

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département : Electrotechnique.

Entreprise : Mediterranean Float Glass

Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique
Option : Technologie d'Hydrogène.

**La simulation et l'optimisation d'une unité de
production d'hydrogène vert via l'électrolyse de l'eau
sous Aspen HYSYS.**

Rédigé par :
BELAMRI Aya.

Supervisé par :
Dr. TADJINE Soumaya (ENP)
Mr. KERKACHE Akrame (MFG)

Présenté et soutenu publiquement le :
(01/07/2026)

Composition du jury :
Président : **Prof. M. Teguar ENP**
Encadrant : **Dr. S. Tadjine ENP**
Examineur : **Dr. R. Maamri ENP**

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département : Electrotechnique.

Entreprise : Mediterranean Float Glass

**Mémoire de Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Electrotechnique**

Option : Technologie d'Hydrogène.

**Simulation et Optimisation de la production
d'hydrogène par électrolyse alcaline sous Aspen
HYSYS.**

Rédigé par :

BELAMRI Aya.

Supervisé par :

Dr. TADJINE Soumaya (ENP)

Mr. KERKACHE Akrame (MFG)

Présenté et soutenu publiquement le :

(01/07/2026)

Composition du jury :

Président : **Prof. M. Teguar ENP**

Encadrant : **Dr. S. Tadjine ENP**

Examineur : **Dr. R. Maamri ENP**

ملخص

تناول هذا العمل محاكاة وتحسين وحدة إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي القلوي للماء في مصنع "MFG" بالجزائر، حيث يُستخدم الهيدروجين لحماية حمام القصدير المنصهر من الأكسدة أثناء صناعة الزجاج المسطح. تم بناء نموذج محاكاة في الحالة المستقرة عبر برنامج "أسبن هايسس" والتحقق من صحته بنسبة خطأ بلغت 2.3% فقط مقارنة بالبيانات الحقيقية لخمس خطوط إنتاج، كما أظهر تحليل الحساسية أن تدفق المحلول الكهربائي (KOH) ودرجة الحرارة هما العاملان الأكثر تأثيراً على الأداء.

تلت ذلك صياغة استراتيجية تحسين متعددة الأهداف دمجت بين طريقة "بوكس-بينكن"، الخوارزمية الجينية NSGA-II، وطريقة اتخاذ القرار "توبسيس" لرفع الكفاءة وتقليص استهلاك الطاقة. وأثبتت النتائج أن ضبط معطيات التشغيل فقط، دون أي تعديل هيكلي، يرفع الإنتاج بمقدار +55.3 متر مكعب في الساعة ويوفر قرابة 968,000 كيلوواط ساعي سنوياً.

الكلمات المفتاحية : التحليل الكهربائي القلوي، أسبن هايسس، طريقة بوكس-بينكن، الخوارزمية الجينية، طريقة توبسيس، التحسين التشغيلي.

Abstract

This work addresses the simulation and operational optimization of the alkaline water electrolysis unit at the MFG plant in Algeria, where the produced hydrogen protects the molten tin bath from oxidation during flat glass manufacturing. A steady-state simulation model was developed using Aspen HYSYS and validated with high accuracy (2.3% error) against real plant data from a five-line system. Parametric sensitivity analysis identified the electrolyte (KOH) flow rate and temperature as the most critical operational levers.

A multi-objective optimization strategy combining the Box-Behnken method, the NSGA-II algorithm, and TOPSIS decision-making was then deployed to maximize efficiency while minimizing energy consumption. The results demonstrate that merely adjusting the operating setpoints, without structural modifications, increases production by +55.3 m³/h and saves nearly 968,000 kWh/year.

Keywords: Alkaline electrolysis, Aspen HYSYS, Box-Behnken, NSGA-II, TOPSIS, Optimization.

Résumé

Ce travail est dédié à la simulation et l'optimisation opérationnelle de l'unité d'électrolyse alcaline de l'eau du site de MFG en Algérie, où l'hydrogène produit protège le bain d'étain de l'oxydation lors de la fabrication du verre plat. Un modèle numérique en régime permanent a été développé sous Aspen HYSYS, validé avec une excellente précision (erreur de 2,3 %) face aux données réelles de l'usine d'un système à cinq lignes. L'analyse de sensibilité associée a désigné le débit d'électrolyte (KOH) et la température comme les paramètres de contrôle les plus influents.

Une stratégie d'optimisation multi-objectifs associant la méthode Box-Behnken, l'algorithme NSGA-II et l'approche décisionnelle TOPSIS a ensuite été appliquée pour maximiser le rendement tout en minimisant la consommation énergétique. Les résultats prouvent qu'un simple réajustement des consignes opératoires, sans aucun investissement structurel, accroît la production globale de +55,3 m³/h et génère une économie d'énergie annuelle de près de 968 000 kWh/an.

Mots clés : Electrolyse alcaline, Aspen HYSYS, Box-Behnken, NSGA-II, TOPSIS, Optimisation.

Dédicace

À ma tendre Mère

إِلَيْكَ يَا نَبْضَ قُلُوبِي وَيَا ضِيَاءَ عُمْرِي، إِلَى مَنْ كَانَ دُعَاؤُهَا سِرَّ تَوْفِيقِي
أُمِّي الرَّؤُومُ وَمَنْ لِلرُّوحِ بَلَسْمُهَا أَنْتِ الصَّيَّاءُ إِذَا مَا أَظْلَمَتْ سُبُلِي
حَمَلْتُ هَمِّي وَسِرْتُ الدَّرْبَ مُرْشِدَةً وَبِالدُّعَاءِ بَنَيْتِ النُّيُومَ لِي أُمْلِي
صَنَعْتَ مِنْ دَمْعِكَ الْعَالِي لِي الْفَرَحَ حَتَّى بَلَغْتُ مِنَ الْعُلَيَاءِ خَيْرَ وَلِي
هَذَا النَّجَاحُ جَنَاهُ طَابَ مِنْ يَدِكَ فَلَاكَ الْوَفَاءُ بِمَا قَدْ عِشْتَ مِنْ أَجْلِي

*À ma chère jumelle, **Imane**, Ma moitié, mon miroir et mon soutien de toujours. Partager ce chemin à tes côtés a rendu chaque défi plus léger. Ce succès est aussi le tien, gravé du sceau de notre complicité unique.*

*À ma petite sœur adorée, **Amel**, Le rayon de soleil de ma vie et la joie de notre maison. Ce succès est aussi le tien. Puisse-t-il t'inspirer à réaliser tous tes rêves, car je serai toujours là pour te voir voler plus haut que moi. Je t'aime de tout mon cœur.*

*À la mémoire de mon cher grand-père, **Hariti Ammar** (Puisse Dieu lui accorder Sa sainte miséricorde), Toi qui aurais tant aimé vivre ce moment à mes côtés. Ton départ a laissé un grand vide, mais tes valeurs et tes prières continuent de guider mes pas. Ce travail est un hommage à ton âme pure. Que Dieu t'accueille dans Son vaste paradis.*

*À mes chères **tantes** et à ma douce **cousine**, Pour votre affection, votre bienveillance et votre fierté qui m'ont toujours entourée. Vous êtes une seconde famille formidable et ce bonheur est le nôtre.*

*À ma précieuse et tendre amie, **Sarah**, Pour ta présence infaillible, tes encouragements constants et ton amitié sincère qui m'a tant fortifiée durant les moments de doute.*

*À mon honorable professeur de lycée, Monsieur **A. Azzouz**, Qui a su allumer en moi la flamme du savoir et de la rigueur dès les premières années. Vos précieux conseils et votre foi en mes capacités résonnent encore en moi aujourd'hui. Trouvez ici le témoignage de ma profonde gratitude.*

À tous les êtres proches, Que je n'ai pas pu citer, mais dont la présence, un mot ou un simple sourire ont éclairé mon parcours. Merci d'avoir fait partie de cette aventure.

Remerciement

Au terme de ce travail de fin d'études, je tiens à exprimer ma profonde et sincère gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à sa réalisation et à son aboutissement.

*Je remercie en premier lieu **Allah**, le Tout-Puissant, de m'avoir accordé la force, la volonté et la persévérance nécessaires pour mener ce projet à son terme.*

*Ma plus sincère reconnaissance s'adresse à ma directrice de mémoire, **Mme S. TADJINE**, Docteur en génie chimique, Enseignante vacataire (ENP) & Ingénieur Evalueur de Risques Industriels (SAA), pour la confiance qu'elle m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail, pour ses orientations scientifiques avisées, sa disponibilité constante et ses précieux conseils qui ont grandement contribué à la qualité de ce mémoire.*

*Je tiens également à exprimer ma vive gratitude à **Monsieur A KERKACHE**, ingénieur au sein de Mediterranean Float Glass (MFG), co-encadrant industriel de ce projet de fin d'études, pour son accueil chaleureux au sein de l'entreprise, pour la richesse des données techniques qu'il m'a transmises, pour ses explications détaillées du fonctionnement de l'unité d'électrolyse et pour sa précieuse disponibilité tout au long de cette collaboration industrielle.*

*Je remercie sincèrement **Monsieur le Professeur A. Smaili**, Professeur à l'ENP, qui me fait l'honneur de présider le jury de soutenance de ce mémoire, ainsi que **Docteur R. Maamri**, Maître de Conférences à l'ENP, pour avoir accepté d'examiner ce travail et d'en enrichir l'évaluation par son expertise.*

*Mes remerciements vont également à **Mr. K Boughrara** et **l'ensemble des enseignants du département Électrotechnique de l'ENP**, et en particulier à ceux de la filière Technologie de l'Hydrogène, pour la qualité de la formation dispensée, pour leur engagement pédagogique et pour les connaissances transmises tout au long de mon cursus d'ingénieur.*

*Je remercie également l'ensemble du **personnel de Mediterranean Float Glass (MFG)**, notamment les équipes de l'unité de production d'hydrogène et du service technique, pour leur accueil bienveillant, leur esprit de collaboration et pour le partage généreux de leur savoir-faire industriel.*

*Mes pensées les plus chaleureuses et les plus profondes vont à ma **famille** ma mère, mes sœurs, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible à chaque étape de mon parcours et pour les sacrifices consentis pour me permettre d'atteindre mes ambitions. Ce travail leur est dédié.*

*Je n'oublie pas mes **amis et camarades de promotion**, en particulier **Bakir sarah**, pour les moments partagés, l'entraide et la solidarité qui ont marqué ces années d'études.*

*À toutes ces personnes, **Merci**.*

Table des matières

Listes des figures

Liste des tableaux11

Nomenclature

Liste des acronymes

Introduction générale..... 17

1. Chapitre 01 : Etat de l'art sur l'Hydrogène et sa production. 20

Introduction 20

1.1. Généralité sur l'Hydrogène 20

1.1.1. Définition de l'Hydrogène..... 20

1.1.2. Caractéristiques de l'hydrogène : 21

1.1.2.1. Propriétés chimiques : 21

1.1.2.2. Propriétés physiques : 21

1.1.2.3. Propriétés énergétiques : 22

1.1.3. Production d'Hydrogène par électrolyse de l'eau : la voie électrochimique 23

1.1.3.1. Définition et principe de fonctionnement..... 23

1.1.3.2. Les composants des électrolyseurs..... 24

1.1.3.3. Paramètres électrochimiques gouvernant le fonctionnement de l'électrolyse de l'eau :
25

1.1.3.4. Les différents technologies d'Electrolyseurs..... 28

1.1.4. Autres méthodes de production d'Hydrogène 31

1.1.4.1. Production d'Hydrogène à partir de combustibles fossiles 31

1.1.4.2. Production à partir de l'énergie nucléaire 33

1.1.4.3. Production par voie biologique 33

1.2. L'Hydrogène dans l'industrie du verre..... 33

1.2.1. Présentation de l'organisme d'accueil MFG 33

1.2.1.1. Historique de MFG 33

1.2.1.2. Synthèse de la gamme de production de MFG 34

1.2.2. La production du verre flotté "Float glass" 34

1.2.2.1. Principe fondamental 34

1.2.2.2. Processus de production du verre flotté MFG..... 35

1.2.3. Oxydation du bain d'étain et conséquences 38

1.2.3.1. Section chaude du bain (~1100°C) 38

1.2.6. Optimisation 44

1.2.6.1. Qu'est-ce que l'optimisation 44

1.2.6.2. Importance et Objectifs de l'Optimisation 44

1.2.6.3. Méthodes d'Optimisation Applicables à l'Electrolyse Alcaline 47

c. Essaim Particulaire (Particle Swarm Optimization – PSO) 49

1.2.6.4. Paramètres d'optimisation d'une électrolyse alcaline 52

1.2.7. Revue de la littérature sur la modélisation et l'optimisation de la production d'Hydrogène
par électrolyse Alcaline..... 55

1.2.7.1. Travaux..... 55

1.2.7.2. Synthèse comparative et leçons tirées de la littérature 57

Conclusion..... 58

2. Chapitre 02 : Etude de la production d'Hydrogène MFG : Modélisation et Validation..... 60

Introduction 60

2.1.	<i>Description de l'unité de production d'Hydrogène MFG</i>	60
2.1.1.	Procédé.....	60
2.1.2.	Schéma technologique de l'unité.....	61
2.1.2.1.	Etape de production de l'Hydrogène	62
2.1.2.2.	Description Détaillée de Chaque Bloc du Schéma	66
2.1.3.	Vannes et Instrumentation — Rôles et Fonctionnement.....	69
2.1.4.	Système de Refroidissement	72
2.1.5.	Résultats du Procédé — Bilan de Production	74
2.2.	<i>Modélisation du procédé sous Aspen HYSYS</i>	76
2.2.1.	Définition du périmètre de Simulation	76
2.2.1.1.	Frontière du système modélisée.....	76
2.2.1.2.	Hypothèse de modélisation.....	77
2.2.1.3.	Choix du modèle thermodynamique	78
2.2.2.	Construction de Flowsheet	79
2.2.2.1.	Section de traitement de l'eau.....	79
2.2.2.2.	Électrolyse Float 1 — Système Suqing SQ.....	80
2.2.2.3.	Électrolyse Float 2 — Système HySTAT	85
2.2.2.4.	Section des gaz produits	89
2.2.3.	Bilans de matières et d'énergies	90
2.3.	<i>Validation du modèle</i>	91
2.3.1.	Protocole de validation.....	92
a.	Méthodologie de validation	92
b.	Critères d'acceptabilité retenus	92
c.	Points de comparaison sélectionnés.....	93
2.3.2.	Comparaison simulation vs données réelles	93
	Conclusion.....	95
3.	Chapitre 03 : Optimisation du procédé de production d'Hydrogène.....	97
	Introduction	97
3.1.	<i>Cadre de l'Optimisation : Données de référence du chapitre 2</i>	97
3.1.1.	Paramètres nominaux de référence issus de la simulation HYSYS validée	97
3.1.2.	Variables d'optimisation et domaines de variation.....	99
3.1.3.	Fonctions objectives : Équations et calculs basés sur les données Chapitre 2.....	99
a.	Maximisation du débit d'hydrogène Q_{H_2}	99
b.	Maximisation de la pureté P_{H_2}	100
c.	Minimisation de la consommation spécifique d'énergie CSE	100
d.	Maximisation de l'efficacité énergétique η	100
3.2.	<i>Analyse de Sensibilité Paramétrique : Float 1 et Float 2</i>	101
3.2.1.	Protocole HYSYS : Configuration du Data Case Study	101
3.2.2.	Effet de la Température du service	101
3.2.3.	Effet de la Pression de l'électrolyse	107
3.2.4.	Effet du Débit d'Eau d'Alimentation	113
3.2.5.	Effet du Débit de l'Électrolyte KOH.....	118
3.3.	<i>Synthèse globale de l'analyse de sensibilité globale</i>	125
3.3.1.	Tableau récapitulatif des valeurs nominales et extrêmes.....	125
3.3.2.	Classement des Variables par Importance : Float 1 et Float 2	126
3.3.3.	Analyse des Conflits entre Objectifs	127
3.3.4.	Zones de Fonctionnement Identifiées par Paramètre	127
3.3.5.	Conclusion synthèse OAT :	128
3.4.	<i>Plan d'expérience Box-Behnken BBD : Méthode et application</i>	129
3.4.1.	Principe Général de la Méthode RSM et du Plan Box-Behnken.....	129
3.4.1.1.	Limites de l'Analyse et Nécessité du BBD	129
3.4.1.2.	Principe mathématique et méthodologie d'estimation des coefficients β	129

3.3.4.3.	Structure Géométrique du Plan Box-Behnken.....	130
3.4.2.	Codage des Variables	131
3.4.3.	Matrice des Simulations et Résultats HYSYS.....	132
3.4.4.	Modèles de surface de réponses (RSM) : Equations calibrées.....	135
3.5.	<i>Optimisation Multi-Objectifs — Algorithme NSGA-II</i>	138
3.5.1.	Formulation du problème d'optimisation	138
3.5.2.	Détermination du vecteur de poids par la méthode AHP	139
3.5.3.	Démarche NSGA-II : Description étape par étape	141
3.5.4.	Sélection de la solution optimale par TOPSIS	141
3.5.5.	Synthèse des résultats d'optimisation NSGA- II + TOPSIS	142
Conclusion.....		146
Conclusion générale		149
Référence Bibliographique		151

confidentiel