vente.

Pb : plomb

PML : plomb métallique libre

VENT : ventilation

EXT : extraction

PDCA : Planifier – Réaliser – Vérifier - Réagir

QQOQCP : Quoi-Qui-Ou-Quand-Comment-Pourquoi

S : phase de séchage

C : phase de curing

API : Automate Programmable Industriel.

ΔT (°C) : l'écart entre la consigne et la mesure de la température par °C

T_m : Taux de murissage rapide

Table de matière

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DE L'ORGANISME D'ACCUEIL.....	2
Introduction.....	3
1. Présentation de l'organisme d'accueil.....	3
1.1 Groupe Ynnaholding.....	3
1.2 Historique de l'entreprise AFRIQUE CABLES.....	3
1.3 Fiche représentative de la société.....	4
1.4 Organigramme d'AFRIQUE CABLES.....	5
2. Produits fabriqués.....	5
2.1 Gamme des batteries.....	5
2.2 Gamme des câbles téléphoniques.....	6
3. Principe de fonctionnement d'une batterie de plomb.....	7
3.1 Composants d'une batterie à plomb.....	7
3.2 Fonctionnement de la batterie à plomb	8
4. Processus de fabrication de la batterie.....	9
4.1 Unité de recyclage.....	10
4.2 Section plaques.....	12
4.3 Section assemblage.....	15
4.4 Section charge finition.....	16
CHAPITRE II : Contexte du projet.....	17
1. Processus de murissage.....	18
a. Murissage.....	18
b. Chambres d'hydrosetting.....	18
c. Programme des chambres de murissage.....	19
2. Outils du projet.....	20
a. Moniteur de supervision.....	20
b. Contrôle de l'humidité.....	21
3. Définition du problème.....	22
4. Démarche de résolution du problème.....	22
5. Méthodes utilisées.....	23
5.1 QQQQCP.....	23
5.2 Ishikawa (5M).....	23
5.3 Méthode des Plans d'expériences.....	24

CHAPITRE III : Optimisation du processus de mirissage des plaques des batteries par les plans d'expériences.....	29
Introduction.....	30
1. Planifier (Plan).....	30
1.1 Définition du problème.....	30
1.2 Objectif du projet.....	31
1.3 Réponse.....	31
1.4 Détermination des facteurs.....	31
1.4.1 Collecte d'informations.....	31
1.4.2 Classification des informations.....	32
1.4.3 Détermination des facteurs et du domaine d'étude.....	33
1.5 Choix du plan d'expérience.....	34
1.6 Construction de la matrice d'expérience.....	34
2. Réaliser (Do).....	34
2.1 Réalisation des essais.....	34
2.2 Résultats des essais.....	36
2.3 Effets des facteurs et modèle mathématique associé.....	36
3. Vérifier (Check).....	39
3.1 Essais de vérification.....	39
3.2 Interprétation des résultats.....	39
3.3 Résolution du problème des résistances des chambres de mûrissage.....	40
4. Réagir (Act).....	41
4.1 Mise en place des actions correctives	41
4.2 Validation du temps de programme du processus de murissage.....	41
4.3 Rendement du projet.....	42
CONCLUSION GENERALE.....	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	46

INTRODUCTION GENERALE

La notion de productivité correspondant au rapport entre la production des biens et les moyens humains, matériels, financiers et organisationnels constitue l'un des enjeux fondamentaux pour tout acteur de l'industrie. La maximiser est l'objectif permanent que se fixe n'importe quel industriel, quels que soient la nature de son activité et le type de bien qu'il produise. Parmi les principaux leviers mis en œuvre dans ce but est l'amélioration continue qui occupe indéniablement un statut prépondérant dans la mesure, notamment, où elle vise une efficience, une praticabilité et une flexibilité optimales des processus.

L'optimisation des ressources dans l'industrie conduit à résoudre des problèmes combinatoires complexes de grande taille. L'objectif de notre travail est de proposer des solutions à un problème industriel réel, en effet l'addition d'un cycle supplémentaire au processus pour obtenir un produit conforme, coûte à l'entreprise plus de temps et plus d'énergie.

C'est dans cette perspective que s'inscrit l'idée du projet, « optimisation du processus de mûrissement des plaques des batteries de démarrage ». Ce problème industriel nécessite une étude globale par plusieurs acteurs vu que le problème a plusieurs aspects. La solution nécessite les efforts des différents services de l'entreprise, pour cela, le projet est piloté par le département industriel, dont se trouve le service qualité, le service maintenance et le service recherche et développement.

Ce rapport est subdivisé en trois chapitres :

- Le premier présente l'organisme d'accueil Afrique Câbles ainsi que son activité avec une description détaillée de son processus de fabrication.
- Nous délimitons ensuite, dans le second, le contexte du projet avec la présentation de la problématique et la démarche suivie pour atteindre l'objectif visé.
- Dans le troisième chapitre, on présente une étude qui a pour but d'analyser les causes du problème et de proposer des solutions correctives afin d'améliorer ce processus.

CHAPITRE I:

PRESENTATION GENERALE DE LA SOCIETE AFRIQUE CABLES

Introduction

Ce présent chapitre donne une description de l'entreprise AFRIQUE CABLES (ELECTRA BATTERIE) dans laquelle le projet de fin d'étude intitulé « Optimisation du processus de murissage des plaques des batteries de démarrage » a été effectué et du groupe CHAABI YNNA HOLDING dont l'entreprise fait partie. On va ensuite expliquer le principe de fonctionnement d'une batterie à plomb et donner une description détaillée du processus de fabrication des batteries.

1. Présentation de l'organisme d'accueil

1.1 Groupe Ynna holding

AFRIQUE CABLES (ELECTRA BATTERIE) est une filiale de la holding Ynna (groupe Chaâbi). Le groupe « YNNA Holding » compte aujourd'hui plus de 20000 collaborateurs.

La holding Ynna est présente dans de nombreux domaines d'activités tels que l'industrie, la grande distribution, le BTP, la promotion immobilière, l'hôtellerie, les énergies renouvelables, etc.



Figure 1: Secteur d'activité du groupe Chaâbi "Ynna holding"

1.2 Historique de l'entreprise AFRIQUE CABLES

AFRIQUE CABLES est une société anonyme créée en 1992 et localisée à CASABLANCA, elle comporte trois unités de production :

- La première est spécialisée dans la fabrication des batteries de démarrage reconnue sous la marque « ELECTRA ».
- La deuxième est une unité de recyclage de ces derniers.

- La troisième est une unité de production des câbles téléphoniques destinés au marché national et à l'export.

ELECTRA est la première marque de batteries 100% marocaine. Par ailleurs, ELECTRA mène régulièrement des opérations de relations publiques auprès de ses prescripteurs : revendeurs, concessionnaires pour les batteries de démarrage, ONG et collectivités locales pour la promotion de l'énergie renouvelable afin de consolider son positionnement local.

ELECTRA est certifiée ISO/TS 16949 V2002 qui est une norme spécifique au secteur automobile, elle vise le développement d'un système de management basé sur l'amélioration continue des performances.

1.3 Fiche représentative de la société

Le tableau suivant regroupe les informations majeures de la société :

Tableau 1: Fiche représentative de la société

Nom de la société	AFRIQUECABLES – ELECTRA BATTERIE
Nom du groupe	Ynna Holding du groupe CHAABI
Forme Juridique	111.387.000 DHS
Date de Création	1992
Secteur d'activité	Industrie d'automobile & Télécommunication
Missions	Fabrication des câbles pour les réseaux téléphoniques aériens et souterrains, les batteries de démarrage et d'énergie et le recyclage de ces dernières
Part de Marché	Batteries : environ 30% Câbles : environ 40%
Nombre de collaborateurs	230

1.4 Organigramme d'AFRIQUE CABLES

La société AFRIQUE CABLES est structurée selon l'organigramme hiérarchique suivant :

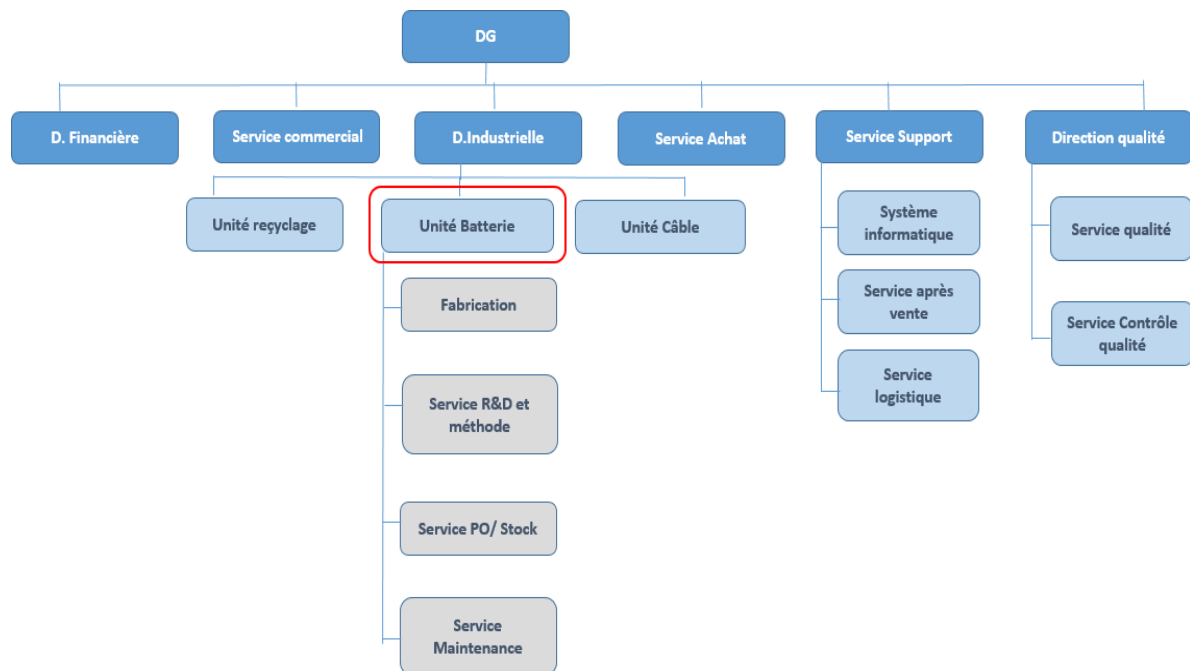


Figure 2: Organigramme d'AFRIQUECABLES

2. Produits fabriqués

AFRIQUE CABLES fabrique et commercialise plusieurs types de batterie et de câbles téléphoniques à savoir :

2.1 Gamme des batteries

ELECTRA dispose d'une large gamme de batteries de démarrage adaptées au marché national et international et distinguées eux-mêmes par leurs performances de stockage, leur endurance et leur excellent démarrage cycle.



Figure 3: Batteries produites par l'entreprise

- **Gamme Batterie avec entretien**



Elle est dotée d'un double couvercle avec labyrinthe thermo-soudé, afin d'empêcher le déversement de l'acide, d'un dispositif antidéflagrant qui offre une plus grande sécurité en laissant fuir les gaz de surcharge (pas d'explosion en cas de surpression) et empêche un retour des flammes extérieures.

- **Gamme Batterie sans entretien**



L'état de charge de la batterie peut être détecté directement, ainsi que l'état de fonctionnement du circuit de charge.

- **Gamme Batterie Poids Lourd**



Utilisée pour les véhicules à usage intensif.

2.2 Gamme des câbles téléphoniques

Cette unité est spécialisée dans la fabrication de différents câbles téléphoniques selon la demande des clients, à savoir les câbles réseaux, les câbles branchement, les câbles de l'équipement intérieur et les câbles de signalisation.



Figure 4: Câbles produits par l'entreprise

3. Principe de fonctionnement d'une batterie de plomb

3.1 Composants d'une batterie à plomb

La batterie à plomb est composée de plusieurs éléments d'accumulateurs montés en série par des connexions en plomb soudées, réunis dans un même boîtier afin d'obtenir la tension désirée.

La tension nominale de chaque accumulateur étant d'environ 2.1 V, ses accumulateurs sont logés dans un bac, le plus souvent en plastique (polypropylène) fermé par un couvercle scellé.

Chaque accumulateur est composé d'un ensemble de couples électrodes (plaques) positives et négatives en parallèles séparées par un séparateur en polyéthylène :

- **Les électrodes** : ce sont composées d'une série de grilles sur lesquelles est déposée une matière active poreuse (PbO_2 et Pb), les électrodes sont généralement planes d'où leur nom de plaques.
- **Electrodes positives** : ce sont des grilles, en alliage binaire ou ternaire de plomb (Pb-Sb, Pb-Sn, Pb-Ca, Pb-Sb-As...) dont les alvéoles sont remplis d'une pâte poreuse de peroxyde de plomb PbO_2 (matériau actif aux électrodes positives).
- **Electrodes négatives** : Les électrodes négatives comparables aux grilles positives, sont remplies de plomb métallique très poreux (matériau actif aux électrodes négatives), on parle d'éponge de plomb métallique [2].
- **Les séparateurs** : ce sont des poches souvent constituées par un feutre de fibres cellulosiques protégées par une résine ou encore par du chlorure de polyvinyle fritté ou des feutres en fibre de verre séparant les plaques pour éviter le contact entre les électrodes positives et négatives et donc éviter les courts circuits.
- **Electrolyte** : L'électrolyte est une solution diluée conductrice d'acide sulfurique H_2SO_4 sous forme liquide dans lequel baignent les plaques [2].

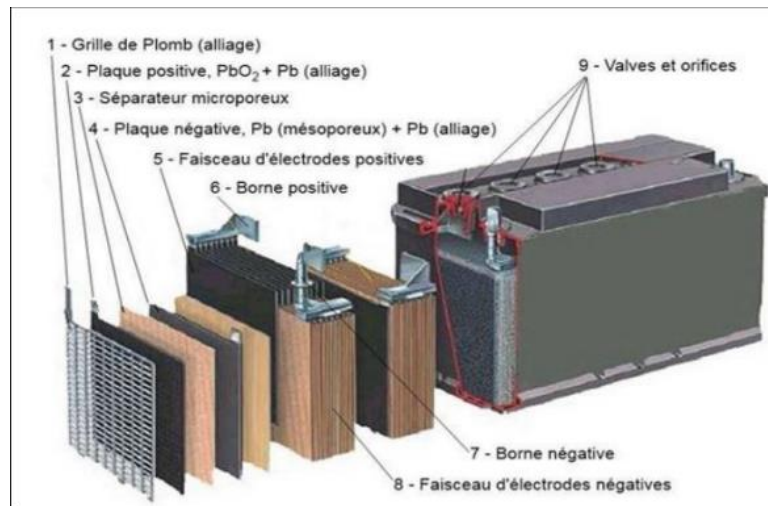


Figure 5: Différents éléments d'une batterie [1]

3.2 Fonctionnement de la batterie à plomb

Lorsqu'on applique une source de tension continue aux bornes des plaques (électrodes), un courant s'établit créant une modification chimique des plaques et de l'électrolyte, cette modification produit une différence de potentiel entre les deux plaques. Il est à noter que la circulation des électrons à l'intérieur de l'électrolyte est assurée par les ions.

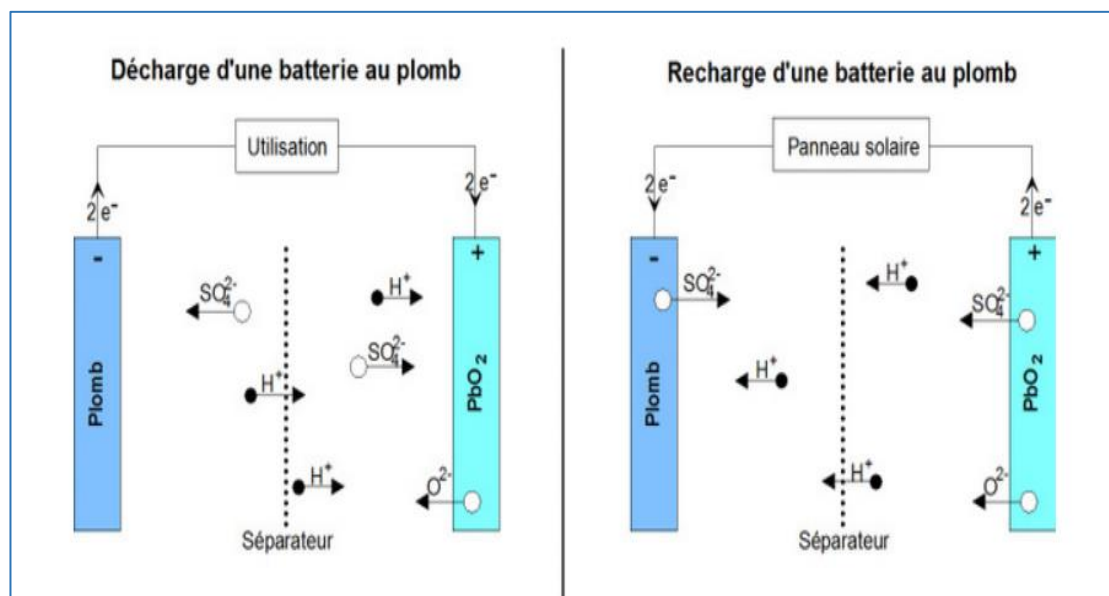


Figure 6: Mouvement des ions sur les plaques de la batterie [3]

- A la décharge, les deux polarités se sulfatent, l'électrolyte est consommé (les ions SO_4^{2-} vont sur les électrodes). L'oxygène libéré par l'électrode positive s'unit aux ions H^+ en solution pour former de l'eau [3].

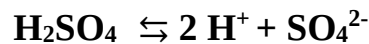
Électrode positive (+) ou cathode : le dioxyde de plomb PbO_2 (dépôt brun) se transforme en sulfate de plomb PbSO_4 en libérant de l'oxygène O_2 et en consommant des électrons.

- A la recharge, les deux polarités se désulfatent, l'électrolyte est régénéré (mise en solution d'ions SO_4^{2-}). La plaque positive est peroxydée (formation de PbO_2) et des ions sont libérés (augmentation de la concentration H^+ de l'électrolyte).

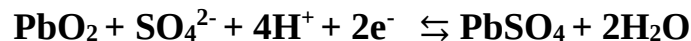
Électrode négative (–) ou anode : le plomb fixe la partie sulfurée de l'acide pour donner du sulfate de plomb PbSO_4 et libérer des électrons.[2]

Les deux cas sont regroupés dans les équations chimiques suivantes :

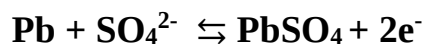
- Dans l'électrolyte:



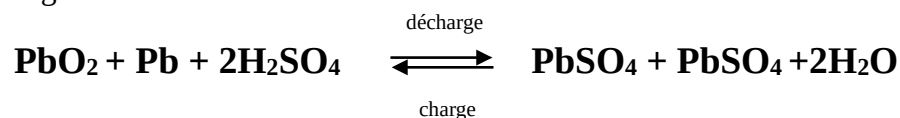
- A l'électrode positive:



- A l'électrode négative:



- Reaction globale:



4. Processus de fabrication de la batterie

Dans cette étape on va s'intéresser au processus de fabrication des batteries dans l'entreprise. Les processus de fabrication se divisent en 4 grandes parties nommées unités ou sections, le schéma suivants regroupe ces étapes majeures ainsi que les entrées et sorties de chaque étape :

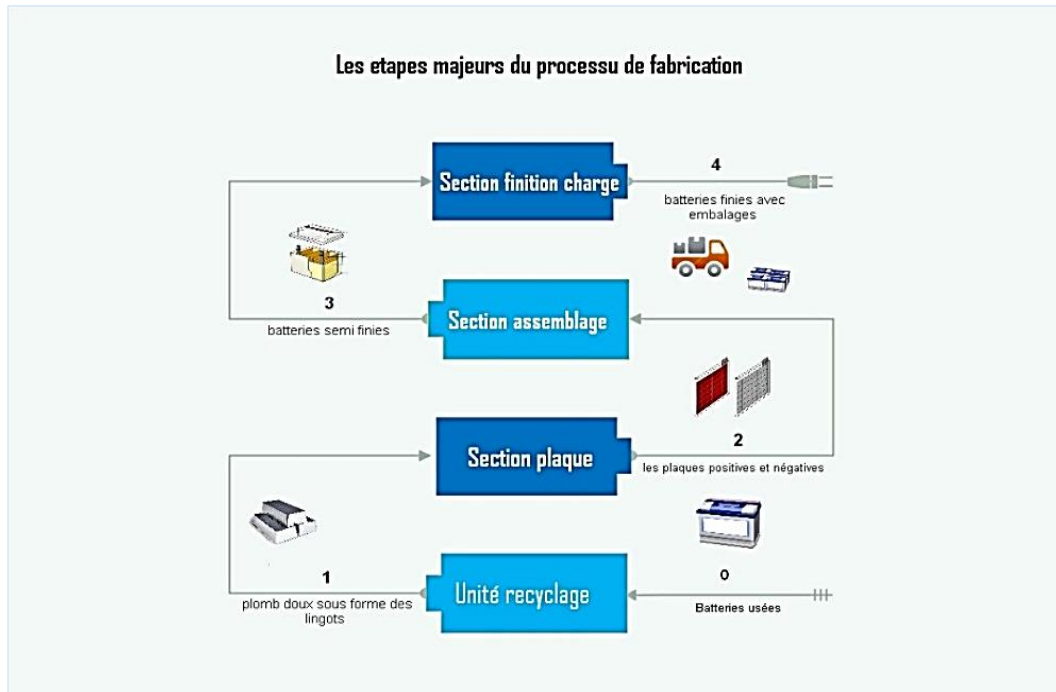


Figure 7: Sections du processus de fabrication de la batterie

4.1 Unité de recyclage

Le recyclage des batteries usées est la première étape du processus de fabrication des batteries. Cette phase permet de sortir le plomb doux qui est la matière première de l'activité à partir du recyclage des batteries usagées soit achetées par des fournisseurs de spécialité ou les batteries arrivées par le S.A.V. ou même le rebus de fabrication accumulée durant tout le processus de fabrication (plaques non conformes, grilles, pâte ...).



Figure 8: unité de recyclage entrée et sortie

Cette unité contient 2 sous processus : le broyage et la fonderie.

➤ Broyage

Les batteries usagées placées dans un convoyeur passent par un perforateur permet de vider la batterie de l'acide dont elle contient, par la suite les batteries perforées seront transportées par un tapis élévateur au broyeur. La batterie écrasée passe par un séparateur hydrodynamique permettant la séparation des différents matériaux qui constituent la batterie en se basant sur leur densité [3].

Ce broyage engendre 5 types de sorties :

- Fines métalliques et grosses métalliques : continuent leurs parcours vers la fonderie, les 2 métaux constituent la matière première utilisé dans le processus suivant.

Les fines sont des particules inférieures à 5 mm contenant des oxydes à traiter en four rotatif.

Les grosses sont des grilles bornes et gros morceaux de plomb sans oxyde à fondre en cuve.

- Plastique (polyéthylène, polypropylène) : le plastique vient du bac et le couvercle va être revendu pour se recycler par les spécialistes.
- Séparateurs : déchets.
- L'électrolyte : pour des normes de sécurité l'électrolyte se neutralise (mixer la soude légère avec l'acide afin d'avoir une solution neutre $\text{pH}=7$) avant d'être évacuer par le regard.

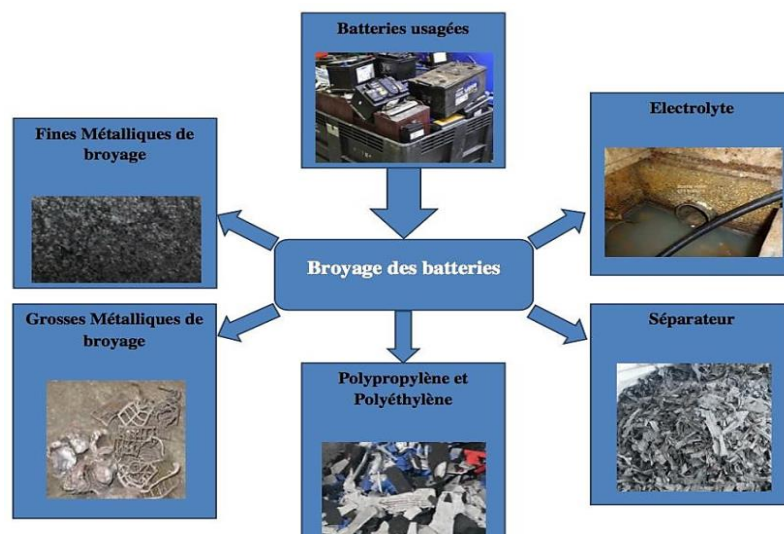


Figure 9: Constituants d'une batterie usagée après broyage

➤ Fonderie

Les fines et grosses particules métalliques plus l'oxyde de plomb venant de la partie broyage et le rebus venant de la section plaque (les plaques non conformes, les morceaux de plomb venant de la section plaque) et tous les déchets au long du processus constituent les entrées de cette procédure se devise à 2 parties :

Phase fusion réduction : elle a pour but de sortir le « plomb d'œuvre » à partir des entrées déjà mentionnées. A la base d'un four rotatif les entrées se brûlent et en les réduisant chimiquement par l'ajout de quelques aditifs (charbon granulé, débris de fer, soude dense).

Ensuite le plomb liquide sorti du four rotatif est placé dans des moules sous forme de cuve, cette opération permet de séparer la crasse du plomb d'œuvre.

Phase affinage : le plomb d'œuvre se transporte vers les fours d'affinage, à une température donnée pour éliminer les impuretés et on ajoute ensuite des additifs afin d'obtenir les caractéristiques désirées.

Le Plomb doux obtenu à la sortie du four d'affinage va être pompé vers la chaîne de lingotage pour être conditionné sous forme de lingots.

4.2 Section plaques

C'est la partie la plus importante dans le processus de fabrication des batteries, qui diffère d'une entreprise à une autre. La batterie prend ses caractéristiques de performance principalement de la procédure de fabrication des plaques dans cette section.

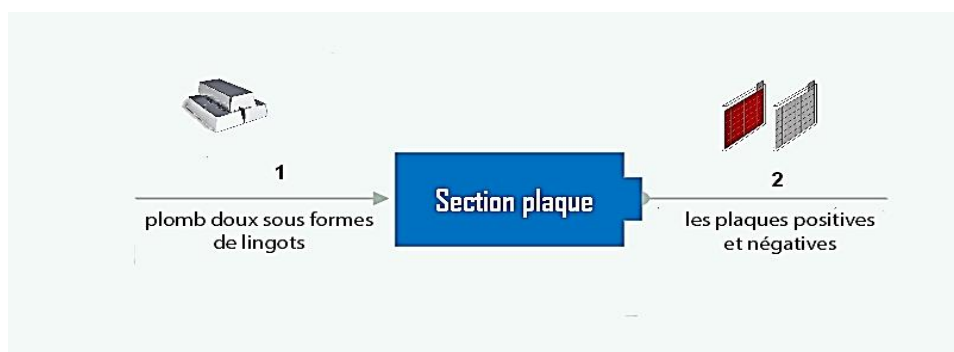


Figure 10:Section plaques entrée et sortie

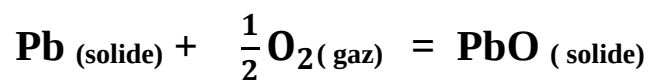
La section plaque constitué principalement de 5 processus afin d'avoir des plaques positives et négatives prêtes à utiliser dans la section d'assemblage :

- Préparation de l'oxyde de plomb et de la pâte

a - Oxyde de plomb PbO

Le plomb doux (99.99%) venant de la fonderie est fusionné dans un pot chauffé à environ 455°C. Le plomb fondu s'écoule sur des petits moules cylindriques permettant la fabrication des billes cylindriques qui seront stockées temporairement dans un silo.

Les billes alimentent par la suite le moulin en rotation dont la vitesse est bien déterminée. Au cours de cette rotation, les billes se frottent entre elles pour produire une poudre de plomb. Un passage d'air provoque l'oxydation partielle de la poudre suivant la réaction chimique suivante :



Après cette étape, l'oxyde de plomb sera transféré via un canal d'élévateur dans des silos pour un stockage d'une journée pour le refroidissement.

b- Matière active (Malaxage de pâte)

Pour préparer la matière active de la plaque, plusieurs matières premières sont utilisées avec l'oxyde de plomb :

- **Fibre synthétique** : additif fabriqué par la fibre de verre, utilisé dans les pâtes positives et négatives, il assure le maintien mécanique de la pâte (armature).
- **Expander** : C'est une matière ajoutée pour la préparation des plaques négatives. Son principal rôle est de garder le plomb sous forme spongieux et favorisant ainsi la formation d'une grande surface apparente active impliquant un fort pouvoir de démarrage de la batterie même à froid.
- **Acide sulfurique** : additif utilisé dans les pâtes positives et négatives. Son rôle est de sulfater l'oxyde de plomb sous forme de tri basique. Sa densité est de 1,40.
- **Eau déminéralisée** : c'est une eau pure.

- **Laminage**

Dans la ligne du laminage, on utilise la matière première est les lingots de plomb doux pour obtenir une bande.

Cette ligne permet alors de produire des bobines de bandes positives ou négatives laminées à base d'un alliage de Calcium, d'aluminium-étain et du plomb doux. Le calcium permet à cet alliage d'avoir une grande flexibilité.

- **Déployage**

La ligne de déployage a pour but de réaliser, à partir de la bande de calcium laminée, des grilles qui constituent le support de la matière active. La transformation que subit la bande de calcium passe par plusieurs étapes principales :

Dans un premier temps, la bande de calcium laminée est enroulée sur un dérouleur vertical. Ensuite, elle passe dans la machine à déployer pour réaliser les grilles grâce à ses dents triangulaires. A la fin de la ligne de déployage, une confirmatrice perfore le milieu de la bande avant qu'elle soit enroulée sur un touret.

Les roulettes de bande reçues par le poste de laminage se transforme à des grilles enroulées sur des tourets métalliques dirigées par la suite à l'étape d'empâtage.

- **Empâtage**

Il s'agit d'enrober la grille avec de la matière active. Cette étape s'effectue à l'aide de la machine d'empâtage qui sert à transformer uniquement les bandes de grilles en plaques. La pâte produite au niveau du malaxeur est déversée dans une trémie, puis poussé sous pression à travers les différents orifices de la grille. En même temps, le papier d'empâtage se colle sur les plaques des deux surfaces. L'excès de pâte étant évacué à l'aide de racle, brosses ou autres dispositifs.

La bande de grille étant empâtée, elle est ensuite découpée en plaques rectangulaires de dimensions bien définies. Ces plaques passent par des rouleaux pour les aplatir avant qu'elles soient exposées à l'air chauffé dans un four de pré-séchage et regroupées en des rangs de 50 plaques stockées par la suite sur les palettes.

- **Mûrissage**

Les palettes contenant les plaques sont transportées aux chambres d'hydrosetting, dont la température et l'humidité sont connues. Le processus de mûrissage passe par trois cycles : deux

cycles de murissage pour la cristallisation et l'oxydation de la pâte et un cycle de séchage pour diminuer l'humidité relative dans les plaques (inférieure à 1%).

Cette opération, qui peut durer quelques jours, a plusieurs buts :

- Assurer la cohésion de la pâte, en favorisant le développement de la cristallisation du sulfate de plomb.
- Assurer l'accrochage de la pâte sur la grille support (réaction grille pâte).
- Faire passer le maximum de plomb métallique libre (PML) à l'état oxyde.

4.3 Section assemblage

A la sortie des chambres de mûrissage, les plaques positives et négatives se dirigent par la suite à la section d'assemblage. La première étape concerne la mise des plaques positives dans des pochettes (séparateurs), ces dernières garantissent une isolation électrique entre les plaques positives et négatives, et sont réalisées par la machine Tekmax (ou enveloppeuse).

En deuxième étape, on a la constitution des groupes de plaques par empilage alterné, les éléments d'une même polarité sont reliés entre eux par des connexions à l'aide d'une machine de soudage (COS) et placés par la suite dans des cellules des bacs.

Chaque groupe contient un nombre bien défini en plaques simples négatives et positives enveloppées selon la gamme de batterie produite.

En troisième étape, la batterie est fermée par un couvercle perforé qui contient deux grands trous aux extrémités (pole + et pole -) destinés à la charge électriquement au niveau des tables de charge et d'autres petits trous destinés au remplissage en électrolyte au niveau de la section charge / finition des batteries.

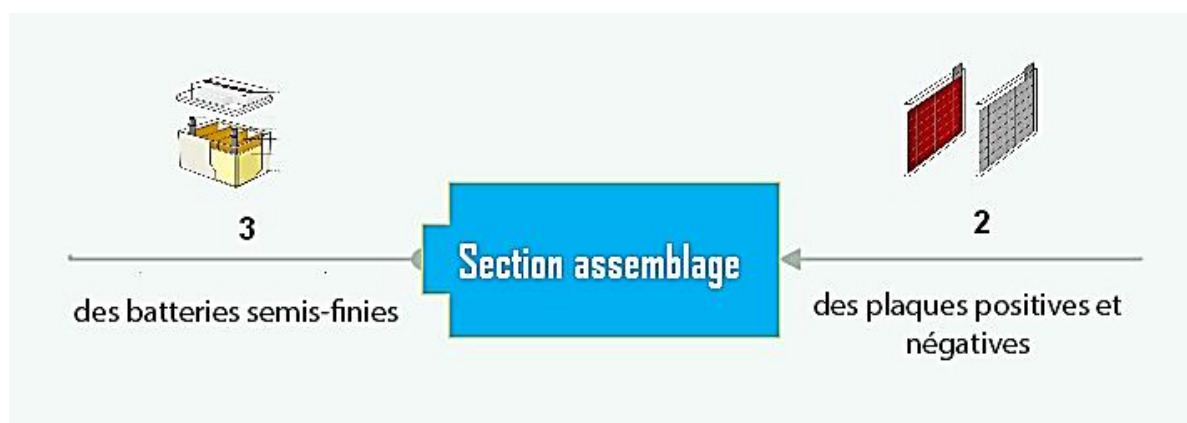


Figure 11: Section assemblage entrée et sortie

4.4 Section charge finition

Cette section se compose de deux lignes principales :

- La ligne qui assure le remplissage en acide sulfurique et le chargement électrique des batteries.
- La ligne de finition qui permet le lavage, l'étiquetage et l'emballage des batteries chargées.

Les batteries semi-finies doivent passer par l'opération de remplissage et de charge électrique avant leur expédition. Cette opération se fait dans la ligne charge à l'aide d'une machine, contenant un réservoir, dont son principal paramètre de réglage est le temps de remplissage qui diffère d'une batterie à l'autre selon la gamme traitée.

Une fois le remplissage est terminé, les batteries remplies passent par rangée aux tables de charge, où elles sont alimentées en série par le courant continu venant des chargeurs. Une fois la table est saturée par les batteries, le responsable de la section lance le cycle de charge des batteries qui dure plus ou moins 14 heures.

Ensuite les batteries chargées passent à l'aide d'un convoyeur à une machine de mise à niveau, qui a pour but de mettre à niveau l'électrolyte. Ensuite les batteries sont lavées de l'extérieur et se dirigent vers un testeur de ligne. Ce dernier permet de régler le courant de démarrage de chaque batterie. Les lots de batteries conditionnées vont être dirigés vers le magasin de stockage des batteries finies.

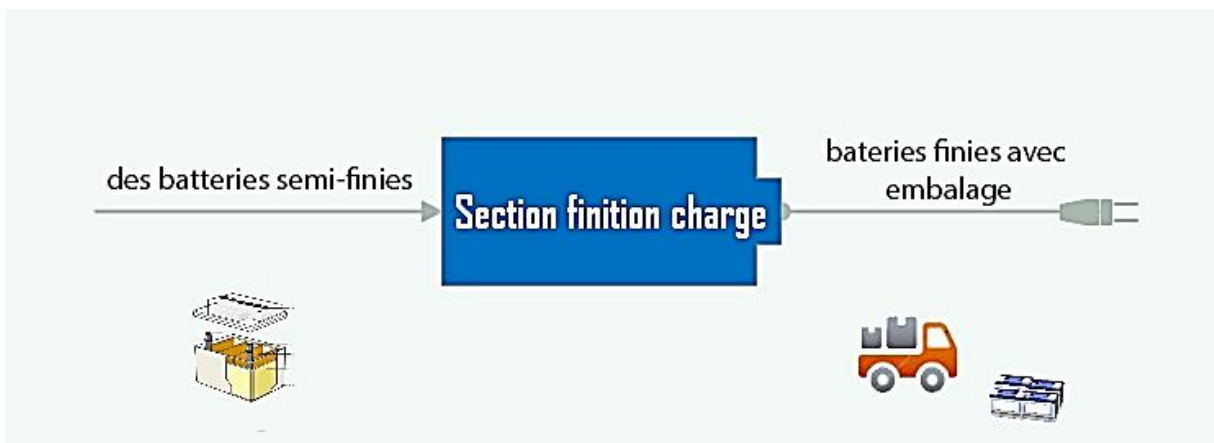


Figure 12: Section finition entrée et sortie

CHAPITRE II :

CONTEXTE DU PROJET

1. Processus de murissage

a. Murissage

Le processus qui se situe dans la section plaque, la première section dans le processus de fabrication de la batterie, a pour but de fabriquer les plaques qui sont la base de la batterie.

Ce processus a comme poste amont l'empâtage qui livre des palettes contenant des plaques (positives et négatives) sous forme finale.

Après la fin du cycle de séchage, les palettes sont transportées vers la section d'assemblage.

Le taux du **PML** (plomb métallique libre) ainsi que l'**humidité** des plaques sont les deux paramètres contrôlés à la fin du processus. L'humidité dans les plaques doit être inférieure à 1%. Une valeur supérieure à 1% engendra un court-circuit de la batterie.

b. Chambres de mûrissage



Figure 13: Chambres de murissage ou hydrosetting

La chambre a été conçue et réalisée pour effectuer le durcissement (curing) des plaques internes, grâce au contrôle de la température et de l'humidité. Elle se compose de :

- 2 ventilateurs de 6500 m³/h afin d'obtenir une meilleure circulation d'air possible pour les plaques.

- 2 portes à deux pistons pour leur ouverture radiocommandée.
- Une sonde pour mesurer la température et une autre pour mesurer l'humidité transmettant les informations au tableau de commande.
- Tableau de commande qui permet d'effectuer toutes les opérations liées à l'ouverture des portes, à la régulation de la durée de durcissement des plaques et à toutes les phases du traitement.
- 26 éléments de chauffage sont des résistances électriques pour une puissance totale de 46 KW.
- Un exhausteur avec une capacité de 2500 m³/h.
- Des gicleurs alimentés par une pompe à haute pression (50 bar) pour nébuliser l'eau.

Tableau 2: Composants de la chambre de murissage et leurs caractéristiques

Composant	Nombre	Caractéristique
Ventilateurs	2	Capacité 6500 m ³ /h Puissance =3KW
Exhausteur	1	Capacité 2500 m ³ /h Puissance=0.37 KW
Pompe d'humidité	1	Pression d'entrée=2bar Température d'entrée d'eau (50°C – 60°C) Pression de sortie =50bar Puissance =4KW.
Résistances électriques	26	2 groupes de résistances de 13 éléments par groupe Puissance totale =46KW, Température maximale 95°C
Sonde d'humidité et de température	1	Température entre -40°C et +80°C Humidité entre 0% et 100% ±2%
Les Buses	2	
Chaudière	1	Pression =2 bar, température T=60°C
Tableau de commande	1	
API	1	Allen-Bradley
Porte	2	2 moteurs triphasés, 5 vérins
Dimensions de la chambre		Longueur : 5015 mm, largeur : 3250mm, hauteur 3000mm

c. Programme des chambres de mûrissage

La procédure de murissage est caractérisée par 3 cycles :

1. Deux cycles de mûrissage (durcissement) contient 2 phases : curing1 et curing2.
2. Cycle de séchage contient 3 phases de séchage : séchage 1, séchage 2 et séchage 3.

Les paramètres contrôlables sont les suivants :

1. Le niveau de HR dans la chambre (%).
2. Le degré de température dans la chambre T (°C).
3. Le niveau de ventilation VENT (%).
4. Le niveau d'extraction EXT (%).
5. La durée de chaque phase D(h).

Le tableau 3 résume les valeurs associées à chaque paramètre dans chaque phase durant le programme de murissage qui dure 56 heures :

Tableau 3: Paramètres du programme de murissage

	Curing 1	Curing 2	Séchage 1	Séchage 2	Séchage 3
Durée	12h	12h	12h	10h	10h
Ventilation	60%	100%	100%	100%	100%
Extraction	20%	40%	100%	100%	100%
Température	45°C	50°C	75°C	75°C	75°C
Humidité	95%	60%	0%	0%	0%

2. Outils du projet

Cette partie a pour but de clarifier deux outils que nous allons beaucoup utiliser durant le projet.

a. Moniteur de supervision

C'est un programme de supervision connecté instantanément à l'API des chambres. Le moniteur nous permet d'avoir une idée claire sur ce qui se passe à l'intérieur de la chambre et permet de visualiser les paramètres suivants :

- La consigne de l'humidité dans la chambre.
- La consigne de la température dans la chambre.
- La mesure de l'humidité dans la chambre.
- La mesure de la température dans la chambre.
- L'état du programme (STOP, RESET, START).

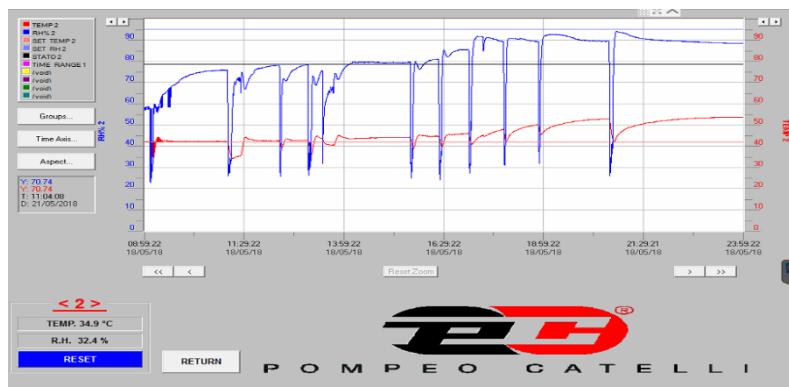


Figure 14: Moniteur de supervision

b. Contrôle de l'humidité

Le contrôle de l'humidité des plaques se fait dans le laboratoire de qualité par hygromètre.

Le principe du contrôle est de séparer la matière active de la plaque poser dans l'hygromètre en mesurant sa masse initiale (elle doit être égale à 10 g), l'hygromètre contient des résistances qui vont chauffer la matière jusqu'à 130°C pendant 15 min, par la suite il va mesurer la masse finale et comparer avec la masse initiale, la différence entre les deux s'affiche comme un pourcentage modélisant le niveau d'humidité de la plaque.



Figure 16 : Matière active de la pate



Figure 16: Hygromètre

3. Définition du problème

Le contrôle qualité du produit à la fin du processus de murissage se fait sur les 2 valeurs (PML et HR), notre travail a pour but de résoudre le problème suivant « le niveau d'humidité est généralement plus élevé que la norme (1%) dans les plaques à la fin du processus de mûrissage des plaques ».

Une valeur d'humidité plus que 1% dans les plaques cause un court-circuit de la batterie, la batterie sera donc rejetée dans la section d'assemblage par un testeur de tension, la batterie est dite non conforme.

4. Démarche de résolution du problème

Afin de traiter le sujet proposé par l'entreprise d'une façon didactique, logique et efficace et après avoir réalisé une recherche sur les méthodes et les approches de résolution des problèmes, notre choix a été fixé sur la méthode PDCA largement utilisée dans le domaine d'automobile, caractérisée par sa démarche simple et structurée.

Les étapes de la démarche se déroulent selon l'ordre suivant :

Etape plan = planifier

- Définir le problème
- Objectif du projet
- Réponse
- Détermination des facteurs
- Choix du plan d'expérience
- Construction de la matrice d'expérience [5]

Etape Do= faire

- Réalisation des essais
- Résultats des essais
- Analyse statistique des résultats
- Représentation graphique des effets

Etape Check = vérifier ou contrôler

- Vérifier que la solution retenue conduit à l'objectif

Etape Act = agir /réagir

- Actions correctives et gain estimé

5. Méthodes utilisées

5.1 QQQQCP

Cet outil consiste à poser toutes les questions relatives à une problématique afin de fixer le périmètre en vue d'une future démarche de résolution du problème. Il est utilisé dès lors que l'on cherche à avoir une vision complète d'une situation :

- **Qui** : Personnes concernées par le problème, qui a constaté le problème ? sur quelle personne le problème va-t-il impacter ?
- **Quoi** : Nature et conséquence du problème, quelle est l'activité/processus concerné par le problème ?
- **Où** : Localisation et périmètre du problème, quels sont les secteurs concernés ?
- **Quand** : Caractéristique temporelle du problème, depuis Combien de temps le problème existe ? quelle est sa fréquence d'apparition ?
- **Comment** : Mode d'occurrence du problème, Comment le problème se relève-t-il ? Quels sont ses effets ?
- **Pourquoi** : Raisons et causes du problème (pourra être déterminé par le diagramme de cause-effets et l'outil des 5 pourquoi.), pourquoi réaliser ces actions ?

5.2 Ishikawa (5M)

Le diagramme d'Ishikawa, aussi appelé diagramme de causes et effets ou encore diagramme en arêtes de poisson, est un outil de résolution de problème. Il prend la forme d'un arbre avec plusieurs branches (ou d'une arête de poisson). On y retrouve l'effet, le problème que rencontre l'entreprise, à la tête et les causes sont modélisées par des branches. Ces causes sont réparties en « 5 M » représente chacune une composante de l'entreprise. [4]

- Matière : toutes causes liées aux éléments utilisés dans le processus de fabrication comme l'utilisation de matières premières périmées, des fournitures de mauvaise qualité ou des pièces avec des défauts.
- Milieu : les causes liées à l'environnement et au contexte de réalisation.
- Méthodes : Les causes liées aux potentiels dysfonctionnements ou ralentissement dans les processus de travail et les modes opératoires, des erreurs dans les instructions ou mode d'emploi.

- Matériel : Les causes liées aux équipements, machines, outils, logiciels, défectueux, obsolètes ou non adaptés.
- Main d'œuvre : (Connaissances, compétences, comportement, organisation de l'équipe de travail...) [3].

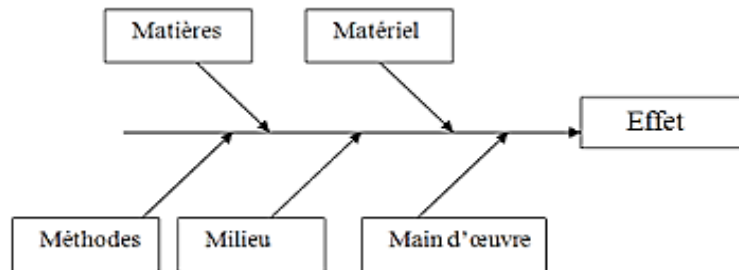


Figure 17: Forme d'un diagramme 5M [4]

5.3 Méthode des Plans d'expériences

De manière générale, la méthode des plans d'expériences cherche à déterminer et à établir les liens existants entre 2 types de variables :

- La réponse : grandeur physique étudiée.
- Les facteurs : grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur, sensées influencer les variations de la réponse.

Plus précisément, elle vise aussi à comprendre les relations liant la réponse avec les facteurs et celles liant les facteurs entre eux.

Pour cela, la solution proposée consiste dans tous les cas à établir un modèle, exprimant la réponse en fonction des facteurs. Pour bâtir ce modèle, il faut appréhender ces variations. Celles-ci sont déduites des résultats de séries d'expériences, c'est-à-dire de plusieurs configurations pour lesquelles les valeurs des facteurs sont différentes [5].

Les objectifs des plans d'expériences sont :

- Diminuer le nombre d'essais.
- Connaître les effets des paramètres.
- Dédire les paramètres influents.
- Evaluer les interactions entre les paramètres.
- Avoir une meilleure précision sur les résultats.
- Etablir une modélisation mathématique de la réponse.

5.3.1 Notion de base

○ Facteurs

Les facteurs représentent toutes les variables agissant sur un système ou provoquant un phénomène. Ils peuvent être qualitatifs, quantitatifs, discrets ou continus. Mais aussi, un facteur peut être contrôlable ou non contrôlable. Un facteur contrôlable est toute variable, qui est susceptible d'avoir une influence sur la sortie d'un système, à laquelle il est possible d'accorder ou d'imposer une valeur (par exemple : la résistance d'un moteur, les dimensions d'un objet, la température d'une salle, etc.). Quant au deuxième cas, un facteur non contrôlable est généralement considéré comme un bruit. Ce type de facteur peut avoir une influence directe (paramètres environnementaux d'un atelier ou d'une usine peuvent mettre en cause la qualité d'un produit), ou indirecte (vieillesse) sur le comportement des systèmes.

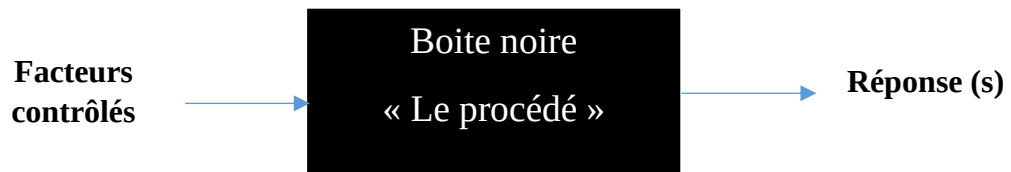


Figure 18: Système de boîte noire

Un facteur est limité par deux bornes : une inférieure notée -1 et l'autre supérieure notée +1. Le domaine de variation du facteur est constitué de toutes les valeurs comprises entre le niveau bas et le niveau haut.

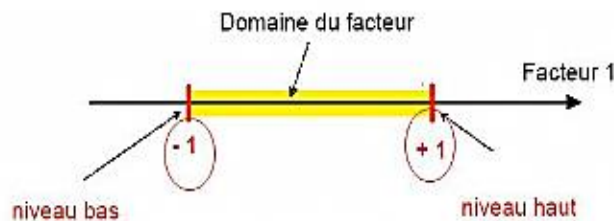


Figure 19: Représentation graphique d'un facteur

○ Réponse

Grandeur mesurée après chaque essai (grandeur d'intérêt).

○ Niveau

Valeur donnée à un facteur pour réaliser un essai.

○ Espace expérimental

Repère cartésien dont les deux axes sont les facteurs.

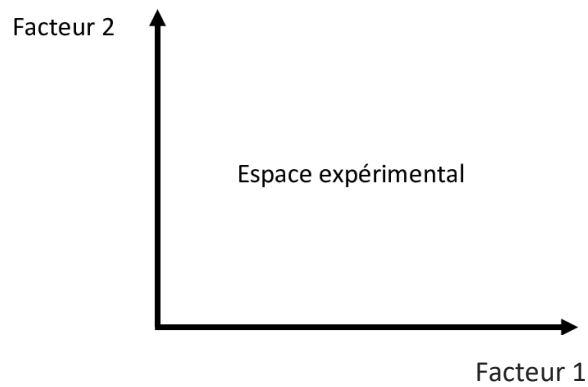


Figure 20:Espace expérimental

○ **Domaine d'étude**

C'est la zone de l'espace expérimental choisie par l'expérimentateur pour faire ses essais. Les points expérimentaux sont disposés dans le domaine d'étude défini par l'expérimentateur.

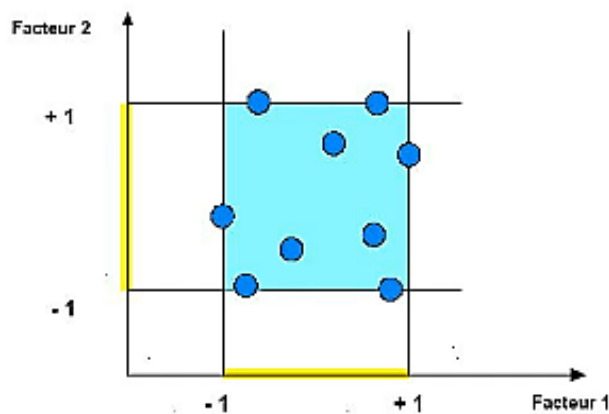


Figure 21: Domaine expérimental d'intérêt

○ **Modélisation mathématique**

Fonction mathématique qui relie la réponse aux facteurs.

$$Y = a_0 + \sum a_i X_i + \sum a_{ij} X_i X_j + \dots + \sum a_{ii} X_i^2 + a_{ij\dots z} X_i X_j \dots X_z$$

Avec : a_i l'effet du facteur X_i et a_{ij} l'effet des interactions entre facteurs.

- **Plan d'expérimentation**

C'est une matrice déclinant l'ensemble des conditions expérimentales, imposées aux variables réelles pour la réalisation des différents essais, dans le cadre des plans d'expériences choisis.

- **Matrice d'expériences**

C'est la matrice qui rassemble les niveaux pris par les variables codées pour les différentes expériences à réaliser dans le cadre du plan choisi.

- **Notion d'interaction**

Il y a interaction entre deux facteurs A et B si l'effet de A sur la réponse dépend du niveau de B ou inversement (Figure 22).

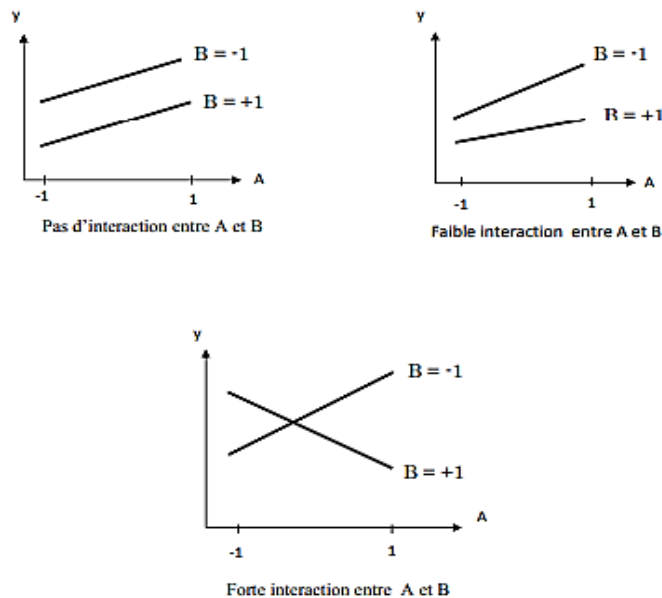


Figure 22: Courbes d'interaction

5.3.2 Méthodologie des plans d'expériences

Nous allons dans un premier temps présenter les plans factoriels [5], c'est-à-dire les plans d'expériences à 2 niveaux par facteur. Ce sont les plus utilisés car ils sont les plus simples et les plus rapides à mettre en œuvre. Tout d'abord, nous allons traiter les plans factoriels complets, avec deux niveaux et k facteurs sont notés 2^k .

Ces plans possèdent un nombre de niveaux limité à deux pour chaque facteur. Toutes les combinaisons de niveaux sont effectuées au cours de l'expérimentation. Ces plans peuvent être utilisés indistinctement pour les variables continues et pour les variables discrètes.

- Un plan comportant k facteurs à deux niveaux est noté 2^k
- k en exposant signifie qu'il y a k facteurs étudiés.
- 2 indique le nombre de niveaux par facteur.

Plus généralement, la matrice d'expériences comporte k colonnes pour les facteurs principaux et 2^k lignes soit 2^k essais. Elle se construit selon la règle suivante :

- Colonne du 1^{er} facteur : alternance de -1 et +1
- Colonne du 2^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 2 en 2
- Colonne du 3^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 4 en 4
- Colonne du 4^{ème} facteur : alternance de -1 et +1 de 8 en 8

La détermination du domaine expérimental, des plans d'expérimentation et analyse statistique des résultats est réalisée à l'aide **du logiciel Nemrodw**.

CHAPITRE III :

**OPTIMISATION DU PROCESSUS DE
MURISSAGE DES PLAQUES DES BATTERIES
PAR DES PLANS D'EXPERIENCES**

1. Plan = Planifier

1.1 Définition le problème

Le tableau suivant résume les différentes informations décrivent le problème d'une façon générale d'un point de vue macroscopique, les informations suivantes sont tirées lors d'un entretien avec le responsable de section plaques.

Tableau 4 : tableau QQOCQP cadre de projet

QUOI ?	L'humidité des plaques est supérieure à 1% qui est plus que la norme exigée à la fin du processus de mûrissage des plaques des batteries.
QUAND ?	Le problème apparu pendant les 4 dernières années. Fréquence à chaque processus de mûrissage des plaques des batteries.
OÙ ?	Au sein de l'unité de fabrication des plaques de batteries, précisément dans les chambres de murissage.
COMMENT ?	A la sortie de la chambre de murissage, les plaques ont une humidité supérieure à 1 ce qui provoque des arrêts de production.
QUI ?	Le responsable de l'unité de fabrication des plaques des batteries, le directeur technique de la zone de production des batteries.
POURQUOI ?	Le problème cause un retard de production, ainsi qu'une mauvaise qualité du produit.

1.2 Objectif du projet

L'objectif de ce projet est d'améliorer le processus de mûrissage des plaques des batteries en minimisant le temps de cycle de séchage.

1.3 Réponse

La réponse choisie est l'humidité des plaques des batteries (% RH), elle est mesurée par un hygromètre.

1.4 Détermination des facteurs

La stratégie adoptée pour la détermination des facteurs est la suivante :

- Réaliser un Brainstorming afin de rassembler tous les facteurs pouvant influencer l'humidité des plaques.
- Etablir un diagramme d'Ishikawa pour classer les facteurs collectés.

1.4.1 Collecte d'informations

Le Brainstorming est une méthode permettant de produire un maximum d'idées en un minimum de temps. Il est utilisé pour résoudre un problème en recherchant les causes et les solutions possibles.

Dans un premier temps nous allons regrouper les causes possibles des problèmes suggérés par des différents acteurs en contact avec le problème, pour cela une réunion de brainstorming s'est tenue entre les membres de l'équipe du projet. Le but de la réunion est de collecter le maximum de causes possibles du problème.

D'après cette réunion, les causes du problème sont :

- Mauvaise distribution de l'air dans les palettes
- La température et l'humidité du milieu extérieur ne sont pas bien définies
- La main d'œuvre peu qualifiée
- Quantité de palettes est aléatoire
- L'espace entre les piles des plaques (empilage) est insuffisant (3cm) pour la circulation de l'air ainsi l'empilement des plaques est à 100 plaques par pile empêche la chaleur d'atteindre les plaques au milieu
- Résistances défaillantes
- Extracteur défaillant
- Ventilateur défaillant
- Ne pas ouvrir les portes automatiquement à la fin du cycle de séchage

Pour mieux regrouper ces causes on trace un diagramme d'Ishikawa.

1.4.2 Classification des informations

Les informations tirées du questionnaire et de la réunion de Brainstorming avec le responsable d'unité de fabrication des plaques, les opérateurs et les contrôleurs qualité seront regroupées par catégorie en utilisant le diagramme d'Ishikawa (figure 23).

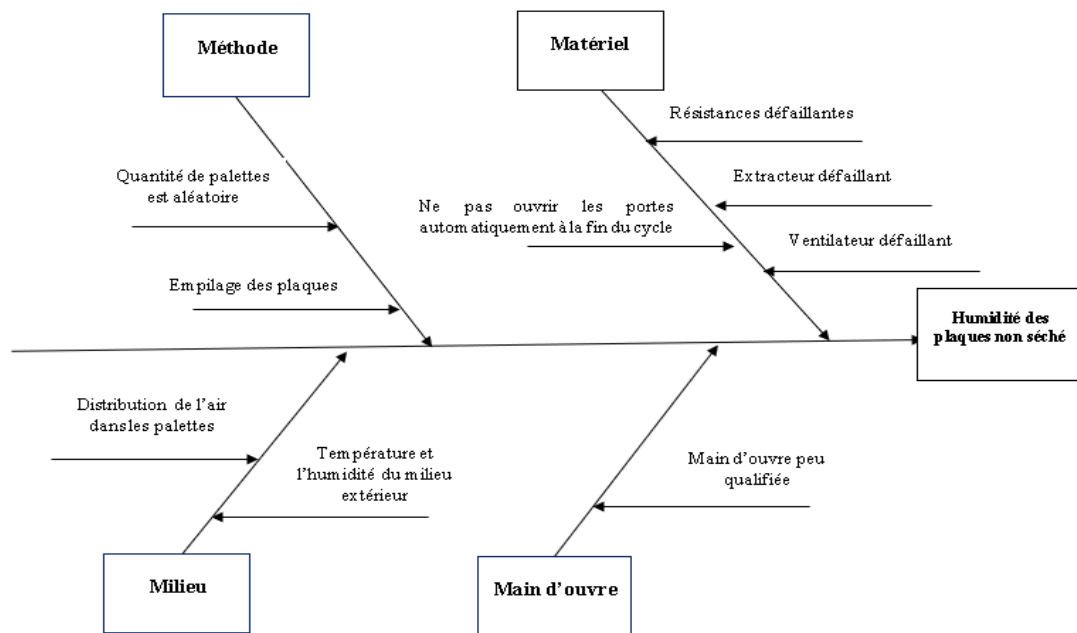


Figure 23 : Diagramme cause et effet [4]

D'après ce diagramme on peut conclure que les 2 catégories Matériel et méthode sont les plus probables d'être la cause du problème d'après les acteurs. Selon ce détail on va se concentrer sur ces 2 catégories par les plans d'expériences.

1.4.3 Détermination des facteurs et du domaine d'étude

Un choix adéquat des domaines de variation des paramètres est une condition essentielle pour établir un modèle précis qui décrit parfaitement le processus étudié.

Les critères de choix des paramètres influençant l'humidité des plaques sont (température, quantité de palettes, position de plaques, types de plaque). La réponse notée Y est l'humidité. Chaque facteur (X_i) à un niveau bas et un niveau haut noté respectivement (-1) et (+1) en variable codée.

Tableau 4: Facteurs et leur domaine expérimental

Facteurs	Variable	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Température	X1	70°C	75°C
Quantité de palettes	X2	30	40
Types de plaque	X3	112g	135g
Position de plaques	X4	0	1

Le but de cette méthode est de voir la variation de l'humidité en fonction de quatre paramètres. Ces derniers représentent les paramètres d'entrée selon la figure 24.

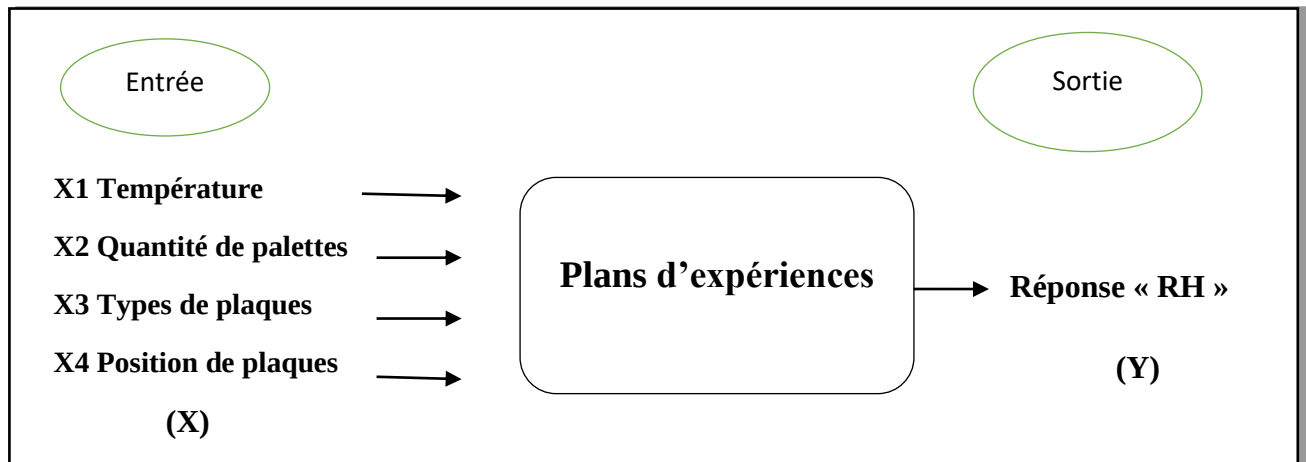


Figure 24 : Modèle de fonctionnement des paramètres de l'essai

1.5 Choix du plan d'expérience

Le choix du plan d'expérience permet de considérer les quatre facteurs à deux niveaux, on a un nombre d'essai égal à $2^4 = 16$. Un plan factoriel complet s'avère le mieux adapté pour cette étude, car il est plus précis.

1.6 Construction de la matrice des expériences

Notre objectif est de réaliser un minimum possible d'expériences. Dans les matrices d'expériences factorielles complètes 2^k , lorsque le nombre de facteurs augmente, le nombre d'essais devient vite très important, il en résulte une mise en œuvre lourde et coûteuse.

Un plan factoriel complet nécessiterait 16 expériences, la matrice des essais est présentée dans le tableau suivant :

Tableau 5: Matrice des expériences du plan factoriel complet

N° Exp	Température (°C)	Quantité de palettes	Types de plaque	Position des plaques
1	-	-	-	-
2	+	-	-	-
3	-	+	-	-
4	+	+	-	-
5	-	-	+	-
6	+	-	+	-
7	-	+	+	-
8	+	+	+	-
9	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

Niveau -1	70°C	30	112 g	0
Niveau +1	75°C	40	135 g	1

La présentation du plan suit l'ordre classique des essais. Les niveaux de la première colonne sont alternés et commencent par -1. Les niveaux de la deuxième colonne sont alternés deux par deux : 2 signes -1 et 2 signes +1 et ainsi de suite. Les niveaux de la troisième colonne sont alternés quatre par quatre : 4 signes -1 et 4 signes +1 et ainsi de suite. Les niveaux de la quatrième colonne sont alternés huit par huit : 8 signes -1 et 8 signes +1 [5].

2. Do = Faire

2.1 Réalisation des essais

Tout d'abord, les opérateurs chargent les plaques dans les palettes à la section d'empilage jusqu'à 30 heures par 3 équipes, ensuite les palettes contenant les plaques sont transportées à la chambre de murissage ou hydrosetting. Ce sont des chambres dont la température et l'humidité peuvent être modifiées par l'intermédiaire d'un HMI (Homme Machine Interface). Le processus de murissage passe par trois cycles : 2 cycles de murissage pour la cristallisation de la matière et un cycle de séchage pour diminuer l'humidité relative dans les plaques pour qu'elle soit moins de 1%.

Après remplissage des chambres par 40 palettes, on lance le programme à 36 heures, une fois finie, les contrôleurs ouvrent les chambres et afin de mesurer l'humidité des plaques.

Dans la majorité des cas, on trouve que l'humidité des plaques est supérieure à 1% et dans ce cas on referme les chambres du murissage et on lance un nouveau programme qui pourrait durer de 10 heures à 20heures.

Tableau 6: Suivi des plaques des batteries

Date	Chambre	Quantité de plaques	Quantité de palettes	Types de plaque
28/02/2022	2	12170	30	XW 1,40 +
01/03/2022	3	12530	30	XW 1,25 -
02/03/2020	1	111000	40	XW 1,40 +
03/03/2022	2	111500	40	XW 1,25 -
07/03/2022	1	80300	30	XW 1,40 +
14/03/2022	2	106400	40	XW 1,25 -
15/03/2022	1	111500	40	XW 1 ,25 -
17/03/2022	3	112000	40	XW 1,40 +
21/03/2022	3	74100	30	XW 1,40 +
22/03/2022	2	80300	30	XW 1 ,25 -
24/03/2022	1	84000	30	XW 1,25 -
28/03/2022	2	112000	40	XW 1,40 +
04/04/2022	1	112000	40	XW 1,40 +
05/04/2022	3	70800	30	XW 1,40+
07/04/2022	2	80300	30	XW 1,25-
08/04/2022	1	112000	40	XW 1,25 -

2.2 Résultats des essais

Les résultats des expériences réalisées sont donnés dans le tableau 7.

Tableau 7: Plan d'expérimentation et résultats expérimentaux

N° Exp	Facteurs				Réponse
	X1 Température (°C)	X2 Quantité de palettes	X3 Types de plaque (g)	X4 Position de plaques	Y Humidité de plaques %
1	70	30	112	0	1.48
2	75	30	112	0	1.32
3	70	40	112	0	1.50
4	75	40	112	0	1.55
5	70	30	135	0	1.10
6	75	30	135	0	1.26
7	70	40	135	0	1.35
8	75	40	135	0	1.30
9	70	30	112	1	1.55
10	75	30	112	1	1.45
11	70	40	112	1	1.60
12	75	40	112	1	1.65
13	70	30	135	1	1.27
14	75	30	135	1	1.13
15	70	40	135	1	1.50
16	75	40	135	1	1.45

2.3 Effets des Facteurs et Modèle mathématique associé

La détermination des effets purs des facteurs étudiés ainsi que les effets d'interactions ont été effectué en utilisant le logiciel Nemrodw (table 8). Un modèle mathématique linéaire, exprimant la réponse Y aux facteurs considérés, peut être ainsi déterminé. L'équation de ce modèle, dont les coefficients correspondent bien aux effets calculés, a la forme générale suivante :

$$\begin{aligned}
 Y = & b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 + b_3 * X_3 + b_4 * X_4 \\
 & + b_{1-2} * (X_1 * X_2) + b_{1-3} * (X_1 * X_3) + b_{2-3} * (X_2 * X_3) + b_{1-4} * (X_1 * X_4) \\
 & + b_{2-4} * (X_2 * X_4) + b_{3-4} * (X_3 * X_4) + b_{1-2-3} * (X_1 * X_2 * X_3) + b_{1-2-4} * (X_1 * X_2 * X_4) \\
 & + b_{1-3-4} * (X_1 * X_3 * X_4) + b_{2-3-4} * (X_2 * X_3 * X_4) + b_{1-2-3-4} * (X_1 * X_2 * X_3 * X_4)
 \end{aligned}$$

Avec les coefficients b_j sont les effets purs des facteurs X_j et les coefficients b_{ij} sont les effets d'interactions de X_i et X_j .

- **Calcul des coefficients du modèle**

Les coefficients du modèle sont donnés par le logiciel Nemrodw :

Tableau 8:Estimations des coefficients

Nom	Coefficient
b0	1.404
b1	-0.015
b2	0.084
b3	-0.109
b4	0.046
b12	0.015
b13	0.005
b23	0.021
b14	-0.015
b24	0.016
b34	-0.004
b123	-0.030
b124	0.015
b134	-0.022
b234	0.016
b1234	0.023

- **Test de signification des effets**

Le test de signification des effets (coefficients du modèle) est basé sur la comparaison entre l'effet bj (ou bij) et l'erreur sur sa détermination ΔE , estimé par la formule suivante :

$$\Delta E = \frac{t \times S_y}{\sqrt{N}}$$

Avec :

- S_y : écart type de répétabilité d'un essai. (Dans ce travail, 4 répétitions de l'essai 8 ont donné les valeurs suivantes de la réponse considérée : 1,34 ; 1.41 ; 1,30 et 1,31). La formule de l'écart type est :

$$S_y = \sqrt{\sum_{i=1}^4 \frac{(y_i - \bar{y})^2}{4-1}}$$

$$\text{Avec } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^4 y_i}{4} = \frac{1,34+1,41+1,30+1,31}{4} = \frac{5,36}{4} = 1,34$$

$$\text{Donc } S_y = \sqrt{\frac{7,4 \times 10^{-3}}{3}} = 0,05$$

- t : paramètre tabulé (voir annexes) du test de Student pour un nombre de degré de liberté (ν) = 4-1 et un niveau de confiance de 95% (risque $\alpha=5\%$) $\Rightarrow t = 3,182$
- N : nombre d'expériences du plan réalisé.

$$\text{Donc : } \Delta E = \frac{t \times S_y}{\sqrt{N}} = \frac{3.182 \times 0,05}{\sqrt{16}} = 0,04$$

Un effet b_j est considéré comme significatif si $|b_j| > \Delta E$

En reprenant les valeurs de effets calculés (table 8), il est nettement clair que seuls les effets de la quantité de palettes (X_2), les types de plaque (X_3) et la position des plaques (X_4) sont significatifs et il n'y a pratiquement pas d'effets d'interactions. En effet :

- La quantité de palettes et la position des plaques ont des effets positifs légèrement significatifs, de +0,084 et +0,046, respectivement. Une augmentation du niveau des 2 facteurs entraîne l'augmentation de Y .
- Les types de plaque a un effet négatif relativement fort. L'utilisation des plaques du type 135 g au lieu du type 112g, permet de réduire nettement l'humidité Y en moyenne de 0,109 %.
- La température apparait comme sans effets (dans le domaine choisi) sur l'humidité Y .

L'expression finale du modèle mathématique, après élimination des termes non significatifs, est la suivante :

$$Y = 1,404 + 0,084X_2 - 0,109X_3 + 0,046X_4$$

Sachant que l'objectif est de réduire au maximum la réponse Y (humidité) et compte tenu des calculs des effets des facteurs, on peut conclure que Y sera minimale dans les conditions suivantes :

- Une quantité de palettes au niveau bas (-1) : 30
- Le type de plaques au niveau haut (+1) : 135 g
- La position des plaques au niveau bas (-1) : 0
- La température au niveau bas (-1, plus économique) : 70°C

Dans ces conditions, on devrait obtenir une humidité minimale théorique (estimée par le modèle) d'environ 1,165 %.

3. Check = vérifier

3.1 Essais de vérification

Tableau 9 : Essais de vérification

Date	Chambre	Types de plaque	Quantité de plaques	Nombre de palettes	T (°C)			%RH entrée	%RH Séchage 1	CYCLE de séchage supplémentaire (h)	%RH Séchage 2
					C1	C2	S1				
04/04/22	2	XW 1, 40+	96800	40	45	50	75	10,15	1,24	4h	0,36
07/04/22	1	XW 1,25 -	94206	40	45	50	70	7,94	1,20	4h	0,14
11/04/22	3	XW 1,25 -	96700	40	45	50	70	8,24	1,19	4h	0,40

3.2 Interprétation des résultats

Des essais de vérification des conditions optimales sous mentionnées ont été mené. En effet 3 répétitions de l'essai optimal ont donné des humidités (y_{opt}) de 1,19 ; 1,20 et 1,24 %, soit une humidité optimale (minimale) de $1,21 \pm 0,026$.

D'après les essais qu'on a effectués, on observe que l'humidité des plaques est supérieure à 1% après 36h (séchage 1).

On a fait un cycle supplémentaire de 4h de séchage et après on a mesuré le pourcentage de l'humidité en sortie à la fin de séchage 2 sa valeur est inférieur à 1%.

La diminution du programme des chambres de mûrissage de 56h à 40h permet d'avoir un gain en terme du temps et en terme de l'énergie qu'on va évaluer dans la dernière étape.

3.3 Résolution du problème des résistances des chambres de mûrissage

- La consigne de la température dans la chambre 1 avant changement des résistances

Le moniteur de supervision est un programme connecté instantanément avec l'API des chambres. Le moniteur nous permet d'avoir une idée claire sur ce qui se passe à l'intérieur de la chambre. Il permet de visualiser la variation de la température et l'humidité.

- La consigne en rouge c'est la température
- La consigne en bleu c'est l'humidité

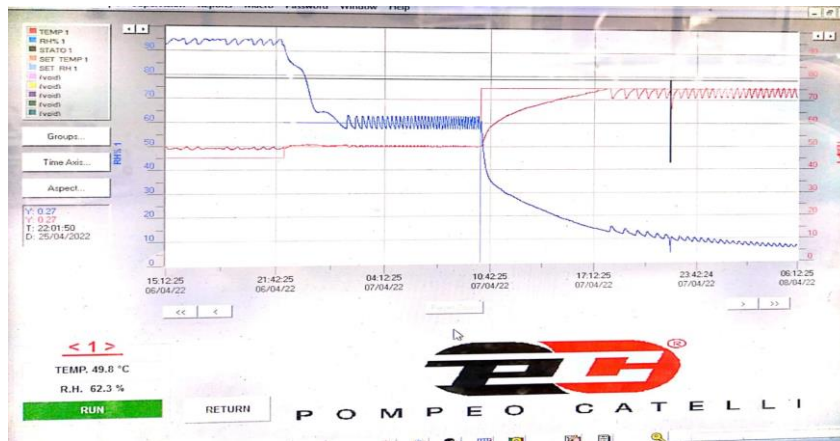


Figure 25: Moniteur de supervision

Le programme du processus de murissage passe en premier par la phase de curing 1 de température de 45°C, après passe par la phase de curing 2 de température de 50°C et enfin la phase de séchage de température de 75°C.

Au cours de la phase de séchage, on observe un retard de 6h, ce retard est dû à un défaut des résistances de la chambre de murissage.

- La consigne de la température dans la chambre 1 après changement des résistances

Après changement de résistances, on constate que le problème est résolu dans la phase de séchage, on a qu'un retarde de 3h.

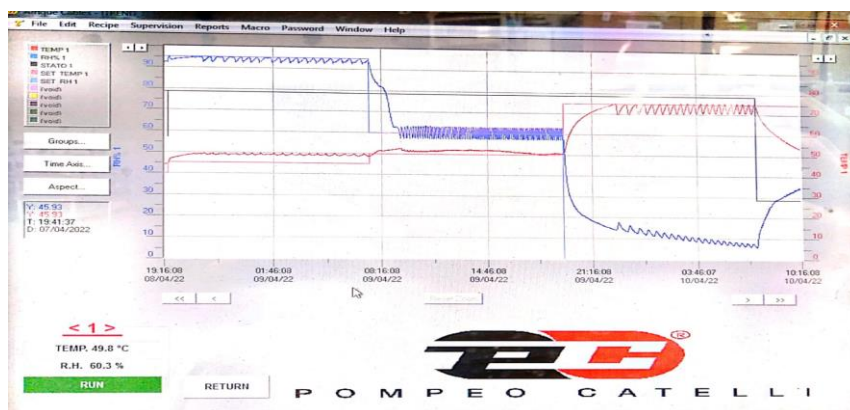


Figure 26: Moniteur de supervision

4. ACT= Réagir

4.1 Mise en place des actions correctives appliquées aux équipements des chambres de murissage

Cette étape permet de finaliser la démarche afin d'assurer la pérennité des résultats des actions mises en œuvre.

Tableau 9: Solutions proposées pour les causes potentielles

Composants	Causes potentielles	Actions correctives
Résistances électriques	Dégradation par le temps, humidité, température	Changer les résistances périodiquement
Ventilateurs	Certaines pièces du système ou du ventilateur ont été endommagées ou ont besoin d'être nettoyées	Nettoyer les composants du moteur-ventilateur et vérifier l'état de ces composants
Les portes	Portes fermées à la fin du cycle de séchage.	Changer le programme de l'API, pour que les portes s'ouvrent automatiquement après la fin du cycle de séchage.
Extracteur	Certaines pièces du système ont été endommagées ou ont besoin d'être nettoyées	Changement de quelques composants de l'extracteur ou changement du moteur.

4.2 Validation du temps de cycle de murissage

Date	Chambre	Types de plaque	Quantité de plaques	Nombre de palettes	T°C			% RH entrée	%RH Séchage 1
					C1	C2	S1		
03/05/22	2	XW 1, 40+	96800	40	45	50	75	10,15	0,44
05/05/22	1	XW 1,40+	96160	40	45	50	75	10,17	0,49
09/05/22	3	XW 1,25 -	96700	40	45	50	70	8,24	0,50

Compte tenu des essais de vérification, on a décidé de changer le temps de programme du processus de murissage en 40 heures par élimination des 10 heures supplémentaires, ainsi les 6 heures de la durée du programme original.

Donc nous allons le valider en mettant un changement du temps en 40h et après nous allons lancer le programme et vers la fin on va remesurer l'humidité des plaques pour valider les résultats.

4.3 Rendement du projet

- **Réduction du temps du processus de murissage**

Le programme du processus de murissage passe de 56h à 40h donc nous avons économisé 16h par cycle.

- **Taux de murissage des plaques**

On calcule le taux de murissage des plaques T_m avant l'application des résultats des plans d'expériences :

$$T_m = \frac{\text{Nombre de plaques en une chambre murissage}}{\text{Durée de murissage}} = \frac{112000}{56}$$

$$T_m = 2000 \text{ pc/h} = 0,55 \text{ pc/s}$$

$$T_m(\%) = 55\%$$

On mesure le taux de murissage des plaques T_m après la mise en place des résultats des plans d'expériences :

$$T_m = \frac{\text{Nombre de plaques en une chambre murissage}}{\text{Durée de murissage}} = \frac{96800}{40}$$

$$T_m = 2420 \text{ pc/h} = 0,67 \text{ pc/s}$$

$$T_m(\%) = 67\%$$

On a pu augmenter le taux de murissage d'une valeur de 12%.

- **Calcul du gain en énergie**

Le gain en temps du programme de murissage est de 16 heures et on calcule le gain en énergie en 16h.

Le tableau suivant rassemble la consommation d'électricité liée à chaque composant de la chambre pendant l'étape de séchage du murissage.

Tableau 10: Consommation d'électricité liée à chaque composant de la chambre

Composants	Le nombre	P : puissance (kW)	Durée de temps travaillée (h)	E : Energie (kWh)
Ventilateurs	2	2	16	64
Extracteur	1	0.37	16	5,92
Résistances	26	1.8	16	748.8
Pompe	1	4	0	0

Le gain total d'énergie en 16h pour un cycle de séchage est $E = 818,72 \text{ kWh}$.

Le prix d'un kWh est 1.11 DHS, on a 6 cycles par semaine.

Par semaine	5452 DHS
Par mois	21810 DHS
Par année	239917 DHS

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail nous a permis d'améliorer le processus de murissage par élimination de 10 heures de cycle de séchage supplémentaires et d'avoir un produit conforme en matière de niveau d'humidité des plaques, en suivant la démarche PDCA.

On a commencé par définir la problématique et le cadre général du travail avec l'outil de brainstorming. Ensuite on a mis en place les plans d'expériences pour déterminer les paramètres optimaux du processus de murissage des plaques qui influencent la réponse.

Dans la phase Check on a vérifié la validité des paramètres en mettant en place des essais de vérification.

Dans la phase Act, un plan d'action concernant les équipements de la chambre de murissage a été proposé. Ce plan d'action a pu éliminer 10 heures du cycle de séchage supplémentaires et 6 heures de la durée du programme original. Cette optimisation du processus de murissage des plaques des batteries permet un gain de 16 h.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] p. rüetschi, "aging mechanisms and service life of lead-acid batteries", j. powersources, 127(1-2), 2004, p. 33-44.
- [2] Pdf: Notion sur les accumulateurs au plomb-acide – Créé par IZZO Pascal.
- [3] G. Dillenseger, "Caractérisation de nouveaux modes de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours" thèse de doctorat, Université de Montpellier ii, 2004, P 195.
- [4] Diagramme d'Ishikawa et les 5 M, pour une gestion de projet sans problème, rédigé par Nathalie Pouillard, en ligne sur : <https://leblogdudirigeant.com/diagramme-Ishikawa>
- [5] Goupy.J. (2017) Introduction aux plans d'expériences. 5^{ème} édition. Collection Tech.et Ing. Dunod. Paris.