

**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**

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

# **Évaluation des Solvants Eutectiques Profonds dans l'Extraction liquide-liquide: Approche Paramétrique et Comparative**

**Présenté par :**

**CHEBOUBA Kaouther**

**REDJEM Ghoufrane**

**Dirigé par :**

**Dr. AIDAOUI Ahleme**

**MCB**

**Année universitaire**  
**2024-2025**

## Résumé

La dégradation continue de l'environnement, due à la présence croissante de polluants organiques et inorganiques, a suscité un intérêt grandissant pour le développement de solutions d'épuration respectueuses de l'environnement et de la santé humaine. Dans ce contexte, les solvants eutectiques profonds (SEP) se présentent comme une alternative verte prometteuse aux solvants organiques traditionnels, grâce à leur faible toxicité, leur biodégradabilité, leur facilité de préparation et leur caractère modulable en fonction des propriétés des composés à extraire.

Le présent travail a porté sur l'évaluation de deux systèmes SEP, à savoir menthol-thymol et menthol-acide dodécanoïque, dans le cadre de l'extraction liquide-liquide de deux polluants modèles : l'acide formique (polluant organique) et l'ion cuivre (II) (polluant inorganique). Les expériences réalisées ont permis d'atteindre des rendements d'extraction significatifs, pouvant atteindre jusqu'à 95 % pour l'acide formique et 80 % pour le cuivre, selon les conditions opératoires appliquées. Ces performances sont étroitement liées aux caractéristiques physico-chimiques des solvants étudiés, notamment leur polarité, leur viscosité et leur capacité à établir des interactions spécifiques avec les espèces ciblées.

Les résultats obtenus confirment le potentiel des SEP comme agents d'extraction efficaces, durables et adaptables, offrant une solution innovante pour le traitement des effluents pollués. Par ailleurs, cette étude ouvre des perspectives intéressantes en matière d'optimisation de la stabilité des solvants, de développement de cycles de réutilisation, ainsi que de leur intégration dans des procédés de remédiation hybrides à l'échelle pilote ou industrielle.

### Les mots clés :

Solvants eutectiques profonds, Extraction liquide-liquide, Polluants organiques et inorganiques, Menthol-thymol, Acide formique, Sulfate de Cuivre (II) penta hydraté

## **Abstract**

The continuous degradation of the environment caused by the increasing presence of organic and inorganic pollutants has led to growing interest in developing environmentally friendly and health-conscious remediation solutions. In this context, deep eutectic solvents (DES) have emerged as a promising green alternative to conventional organic solvents, due to their low toxicity, biodegradability, ease of preparation, and tunable properties depending on the nature of the target compounds.

This work focused on the evaluation of two DES systems — menthol–thymol and menthol–dodecanoic acid — for the liquid–liquid extraction of two model pollutants: formic acid (an organic pollutant) and copper (II) ions (an inorganic pollutant). The experimental results showed significant extraction efficiencies, reaching up to 95% for formic acid and 80% for copper, depending on the operating conditions. These performances are closely related to the physicochemical properties of the solvents, including polarity, viscosity, and their ability to interact with the target species.

The results confirm the potential of DES as efficient, sustainable, and adaptable extractants for the treatment of polluted effluents. Moreover, this study opens up promising perspectives for improving the stability of these solvents, developing reuse cycles, and integrating them into hybrid remediation technologies at pilot or industrial scales.

### **Key Words:**

Deep eutectic solvents, Liquid-liquid extraction, Organic and inorganic pollutants, Menthol-thymol, Formic acid, Copper (II) sulfate pentahydrate.

## الملخص

يُعزى التدهور المستمر للبيئة إلى التزايد الملحوظ في تواجد الملوثات العضوية وغير العضوية، مما أدى إلى اهتمام متزايد بتطوير حلول معالجة تراعي الجوانب البيئية والصحية. وفي هذا السياق، تُعدّ المذيبات الأيونكتية العميقة (SEP) بديلاً أخضر واعدًا للمذيبات العضوية التقليدية، نظرًا لانخفاض سُميتها، وقابليتها للتحلل الحيوي، وسهولة تحضيرها، إضافةً إلى إمكانية تعديل خصائصها لتناسب مع طبيعة المركّبات المراد استخلاصها.

ركز هذا العمل على تقييم نظامين من المذيبات الأيونكتية العميقة (SEP)، وهما: منثول-ثيمول ومنثول-حمض الدوديكانويك، وذلك في إطار عملية الاستخلاص السائل-السائل لمُلوّثين نموذجيين، هما: حمض الفورميك (ملوّث عضوي) وأيون النحاس الثنائي ( $\text{Cu}^{2+}$  ملوّث غير عضوي). وقد مكّنت التجارب المنجزة من تحقيق مردودات استخلاص معتبرة، بلغت ما يصل إلى 95 % بالنسبة لحمض الفورميك و 80 % بالنسبة للنحاس، حسب الشروط التشغيلية المعتمدة. وترتبط هذه الأداءات ارتباطاً وثيقاً بالخصائص الفيزيائية والكيميائية للمذيبات المدروسة، لاسيما من حيث القطبية، واللزوجة، وقدرتها على إقامة تفاعلات نوعية مع الأنواع المستهدفة.

تؤكد النتائج المتحصل عليها على الإمكانيات الكبيرة للمذيبات الأيونكتية العميقة (SEP) كعوامل استخلاص فعالة، مستدامة وقابلة للتكيف، مما يجعلها تمثل حلاً مبتكراً لمعالجة المياه الملوثة. علاوة على ذلك، تفتح هذه الدراسة آفاقاً واعدة فيما يتعلق بتحسين استقرار هذه المذيبات، وتطوير دورات لإعادة استخدامها، فضلاً عن دمجها في عمليات معالجة هجينة على المستوى التجريبي أو الصناعي.

## كلمات مفتاحية :

المذيبات الأيونكتية العميقة، الاستخلاص السائل-السائل، الملوثات العضوية وغير العضوية، المينثول-ثيمول، حمض الفورميك، كبريتات النحاس (II) خماسية الماء

## *Liste Des Abréviations*

**ALH** : Accepteur de Liaison Hydrogène

**A.L/ AD** : Acide Laurique (Acide dodécanoïque)

**BTEX**: Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Eylene

**CHCL**: Choline Chloride

**DLH** : Donneur de Liaison Hydrogène

**SEP** : Solvent Eutectic profond

**FDA** : Fédération américain des aliments et drogues

**FTIR** : Spectroscopie Infrarouge à Transformée de Fourier

**GRAS**: Generally Recognized as Safe

**HAP**: Household Air Pollution

**LI** : Liquide Ionique

**MF, UF, NF** : Micro, Ultra, Nano filtration

**NADES**: Natural Deep Eutectic Solvents

**RDES**: Recyclable Deep Eutectic Solvent

**PFAS**: Per- and Polyfluoroalkyl Substances

**PCB**: Polychlorinated Biphenyls

**SEP**: Solvent Eutectic Profond

**SEPN** : Solvants Eutectique Profonds Natural

## *Table des matières*

|                              |      |
|------------------------------|------|
| Liste Des Tableaux.....      | VII  |
| Liste Des Figures.....       | VIII |
| Liste Des Abréviations ..... | XI   |
| Introduction Générale .....  | 1    |

### **CHAPITRE I SOLVANTS EUTECTIQUES PROFONDS : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE**

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| I.1 Définition .....                                       | 4  |
| I.2 Solvant eutectique profond vs Liquide Ionique .....    | 5  |
| I.3. Classification des solvants eutectiques profonds..... | 6  |
| I.3.1. Selon la nature des constituants .....              | 6  |
| I.3.2. Selon l'hydrophobicité .....                        | 8  |
| 1. SEP Hydrophobe.....                                     | 8  |
| 2. SEP Hydrophile.....                                     | 8  |
| I.4. Méthodes de préparation des SEP.....                  | 9  |
| I.5. Propriétés physico-chimiques des SEPs .....           | 11 |
| I.6. Application des solvants eutectiques profonds .....   | 14 |

### **CHAPITRE II METHODE DE SEPARATION ET SÉLECTION DES POLLUANTS MODÈLES**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| II.1. Extraction Liquide-Liquide .....                                | 20 |
| II.1.1. Principe de la méthode.....                                   | 20 |
| II.1.2. Les paramètres influençant l'extraction liquide-liquide ..... | 21 |
| II.1.3. Facteurs descriptifs de l'extraction liquide-liquide .....    | 21 |
| II.1.4. Méthodes d'extraction liquide-liquide.....                    | 22 |
| II.1.5. Application industrielle de l'extraction liquide-liquide..... | 24 |

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| II.2. Les polluants extraits par les solvants eutectiques profonds (SEP) ..... | 25 |
| II.3. Principe du choix des polluants : .....                                  | 27 |

### **CHAPITRE III MATÉRIELS ET MÉTHODES EXPÉRIMENTALES**

|                                                                       |    |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| III.1. Produits Chimiques utilisés .....                              | 29 |
| III.2. Propriétés physico-chimiques des réactifs .....                | 31 |
| III.3. Matériels utilisés .....                                       | 32 |
| III.4. Mode opératoire .....                                          | 35 |
| III.4.1. Préparation des solvants eutectiques profonds SEP .....      | 35 |
| III.4.2. Construction du diagramme des phases Solide-Liquide : .....  | 36 |
| III.4.3. Procédé d'extraction .....                                   | 38 |
| III.4.4. Etude paramétrique d'extraction .....                        | 39 |
| III.5. Méthodes et techniques d'analyse .....                         | 39 |
| III.5.1. Caractérisation des solvants eutectiques profonds (SEP)..... | 39 |
| a)La spectroscopie FTIR .....                                         | 39 |
| b)Mesure de la viscosité .....                                        | 40 |
| c)Détermination de la densité .....                                   | 40 |
| d)Indice de réfraction .....                                          | 40 |
| III.5.2. Dosage des polluants dans la phase aqueuse .....             | 40 |

### **CHAPITRE IV RÉSULTATS ET DISCUSSIONS**

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.1. Synthèse et caractérisation des Solvants Eutectique Profonds ..... | 43 |
| IV.1.1. Synthèse des SEP .....                                           | 43 |
| IV.1.2. Caractérisation des SEP .....                                    | 43 |
| IV.2. Etude paramétrique de l'extraction liquide-liquide .....           | 46 |
| IV.2.1 L'extraction de cuivre .....                                      | 47 |
| IV.2.2. Extraction de l'Acide Formique.....                              | 52 |
| IV.3. Bilan comparatif des performances des SEP .....                    | 57 |

|                                          |           |
|------------------------------------------|-----------|
| <b>Conclusion Générale .....</b>         | <b>60</b> |
| <b>Références Bibliographiques .....</b> | <b>62</b> |
| <b>Annexe .....</b>                      | <b>70</b> |