

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



UNIVERSITÉ SALAH BOUBNIDER, CONSTANTINE 03
FACULTÉ DE GÉNIE DES PROCÉDÉS
DÉPARTEMENT DE GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT

N° d'ordre :... ..

Série :... ..

Mémoire

PRÉSENTÉ POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
EN GÉNIE DES PROCÉDÉS
OPTION : GÉNIE DES PROCÉDÉS DE L'ENVIRONNEMENT

Optimisation de la digestion anaérobie par plan d'expérience

Présenté par :

Sedrati ikhlass

Bougriou Malak

Benoudina Ahmed Zakaria

Dirigé par :

Dr Kheireddine Bani

Grade

Année universitaire
2024-2025
Session : Juin

Table des matières

Introduction générale.....	14
Chapitre I : déchets urbains.....	18
I.1 Introduction.....	18
I.2 Définition de déchets urbains.....	18
I.3 Composition et propriétés des déchets.....	19
I.4 Les Déchets Industriels	20
I.4.1 Les Déchets Industriels banals (DIB)	20
I.4.2 Les Déchets Industriels Spéciaux (DIS)	21
I.5 Source et Composition des Déchets Industriels.....	21
I.6 Les déchets municipaux et leur composition	22
I.6.1 Les déchets solides municipaux (DSM)	22
I.6.2 Les déchets liquides urbains	22
I.7 La Gestion des déchets.....	23
Chapitre II : la digestion anaérobie.....	26
II.1 Introduction	26
II.2 Définition de la digestion anaérobie	26
II.3 Type de substrats.....	27
II.4 Composition et valorisation de biogaz	28
II.4.1 Composition de biogaz	28
II.4.2 Valorisation énergétique de biogaz	28
II.4.3 Valorisation thermique.....	29
II.4.4 Valorisation électrique	29
II.5 Importance de La digestion anaérobie	30
II.5.1 Importance environnementale	30
II.5.2 Importance industrielle	30
II.6 Principe de la digestion anaérobie	30
II.7 Étapes du processus de digestion anaérobie	31
II.7.1 Hydrolyse.....	31
II.7.2 Acidogenèse.....	31
II.7.3 Acétogenèse	32
II.7.4 Méthanogenèse	34
II.8 Facteurs Influent sur la Digestion Anaérobie.....	35
II.8.1 Température	35

II.8.2 PH et Alcalinité.....	36
II.8.3 Agitation/mélange	37
II.8.4 Charge organique volumétrique	37
II.8.5 C/N (rapport carbone/azote)	37
II.8.6 Inhibiteurs et toxiques	37
II.9 Les Avantages et Les inconvénients de la Digestion Anaérobie.....	38
II.9.1 Les Avantages	38
II.9.2 Les inconvénients	39
Chapitre III : Plans d'Expériences.....	41
III.1 Introduction	41
III.2 Principes Fondamentaux des Plans d'Expériences	41
III.2.1 Facteurs, niveaux et réponses :.....	41
III.2.2 Niveaux	41
III.2.3 Réponses :	42
III.2.4 Effets :	42
III.2.5 Types de plans d'expérience :.....	42
III.3 Avantages de l'utilisation des Plans d'Expériences en Génie de l'Environnement : ...	43
III.4 Outil Design Expert.....	43
III.5 Principe de la méthodologie de surface de réponse (MSR)	44
III.5.1 Avantages et limites de la méthode MSR.....	44
III.5.2 Applications de la RSM dans la digestion anaérobie	45
Chapitre IV : Matériels et méthode.....	49
IV.1 Introduction	49
IV.2 Matériels utilisés.....	49
IV.2.1 Appareillage.....	49
IV.2.2 Produits chimiques et réactifs utilisés	50
IV.3 Description des échantillons.....	50
IV.3.1 Adaptation de l'inoculum	51
IV.4 Substrat	51
IV.5 Régime de température.....	51
IV.6 Principe de mesure du Potentiel méthanogène (BMP)	52
IV.7 Préparation d'expérience	53
IV.8 La mesure de volume du biogaz	54
IV.9 Méthodes analytiques de calcul des paramètres	56
IV.9.1 Détermination des caractéristiques des substrats et Inoculum	56

IV.9.2 Matières sèches (TS) et Matières volatiles (TVS).....	56
IV.10 Dosage du TA et TAC	57
IV.10.1 Titration de l'alcalinité TA	58
IV.10.2 Titration de l'alcalinité totale (TAC).....	58
IV.11 Détermination de la Demande Chimique en Oxygène	58
IV.11.1 DCO totale	59
IV.11.2 DCO soluble	59
IV.12 Plan d'expériences selon la méthode Box-Behnken avec la RSM :.....	60
Chapitre V : résultats et discussion	63
V.1 Introduction.....	63
V.2 Première Partie Résultats de la digestion anaérobie en phase mésophile.....	63
V.2.1 Caractérisation Substrat et Inoculum	63
V.2.2 Résultat de la phase gazeuse de la digestion anaérobie après incubation :.....	64
V.2.3 Valorisation de DCO _s :.....	70
V.3 Deuxième Partie : Optimisation des paramètres opératoires de la digestion anaérobie pour la valorisation énergétique de déchets de tomate via un plan Box-Behnken.....	71
V.3.1 Analyse du modèle statistique.....	72
V.3.2 Analyse des courbes d'isoréponse, des surfaces de réponse en 3D et des graphes de perturbation	75
V.3.3 Les graphes de perturbation	78
V.3.4 Optimisation de procédé :	79
V.3.5 Conclusion :	81
V.4 Résultats de la phase liquide après incubation.....	81
Conclusion générale	82

Résumé :

Dans un contexte de transition énergétique et de gestion durable des déchets, cette étude vise à optimiser le processus de digestion anaérobie des résidus de tomates, un substrat organique abondant et biodégradable. L'approche méthodologique adoptée repose sur un plan d'expérience de type Box-Behnken combiné à un modèle d'interaction à deux facteurs (2FI), permettant d'évaluer de manière rigoureuse l'effet de trois variables clés : le pH (6 / 7 / 8), le taux de dilution (0 / 25% / 50%) et le ratio de matière organique volatile (TVS) (0.16 / 0.33 / 0.5).

Les résultats expérimentaux ont mis en évidence une influence significative de ces paramètres sur la production de biogaz. Les meilleures performances ont été obtenues avec un pH de 6, un taux de dilution de 25% et un ratio TVS de 0.33. L'analyse statistique (ANOVA) a confirmé la validité du modèle proposé et la présence d'interactions notables entre les facteurs étudiés.

Ce travail permet ainsi de mieux comprendre les conditions optimales de fonctionnement du procédé, et propose un outil de prédiction fiable pour les applications futures. Il contribue aux efforts de valorisation énergétique des biodéchets dans une perspective d'économie circulaire.

Mots clés : Digestion anaérobie, Biogaz, Plan d'expériences (DoE), Ratio substrat/inoculum, Méthane (CH₄).

ملخص:

في سياق التحول في مجال الطاقة والإدارة المستدامة للنفايات، تهدف هذه الدراسة إلى تحسين عملية الهضم اللاهوائي لمخلفات الطماطم، وهي ركيزة عضوية وفيرة وقابلة للتحلل الحيوي. وقد اعتمدت منهجية علمية قائمة على تصميم تجريبي لـ Box-Behnken، مقترناً بنموذج تفاعل ثنائي العوامل (2FI)، لتقييم تأثير ثلاث متغيرات رئيسية بدقة: الرقم الهيدروجيني (6، 7، 8)، ومعدل التخفيف (0، 0.25، 0.5)، ونسبة المواد الصلبة المتطايرة (TVS) (0.16، 0.33، 0.5). وقد أظهرت النتائج التجريبية أن هذه المعلمات تؤثر بشكل كبير على إنتاج الغاز الحيوي. وقد لوحظ أفضل أداء عند الرقم الهيدروجيني 6، ومعدل التخفيف 0.25، ونسبة المواد الصلبة المتطايرة 0.33. وقد أكد التحليل الإحصائي (ANOVA) صحة النموذج المقترح، وأبرز التفاعلات ذات المغزى بين العوامل المدروسة. يوفر هذا العمل فهماً أفضل للظروف التشغيلية المثلى للهضم اللاهوائي، كما يوفر أداة تنبؤ موثوقة للتطبيقات المستقبلية. وتمثل الدراسة مساهمة قيمة في الاستعادة النشطة للنفايات العضوية، ودعم أهداف الاقتصاد الدائري والتنمية المستدامة.

الكلمات المفتاحية: الهضم اللاهوائي، الغاز الحيوي، تصميم التجارب، نسبة الركيزة/اللقاح، الميثان (CH₄)

Abstract:

In the context of energy transition and sustainable waste management, this study aims to optimize the anaerobic digestion process of tomato residues, an abundant and biodegradable organic substrate. A scientific methodology based on a Box-Behnken experimental design combined with a two-factor interaction model (2FI) was adopted to rigorously assess the effect of three key variables: pH (6, 7, 8), dilution rate (0 / 25% / 50%), and volatile solids (TVS) ratio (0.16 / 0.33 / 0.5). Experimental results revealed that these parameters significantly influence biogas production. The best performance was observed at pH 6, a dilution rate of 25%, and a TVS ratio of 0.33. Statistical analysis (ANOVA) confirmed the validity of the proposed model and highlighted meaningful interactions between the studied factors. This work provides a better understanding of the optimal operational conditions for anaerobic digestion and offers a reliable predictive tool for future applications. The study represents a valuable contribution to the energetic recovery of organic waste, supporting the goals of circular economy and sustainable development.

Keywords: Anaerobic digestion, Biogas, Design of experiments (DoE), Substrate/inoculum ratio, Methane (CH₄).