



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية
REPUBLICQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
العلمي والبحث العالي التعليم وزارة
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة
ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA
Département Génie des Procédés et Energétique

MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Spécialité : Génie chimique.

Présenté par

Ines BEKHOUCHE
Yousra CHERIET

Intégration de débourbeur pour la récupération d'eau - procédé d'enrichissement du phosphate-

Encadré par

Dr. Imen TOUHAMI
ENSTI Annaba

Membres du jury :

Dr. Riyadh BELAMADI	Président	ENSTI-Annaba
Dr. Nassima MALLEM	Examineur	ENSTI-Annaba

Année 2025

Remerciements

Nous tenons, tout d'abord, à exprimer notre profonde reconnaissance Allah le tout-Puissant, source de force, de patience et d'endurance, qui nous a permis de mener à bien ce travail dans les meilleures conditions.

Nous adressons nos remerciements les plus sincères à Madame Imen TOUHAMI, pour la qualité de son encadrement académique. Sa rigueur, sa disponibilité constante et la justesse de ses orientations ont grandement contribué à l'élaboration de ce mémoire. Son accompagnement méthodique et bienveillant a représenté un véritable appui tout au long de notre démarche.

Nos plus vifs remerciements vont également à Monsieur Bassam AMARA, notre encadrant en entreprise, pour son accueil, son accompagnement technique et la richesse de ses conseils. Grâce à son expertise et à sa pédagogie, nous avons pu évoluer dans un cadre professionnel stimulant, propice à l'apprentissage et à l'approfondissement de nos compétences.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à la direction du complexe industriel SAMIFOS, pour nous avoir accordé l'opportunité d'effectuer notre stage au sein de leurs structures. L'environnement de travail mis à notre disposition, ainsi que la confiance témoignée, ont fortement contribué à la réussite de ce projet.

Nous remercions tout particulièrement l'ensemble de l'équipe du laboratoire CMDO pour leur encadrement technique, leur disponibilité et leur professionnalisme exemplaire. Leur soutien quotidien et leur implication active ont été essentiels au bon déroulement de notre mission.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à Monsieur Larbi BEKHOUCHE, dont l'intervention a été déterminante dans l'obtention de ce stage. Son engagement et sa bienveillance méritent toute notre considération.

Nos remerciements vont également à l'ensemble du corps enseignant et administratif de l'École Supérieure de Technologie et d'Ingénierie d'Annaba, pour la qualité de l'enseignement reçu tout au long de notre formation, ainsi que pour leur accompagnement tout au long de notre parcours universitaire.

Enfin, nous adressons notre gratitude la plus sincère à nos familles respectives, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants, ainsi qu'à nos camarades et collègues, pour leur esprit de collaboration et les échanges enrichissants partagés durant cette aventure académique et humaine.

Dédicace

À mon père,

Pour sa force tranquille, son exemple de droiture, et ses sacrifices constants. Son silence, souvent chargé de sagesse, m'a appris la valeur du travail et de l'engagement.

À ma mère,

Pour son amour inépuisable, sa tendresse, ses prières discrètes, et sa présence réconfortante à chaque étape. Elle est mon pilier, ma première source de courage et d'inspiration

À mon frère Mohammed Yacine,

Pour sa maturité, ses paroles justes et sa confiance silencieuse, qui m'ont toujours portée vers le meilleur.

À mon frère Adem,

Pour sa joie de vivre, sa spontanéité et l'énergie positive qu'il a su m'apporter au quotidien.

À mon oncle Saber DERBALA,

Pour sa bienveillance, ses mots porteurs de force et son soutien précieux.

À la mémoire de mes deux grands-pères,

Partis trop tôt, mais toujours vivants dans mon cœur. Que ce modeste travail leur rende hommage.

À mes deux grands-mères,

Pour leur amour pur, leur sagesse et leurs mots pleins de douceur, toujours présents dans mes pensées

À toutes mes tantes et à tous mes oncles, à mes cousins et cousines,

Pour leur affection sincère, leurs encouragements constants et leur fierté qui m'a portée.

À mes amis de cœur,

Ceux qui m'ont accompagnée en dehors du cadre universitaire, pour leur présence fidèle, leur bienveillance sincère et leur capacité à rendre chaque étape plus lumineuse.

À la petite fille que j'étais,

À la petite fille que j'étais, courageuse malgré les peurs et les épreuves. Grâce à ta foi en Allah et à ta force intérieure, je suis devenue celle que je suis aujourd'hui.

à ma binôme Yousra, et à tous ceux qui liront ce travail,
en espérant qu'il soit source d'inspiration et d'utilité.

Ines ...

Dédicace

Avant tout, je remercie Dieu qui nous a facilité et permis d'accomplir ce travail.

Cela dit, c'est avec fierté et gratitude que je dédie ce travail :

Premièrement, à moi-même, forte et patiente, qui ne s'est jamais laissée abattre.

Deuxièmement, à mon amie et ma mère, qui m'a toujours soutenue en toutes Circonstances.

Troisièmement, à mon père qui s'est tant sacrifié pour que j'en arrive là, ainsi qu'à ma sœur et à mes frères, mon pilier dans cette vie.

À toute ma famille noble et bienveillante.

À ma binôme Ines

À tous ceux qui ont cru en moi et m'ont aimé sincèrement.

Yousra ...

ملخص

تتناول هذه الأطروحة قضية الحفاظ على الموارد المائية وتهدف إلى التخفيف من الاعتماد الكلي على مياه آبار حوض دارمون الموجود بجبل العنق لأن مشروع الفوسفات المتكامل مرتبط باستهلاك مائي معتبر سواء في مراحل الغسل، الإثراء أو التصنيع. واستجابة لهذا التحدي الإستراتيجي تم دراسة إمكانية حفظ الموارد المائية الصناعية عن طريق احتراق الغازات ي تعتبر بخار الماء الناتج عن احتراق الميثان.

يرتكز العمل على تحليل تقني وديناميكي حراري لعملية تكاثف بخار الماء في مجرى الغازات الساخنة، من خلال استخدام معدات مثل مزيل الطين و المبادلات الحرارية، وأبراج التبريد ; مضخة دوران الماء الساخن و مضخة استرجاع الماء المتكاثف. كما تم إجراء تقييم طاقي وتقييم لمردودية الموارد المائية للنظام المقترح مع مقارنة بين استهلاك الماء قبل وبعد معالجته.

تظهر نتائج الدراسة أن تطبيق هذه التقنية مكنت من استرجاع 67 % من كمية المياه المغذية وهذا ما يعادل 78% من بخار الماء الموجود في الغازات الناتجة عن الاحتراق مما يؤدي إلى تقليل كبير من استهلاك المياه و خفض تكاليف التصنيع والإنتاج مع الحفاظ على جودة و مردودية المنتج الصناعي.

Résumé

Cette étude est focalisée sur la préservation des ressources en eau et vise à réduire la dépendance totale aux eaux des puits de la nappe phréatique de Darmaoun, située au Mont Ain. En effet, le projet intégré de phosphate (PPI) est lié à une consommation d'eau considérable, que ce soit lors des étapes de lavage, d'enrichissement ou de fabrication. En réponse à ce défi stratégique, une étude a été menée sur la possibilité de conserver les ressources en eau industrielles par le biais de la combustion des gaz. La vapeur d'eau résultant de la combustion du méthane (CH_4) et l'humidité présente dans l'air constituent une part importante de la perte totale d'eau dans les processus industriels.

Ce travail repose sur une analyse technique et thermodynamique du processus de condensation de la vapeur d'eau dans le flux des gaz chauds, en utilisant des équipements tels que le débourbeur, les échangeurs de chaleur, les tours de refroidissement, ainsi que des pompes de circulation d'eau chaude et des pompes de récupération de l'eau condensée. Une évaluation énergétique et une évaluation du rendement des ressources en eau du système proposé ont également été réalisées, avec une comparaison entre la consommation d'eau avant et après son traitement.

Les résultats de l'étude montrent que l'application de cette technique a permis de récupérer 67 % de la quantité d'eau d'alimentation, ce qui équivaut à 78 % de la vapeur d'eau présente dans les gaz issus de la combustion. Cela entraîne une réduction significative de la consommation d'eau, une diminution des coûts de fabrication et de production, tout en maintenant la qualité et le rendement du produit industriel .

Abstract

This study addresses the issue of water resource preservation and aims to reduce complete dependence on wells drawing from the Darmaoun groundwater table, located in Mount Ain. Indeed, the integrated phosphate project (PPI) involves substantial water consumption, whether during washing, enrichment, or manufacturing stages. To address this strategic challenge, a study was conducted on the potential for conserving industrial water resources through gas combustion. The water vapor resulting from methane (CH_4) combustion and the humidity present in the air constitute a significant portion of total water loss in industrial processes.

This work is based on a technical and thermodynamic analysis of the water vapor condensation process in hot gas streams, utilizing equipment such as mud separators, heat exchangers, cooling towers, as well as hot water circulation pumps and condensed water recovery pumps. An energy assessment and an evaluation of the proposed system's water resource efficiency were also conducted, comparing water consumption before and after treatment.

The study results demonstrate that implementing this technique enabled the recovery of 67% of the feedwater quantity, equivalent to 78% of the water vapor present in combustion gases. This leads to a significant reduction in water consumption, decreased manufacturing and production costs, while maintaining the quality and yield of the industrial product .

Liste des abréviations

Abréviation	Nom complet
CH ₄	Gaz de méthane
O ₂	Gaz de oxygène
CO ₂	Gaz de dioxyde de carbone
N ₂	Gaz de diazote
H ₂ O	Eau
BEH	Bled El Hadba
DOS	Djebel Onk Sud
DN150	Diamètre nominal de 150 mm
ODD	Objectif de développement durable

Liste des tableaux

Tableau	Titre	Page
Tableau 01	Débourbeur à voie humide	22
Tableau 02	Échangeur thermique	23
Tableau 03	Pompe de circulation de l'eau chauffée	24
Tableau 04	Tour de refroidissement par évaporation	26
Tableau 05	Pompe de récupération de l'eau condensée	27

Liste des figures

Figure	Titre	Page
Figure 01	Débourbeur à voie humide	12
Figure 02	Échangeur thermique	13
Figure 03	Pompe de circulation de l'eau chauffée	13
Figure 04	Tour de refroidissement par évaporation	14
Figure 05	Pompe de récupération de l'eau condensée	14
Figure 06	Diagramme du Système Intégré	16

Sommaire

Remerciements

Dédicaces

ملخص

Résumé

Abstract

Liste des abréviations

Liste des tableaux

Liste des figures

Introduction générale 2

Chapitre 01 : Présentation de l'entreprise de stage et problématique4

I.1. Présentation de l'entreprise SOMIPHOS 5

I.2. Motivation 6

I.3. Problématique 6

Chapitre 02 : État de l'art et recherche bibliographique 7

II.1. Historique des pratiques de conservation de l'eau 8

II.2. Méthodes traditionnelles8

II.3. Évolution vers des pratiques modernes 9

II.4. Avantages environnementaux 9

II.5. Défis et enjeux environnementaux actuels 10

Chapitre 03 : Solutions proposées et expérimentations menées 11

III.1. Système intégré de récupération d'eau avec débourbeur 12

III.2. Performance et efficacité du système17

III.3. Avantages et bénéfices17

III.4. Triple rôle stratégique18

III.5. Impact sur la durabilité industrielle18

III.6. Impact sur l'enrichissement du phosphate 19

Chapitre 04 : Résultats et discussions 22

IV.1. Bilan massique et consommation d'eau 22

IV.2. Réduction des coûts d'exploitation 24

IV.3. Bilan de masse pour une ligne de 1,5 million T/an 25

IV.4. Taux de récupération	27
IV.5. Comparaison internationale	27
Conclusion générale	30
Références	32

Introduction générale

Introduction générale

L'eau est une ressource indispensable à toute forme de vie fait aujourd'hui l'objet d'enjeux majeurs liés à sa disponibilité surtout dans les zones arides et industrialisées ; il constitue un enjeu stratégique majeur pour le développement durable à l'échelle mondiale mais d'autre coté couvrant environ 70 % de la surface terrestre ; l'eau douce accessible ne représente qu'environ 2,5 % de l'eau totale et une part encore plus réduite est directement exploitable pour les besoins domestiques, agricoles et industriels.

Face à la croissance démographique , à l'urbanisation rapide et aux effets du changement climatique la pression sur les ressources hydriques n'a cessé d'augmenter au cours des dernières décennies, rendant la conservation de l'eau plus urgente que jamais.

La conservation de l'eau ne se limite pas à une simple réduction de la consommation, mais s'inscrit dans une logique plus globale de gestion intégrée et durable des ressources naturelles. Cette problématique est directement liée à l'Objectif de Développement Durable (ODD) 6 des Nations Unies, qui appelle à garantir l'accès universel à l'eau potable et à l'assainissement, tout en assurant une gestion durable des ressources. La conservation de l'eau contribue également à plusieurs autres ODD, comme la lutte contre la faim (ODD 2), la santé (ODD 3), la durabilité urbaine (ODD 11), l'action climatique (ODD 13) et la protection des écosystèmes terrestres (ODD 15) , elle constitue donc un levier fondamental pour atteindre un développement durable et équitable à l'échelle mondiale.

Sachant que l'enrichissement du phosphate par voie humide constitue une méthode industrielle largement utilisée pour valoriser les minerais phosphatés, notamment en vue d'obtenir un concentré riche en pentoxyde de phosphore (P_2O_5) répondant aux exigences du marché. Cependant, cette technique est particulièrement gourmande en eau, ce qui pose un défi majeur dans les régions arides ou semi-arides où se trouvent la plupart des gisements phosphatés, comme c'est le cas du site de Bled El Hadba (BEH) en Algérie. Les essais d'enrichissement réalisés sur ce gisement ont mis en évidence les avantages de la voie humide pour produire un concentré conforme aux spécifications requises (≥ 30 % de P_2O_5 et $\leq 0,8$ % de MgO).

Malheureusement la mise en œuvre d'un système de traitement par voie humide est limitée par la disponibilité de l'eau dans la région. À l'heure actuelle, l'usine de traitement du site de Djebel Onk Sud (DOS) est alimentée à un débit maximal de 3 750 m³/jour pompée dans les puits du bassin de Darmoun. Cette quantité est la limite disponible pour l'exploitation simultanée de DOS et du gisement de Bled El Hadba (BEH).

Selon SOMIPHOS la consommation actuelle s'élève à 0,7 m³ d'eau par tonne de concentré et pour les nouvelles lignes de traitement (capacité : 1,5 million de tonnes/an chacune), DMT a optimisé le bilan hydrique à 0,28 m³/tonne, alors pour un taux de production cible (2,6 Mt/an à

Introduction

0,3 m³/t) ; les besoins seraient de : 780 000 m³/an

(moyenne journalière : 2 400 m³/j)

Avec un pic instantané à 3000 m³/j (25% de capacité) ; cette pointe absorbe presque la totalité du débit disponible (3 750 m³/j) rendant impossible le traitement du phosphate de BEH.

Cependant deux pistes sont envisagées pour réduire la consommation d'eau à DOS et libérer des ressources pour BEH :

- Condensation et récupération des eaux des gaz de combustion des fours sécheurs ;
- Implantation d'un procédé hybride combinant voies sèche et humide.

Chapitre 01 :

*Description de l'entreprise
du stage, motivation,
problématique*

I.1. Présentation de l'entreprise SOMIPHOS

SOMIPHOS (Société des Mines de Phosphates), filiale du groupe MANAL, est une entreprise minière de premier plan en Algérie. Créée en janvier 2005 suite à la réorganisation de FERPHOS spa, elle est une société par actions à capital public, détenue entièrement par MANAL groupe ; située à Tebessa, à l'est de l'Algérie, SOMIPHOS est la plus grande société minière du pays en termes de capitalisation boursière. Elle se spécialise dans l'exploitation des mines de phosphate et mène divers projets de développement dans le secteur minier.

La vision de SOMIPHOS repose sur des valeurs universelles et s'articule autour de la création de richesses, la rentabilité, la consolidation des performances et l'offre de solutions optimales aux clients et partenaires, elle met un point d'honneur à favoriser une communication fiable entre tous les acteurs impliqués.

Pour concrétiser cette ambition ; l'entreprise adopte une approche fondée sur la gestion par objectifs, ceux-ci sont déclinés à chaque niveau hiérarchique sous forme de «contrats internes», établissant des centres de responsabilités autonomes, dotés d'une marge de manœuvre suffisante pour atteindre les objectifs fixés.

Dans une démarche de développement durable, SOMIPHOS mise sur l'intensification de ses activités en amont et en aval par ASMIDAL et SONATRACH

Cette stratégie découle des spécificités de son secteur marqué par l'incertitude liée à la recherche, l'imprévisibilité des gisements et le coût élevé des ressources non renouvelables.

I.2 .Motivation

Au cours de notre stage chez SOMIPHOS nous avons acquis une précieuse expérience dans la gestion des ressources en eau, ce qui nous a permis de mieux comprendre les difficultés liées à la consommation excessive d'eau dans l'industrie ainsi que l'importance cruciale de développer des solutions durables pour préserver cette ressource vitale.

Nous nous sommes donc concentrées sur la mise en place de solutions innovantes ; telles que la récupération de l'eau à partir des gaz d'échappement une approche qui permet de réduire significativement la dépendance aux eaux souterraines notamment dans les régions arides et semi-arides.

Convaincues de la pertinence de cette démarche, nous avons orienté notre mémoire de master autour de cette problématique, persuadées que cette technique peut non seulement améliorer l'efficacité opérationnelle des procédés industriels, mais aussi contribuer à la préservation de l'environnement, grâce à une gestion responsable et optimisée des ressources en eau naturelles.

I.3.Problématique

Le processus de fabrication de l'acide phosphorique par voie humide, tel que pratiqué par la société Somiphos , est un procédé industriel qui consomme de grandes quantités d'eau. Dans le contexte des défis liés à la rareté de l'eau, cette consommation pose un problème environnemental et économique. Ainsi, nous posons la question suivante :

Comment pouvons-nous réduire la consommation d'eau dans le processus de fabrication de l'acide phosphorique au sein de la société SOMIPHOS tout en maintenant la rentabilité du processus et la qualité du produit final ?

Chapitre 02 :
Etat De l'art et recherche
Bibliographique

II.1. Historique et évolution des pratiques de conservation de l'eau

La gestion et la conservation de l'eau remontent à des millénaires. Dès 3000 av. J.-C., les Mésopotamiens ont mis en place des canaux pour irriguer leurs cultures et stocker l'eau durant les saisons sèches. En Égypte antique (vers 2500 av. J.-C.), le Nil était endigué et ses crues étaient canalisées pour favoriser l'agriculture [1].

Vers 500 av. J.-C., les Perses ont développé les qanats, des galeries souterraines qui acheminaient l'eau des nappes phréatiques vers les zones agricoles. Cette technique s'est propagée jusqu'en Afrique du Nord, en Inde et en Chine. Au Moyen Âge (VIIIe – Xve siècle), les sociétés arabes et berbères du Maghreb ont raffiné ces systèmes avec les khattaras, qui répondaient aux besoins d'eau potable et d'irrigation dans les zones désertiques.

Durant la période préindustrielle (XVIe – XVIIIe siècle), en Europe et en Asie, des réservoirs, puits et terrasses irriguées étaient construits pour stocker et répartir l'eau. L'industrialisation massive (XIXe siècle) a entraîné une augmentation de la consommation d'eau, les premières infrastructures modernes de distribution d'eau et de traitement apparaissent, mais cela a souvent entraîné la dépendance aux réseaux centralisés au détriment des solutions locales.

Depuis les années 1970, face à la crise hydrique mondiale, on assiste à un regain d'intérêt pour les techniques traditionnelles dans les politiques de gestion durable de l'eau [2].

Au XXe siècle, la prise de conscience environnementale a conduit à l'adoption de lois structurantes, comme la loi sur l'eau en 1992 en France, qui a instauré la gestion intégrée par bassin hydrographique et imposé des normes environnementales strictes pour les industries [3].

II.2. Méthodes traditionnelles de conservation de l'eau

II.2.1. Collecte des eaux de pluie

Utilisée depuis l'antiquité, cette méthode permettait de répondre aux besoins en eau des ateliers et manufactures, en particulier dans les régions où l'approvisionnement était limité.

II.2.2. Réutilisation des eaux usées

Certaines industries, comme les tanneries ou les teintureries, pratiquaient la réutilisation des eaux après décantation ou filtration rudimentaire.

II.2.3. Systèmes de canalisations en terre cuite

Employés pour acheminer l'eau vers les zones de production, ces systèmes témoignent d'une gestion pragmatique des ressources hydriques [4]

II.2.4. Le recyclage interne des eaux usées

Recyclage en circuit fermé.

II.2.5. L'optimisation des procédés

Pour réduire les besoins en eau [5].

II.2.6. Les qanats

(Iran, près de 500 av. J.-C.) galeries drainantes pour capter les eaux souterraines [1].

II.3. Évolution vers des pratiques modernes

II.3.1. Traitement des eaux industrielles :

L'essor des stations d'épuration a permis de traiter les effluents avant leur rejet dans l'environnement, réduisant ainsi la pollution.

II.3.2. Recyclage de l'eau

Les industries ont intégré des systèmes de recyclage pour réutiliser l'eau dans leurs processus, diminuant la consommation globale [6].

II.3.3. Utilisation d'eaux non conventionnelles

L'adoption d'eaux usées traitées ou de condensats comme sources alternatives a permis de préserver les ressources en eau potable [7].

Depuis les années 2000, les industries ont intégré des solutions innovantes, telles que la nanotechnologie pour le traitement des eaux, les systèmes automatisés de contrôle de la consommation, ainsi que la récupération énergétique associée au traitement de l'eau [8].

Par ailleurs, la notion "d'eau virtuelle" et "d'empreinte hydrique" est devenue centrale, permettant d'évaluer l'impact réel de l'industrie sur les ressources en eau à l'échelle mondiale [9].

II.4. Avantages environnementaux

II.4.1. Réduction de la consommation d'eau

Moins de prélèvements dans les milieux naturels, préservant ainsi les écosystèmes aquatiques [7].

II.4.2. Diminution des rejets polluants

Le traitement et la réutilisation des eaux usées limitent la contamination des sols et des cours d'eau.

II.4.3. Économie d'énergie

Moins d'eau à pomper et à traiter signifie une réduction de la consommation énergétique et des émissions de gaz à effet de serre [10].

II.4.4. Diminution des rejets polluants

Le traitement et la réutilisation des eaux usées limitent la contamination des sols et des cours d'eau.

II.4.5. Économie d'énergie :

Moins d'eau à pomper et à traiter signifie une réduction de la consommation énergétique et des

émissions de gaz à effet de serre [10].

II .5. Défis et enjeux environnementaux actuels

- L'augmentation constante de la demande industrielle en eau.
- La pollution industrielle difficile à traiter.
- Les impacts du changement climatique sur la disponibilité des ressources [11].
- Coûts d'investissement : La mise en place de technologies de traitement et de recyclage peut représenter un investissement conséquent pour certaines industries.
- Contraintes réglementaires : Les normes en matière de qualité de l'eau et de rejets peuvent varier, compliquant la mise en œuvre de solutions uniformes [7].

Chapitre 03 :
Solutions proposées et
expérimentations menées

III.1. Système Intégré de Récupération d'Eau avec Débourbeur - Procédé d'Enrichissement du Phosphate

Le système de récupération d'eau avec débourbeur constitue une solution technologique innovante pour le traitement des gaz de combustion issus du séchage du phosphate. Cette approche s'inscrit dans une démarche d'économie circulaire et de développement durable industriel, transformant les contraintes environnementales en opportunités d'innovation.

III.1.1. Composants Techniques du Système Intégré

III.1.1.1. Débourbeur à Voie Humide - Cœur du Système

Fonction principale

Chambre de contact principal entre les gaz chauds et l'eau de refroidissement

Performances

- Refroidissement des gaz de 100-150°C à 50-60°C
- Condensation de 60-70% de la vapeur d'eau
- Élimination de 90% des particules en suspension

Conception

- Optimisée pour maximiser la surface d'échange et le temps de contact
- Matériaux résistants à la corrosion et aux hautes températures
- Conception modulaire pour faciliter la maintenance



Figure 01 : Débourbeur à voie humide

III.1.1.2. Échangeur Thermique

Objectifs

- Pre-refroidir les gaz avant rejet (40-45°C)
- Récupérer 15-20% d'énergie thermique supplémentaire
- Optimiser le rendement global du système

Avantages

- Amélioration du rendement énergétique global
- Préchauffage de l'eau d'alimentation possible

- Récupération d'énergie thermique valorisable

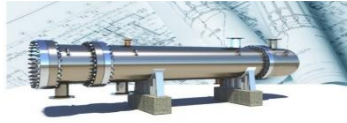


Figure 02 : Échangeur thermique

III.1.1.3. Pompe de Circulation Haute Performance

Spécifications techniques

- Débit réglé : 50-100 m³/h
- Pression de service : 4-6 bars
- Matériau anticorrosion pour résister au milieu acide (pH 4-6)

Fonctions

- Assurer une circulation d'eau a haut débit
- Maximiser le contact thermique dans le débourbeur
- Fonctionnement continu en milieu industriel



Figure 3 : Pompe de circulation

III.1.1.4. Tour de Refroidissement par Évaporation

Capacités

- Capacité de traitement : 30 m³/h
- Abaissement de température : de 60°C à 30°C
- Perte par évaporation limitée : 3-5%

Principe

- Refroidissement par évaporation naturelle
- Economie d'énergie et haute efficacité
- Contrôle automatique de la température de sortie

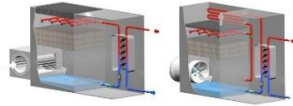


Figure 4 : Tour de refroidissement

III.1.1.5. Réseau Hydraulique Optimisé

Configuration

- Tuyauterie en acier inoxydable DN150
- Vannes de régulation automatiques
- Débit contrôlé par capteurs de pression différentielle
- Conception pour minimiser les pertes de charge (<0,5 bar)

Matériaux

- Résistants à la corrosion
- Adaptés aux variations thermiques
- Instrumentation intégrée (vannes de régulation et capteurs)

III.1.1.6. Pompe de Récupération de l'Eau Condensée

Spécifications

- Débit variable : 5-20 m³/h
- Hauteur manométrique : 20 Mce
- Système de filtration intégré (maille 100 µm)

Mission

- Extraction et transfert de l'eau condensée
- Fonctionnement automatique avec régulation de niveau
- Dimensionnement selon les débits de condensation prévisionnels



Figure 5 : Pompe de récupération de l'eau condensée

III.1.2. Produits du Système Intégré

III.1.2.1. Produit principal de récupération

Le principal produit récupéré est la vapeur d'eau (H_2O , phase gazeuse) → Issue de deux origines :

- Les gaz de combustion Résultant du séchage au four lors du séchage du minerai de phosphate
- La combustion du méthane CH_4
- L'humidité naturelle présente dans l'air
- Condensat d'eau : Obtenu par refroidissement des gaz de combustion dans des échangeurs thermiques ou tours de condensation.

III.1.2.2 Produit secondaire

Nous avons aussi d'autre produit secondaire qui sont :

- CO_2 : Dioxyde de carbone, gaz d'échappement et Gaz à effet de serre
- **Gaz refroidis** : CO_2 , N_2 , O_2 , H_2O (Trace) mélange de gaz résiduels après extraction de la vapeur d'eau

III.1.3. Principe de Fonctionnement Général

III.1.3.1. Processus de Traitement des Gaz

Le système traite les gaz chauds de combustion (composés principalement de vapeur d'eau, CO_2 , N_2 et O_2) selon un processus en plusieurs étapes :

- 1) **Contact thermique** : Les gaz chauds ($100-150^\circ C$) sont mis en contact direct avec une circulation d'eau froide à haut débit
- 2) **Refroidissement rapide** : La température des gaz chute drastiquement à $\sim 50-60^\circ C$ grâce à l'échange thermique
- 3) **Condensation** : 60-70% de la vapeur d'eau se condense sous l'effet du refroidissement
- 4) **Épuration** : 90% des particules fines et résidus sont piégés et éliminés du flux gazeux

III.1.3.2. Cycle de Récupération d'Eau Optimisé

- L'eau condensée suit un circuit fermé optimisé pour maximiser l'efficacité :
- L'eau condensée chaude est collectée et dirigée vers l'échangeur thermique
- Elle est refroidie dans la tour de refroidissement par évaporation (de $60^\circ C$ à $30^\circ C$)

- L'eau refroidie est réinjectée dans le débourbeur via la pompe de circulation
- Une partie est extraite par la pompe de récupération pour être valorisée dans le procédé

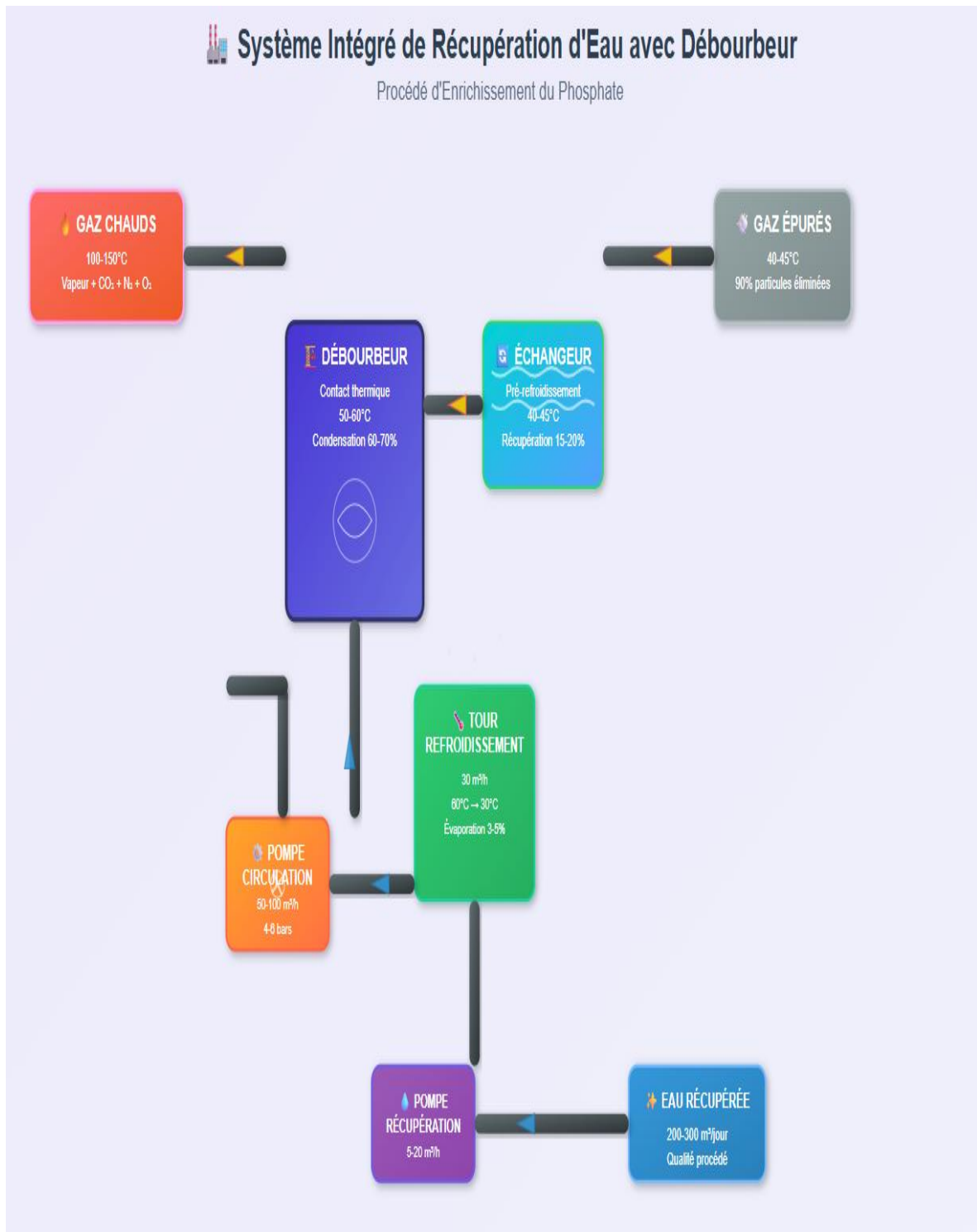


Figure 6 : Diagramme du Système Intégré

III.2. Performance et Efficacité du Système Intégré

III.2.1. Performances Techniques

- **Rendement de condensation** : >70%
- **Consommation énergétique optimisée** : <15 kWh/m³
- **Récupération d'eau** : jusqu'à 80% de l'eau contenue dans les gaz
- **Économies d'eau** : 200-300 m³/j pour une installation moyenne

III.2.2. Fiabilité et Maintenance

- Système robuste adapté aux conditions industrielles sévères
- Maintenance simplifiée par conception modulaire
- Adaptabilité aux variations de charge gazeuse
- Conception facilitant l'entretien et la surveillance

III.3. Avantages et Bénéfices

III.3.1 Performance Environnementale

- **Réduction des émissions** : Gaz épurés rejetés à basse température
- **Économie d'eau neuve** : Diminution significative des prélèvements externes
- **Valorisation des ressources** : Transformation d'un déchet en ressource utile
- **Conformité réglementaire** : Respect des normes environnementales

III.3.2. Efficacité Économique

- **Réduction des coûts d'exploitation** : Diminution des achats d'eau neuve
- **Optimisation énergétique** : Récupération de chaleur
- **Retour sur investissement** : 2-3 ans typiquement
- **Rentabilité** : Économies générées par la valorisation des ressources

III.3.3. Flexibilité Opérationnelle

- Capacité d'adaptation aux variations de charge
- Système modulaire évolutif
- Fonctionnement automatisé
- Intégration facile dans les procédés existants

III.4. Triple Rôle Stratégique

III.4.1. Épuration des Gaz

- Élimination des particules fines et impuretés
- Réduction de la température des rejets gazeux
- Conformité aux exigences environnementales

III.4.2. Récupération Efficace de l'Eau

- Condensation optimisée de la vapeur d'eau
- Qualité d'eau adaptée aux besoins du procédé
- Rendement de récupération élevé

III.4.3. Optimisation des Ressources

- Economie circulaire et recyclage maximal
- Réduction de l'empreinte hydrique
- Sécurisation de l'approvisionnement en eau

III.5. Impact sur la Durabilité Industrielle

III.5.1. Contribution aux Objectifs de Développement Durable (ODD)

Cette technologie illustre parfaitement comment les solutions techniques peuvent servir de levier pour atteindre simultanément plusieurs ODD :

- **ODD 6** : Garantir l'accès à l'eau et à l'assainissement
- **ODD 7** : Garantir l'accès à une énergie propre et abordable
- **ODD 9** : Industrie, innovation et infrastructure
- **ODD 12** : Consommation et production responsables

III.5.2. Modèle Reproductible

Cette approche offre un modèle reproductible pour d'autres industries intensives en eau, démontrant qu'il est possible de :

- Concilier efficacité industrielle et préservation des ressources naturelles
- Allier rentabilité économique et responsabilité environnementale
- Combiner innovation technique et respect des contraintes réglementaires

III.6. Impact du système Ingéré de Récupération d'Eau sur l'Enrichissement du phosphate

- Le système intégré de récupération d'eau avec débourbeur représente une solution innovante et performante qui s'inscrit parfaitement dans les enjeux contemporains de l'industrie minière ; en transformant un sous-produit du procédé (vapeur d'eau Des gaz de combustion) en ressource valorisable, il contribue à l'optimisation globale du procédé d'enrichissement du phosphate tout en réduisant significativement son impact environnemental.
- Cette technologie constitue un exemple concret de l'industrie4.0 appliquée au développement durable, ouvrant la voie vers une industrialisation plus durable et alignée sur l'Agenda 2030 des Nations Unies. La mise en œuvre de telles technologies dans le secteur minier représente une étape cruciale vers une industrie plus efficiente, plus respectueuse de l'environnement et économiquement viable.
- L'innovation industrielle peut ainsi répondre simultanément aux défis économiques, environnementaux et techniques, transformant les contraintes en opportunités et contribuant à un avenir industriel plus durable.

Chapitre 04 :
Résultats et discussions

IV.1. Bilan massique et consommation d'eau dans le procédé d'enrichissement par voie humide

Dans le contexte de l'amélioration de la gestion des ressources en eau et de l'augmentation de l'efficacité des procédés industriels, l'analyse du bilan massique est un outil essentiel pour comprendre le processus de production. Elle vise à comprendre la répartition des matières aux différentes étapes de transformation, à identifier les principales sources de consommation d'eau et à évaluer les pertes en eau. Ces données servent également de référence pour l'élaboration de stratégies efficaces de récupération de l'eau.

IV.1.1. Consommation d'eau globale

Le bilan massique de l'eau et des solides pour une usine d'enrichissement par voie humide ayant une production annuelle de 1,5 million de tonnes conformément à la proposition d'une nouvelle ligne de traitement par voie humide dans l'usine de production de DOS est présenté dans le tableau suivant :

Tableau 01 : Le bilan massique de l'eau et des solides

Matières solides sèches	Tonnes par heure	Eau	Tonnes par heure
Alimentation en tout-venant	270	Alimentation en tout-venant	19
		Eau du procédé en entrée	58.1
Résidus grossiers de 4 mm	20.3	Résidus grossiers de 4 mm	5.8
Résidus grossiers de 1mm	7.5	Résidus grossiers de 1mm	2
Schlamms de 0,08 mm	37.5	Schlamms de 0,08 mm	14.7
		Schlamms de 0,08 mm	12.2
Produit (+1 mm - 0,1 mm)	204.6	Produit (+1 mm - 0,1 mm)	43

Interprétation du tableau

Ce tableau présente le bilan massique des solides (en tonnes par heure) et de l'eau (en tonnes par heure) pour les différentes étapes d'une usine d'enrichissement par voie humide.

- **Alimentation en tout-venant** : 270 tonnes/heure de matières solides sèches et 19 tonnes/heure d'eau ; c'est l'entrée initiale du processus.
- **Eau du procédé en entrée** : 58,1 tonnes/heure d'eau ; c'est l'eau ajoutée pour le traitement.

- **Résidus grossiers de 4 mm** : 20,3 tonnes/heure de solides et 5,8 tonnes/heure d'eau ; ces résidus sont séparés du flux principal. Il contient une quantité modérée d'eau en raison de la taille des particules.
- **Résidus grossiers de 1mm** : 7,5 tonnes/heure de solides et 2 tonnes/heure d'eau ; une autre catégorie de résidus. Il contient ici une grande quantité d'eau car les particules fines retiennent l'eau.
- **Schlamms de 0,08 mm** : 37,5 tonnes/heure de solides et 14,7 tonnes/heure et 12,2 tonnes/heure d'eau ; il semble y avoir deux entrées pour les schlamms indiquant potentiellement différentes sources ou phases de traitement pour cette fraction fine ; c'est les plus fines et les plus difficiles à séparer, elles sont souvent traitées par flottation ou sédimentation.
- **Produit (+1 mm -0,1 mm)** : 204,6 tonnes/heure de solides et 43 tonnes/heure d'eau. ; c'est le produit final de l'enrichissement.

Analyse globale

Ce bilan massique est crucial pour comprendre la distribution des solides et de l'eau à travers le processus de l'usine. Il permet de quantifier les entrées et les sorties, et de déterminer l'efficacité du processus d'enrichissement, en additionnant les sorties de solides (résidus et produit) ; on peut vérifier la conservation de la masse par rapport à l'entrée de tout-venant ; le suivi de l'eau est également essentiel pour évaluer la consommation et les pertes.

IV.1.2. Les quantités de matières solides

D'après le bilan massique des solides, les quantités de matières solides ci-après seront produites annuellement pour les 1,5 millions de tonnes de la ligne de traitement par voie humide

Tableau 02 : les quantités de matières solides .

Matières	Par heure	Par an
Tout venant	290.1	2112582
Résidus grossiers	26.5	202862
Fines	37.9	275080
Produit	206.8	1496429
Rendement	/	70%

Interprétation du tableau

Ce tableau présente les quantités de matières (en tonnes par heure et par an) produites par une ligne de traitement par voie humide.

Matière entrante

- **Tout venant** : 290,1 tonnes/heure, ce qui équivaut à 2 112 582 tonnes/an. C'est la matière première totale traitée.

Matière sortante :

- **Résidus grossiers** : 26,5 tonnes/heure, soit 202 862 tonnes/an.
- **Particules Fines** : 37,9 tonnes/heure, soit 275 080 tonnes/an.
 - (Résidus grossiers + Particules Fines) = 64,4 tonnes/heure, soit 477 942 tonnes/an.
- **Produit** : 206,8 tonnes/heure, soit 1 496 429 tonnes/an. Ce chiffre est très proche des 1,5 millions de tonnes par an mentionnés dans le contexte, confirmant la capacité de la ligne.
- **Rendement** : Non spécifié par heure, mais 70% par an.

Analyse globale

Le bilan massique des solides est directement lié au processus de conservation de l'eau dans les usines d'enrichissement par voie humide. Le tableau indique que 30 % des matières premières sont transformées en déchets, ce qui entraîne une perte importante d'eau. Ce tableau permet d'estimer les besoins annuels en eau. Ainsi, des techniques de récupération d'eau peuvent être planifiées.

IV.2. La consommation d'eau et réduction des coûts d'exploitation pour les différentes alternatives de traitement

Le tableau ci-dessous compare la consommation d'eau des procédés par voie humide, avec et sans récupération d'eau :

Tableau 03 : Comparaison la consommation d'eau par voie humide, avec et sans récupération d' d'eau

Procédés par voie humide	Sans récupération	Avec récupération
Par tonne de tout-venant	0,25	0,09
Par tonne de produit finale	0,32	0,13
Rendement poids	72,8%	72,8 %
Consommation d'eau pour une usine de 1,5 million de tonnes par an (m3/jour)	1400	/
Nombre potentiel d'unités par voie humide de 1,5 million de tonnes	2	5

Interprétation du tableau

Par tonne de tout-venant

- Sans récupération : 0,25 m³ d'eau par tonne de tout-venant.
- Avec récupération : 0,09 m³ d'eau par tonne de tout-venant.

Analyse : La récupération de l'eau réduit considérablement la consommation d'eau par tonne de tout-venant, passant de 0,25 m³ à 0,09 m³, ce qui représente une réduction de 64%

➤ Par tonne de produit

- Sans récupération : 0,32 m³ d'eau par tonne de produit.
- Avec récupération : 0,13 m³ d'eau par tonne de produit.

Analyse : Similaire au tout-venant, la consommation d'eau par tonne de produit est également réduite de manière significative avec la récupération, passant de 0,32 m³ à 0,13 m³, soit une réduction d'environ 59%.

Rendement poids : Le rendement poids reste le même (72,8%) avec ou sans récupération, ce qui indique que le processus de récupération de l'eau n'affecte pas l'efficacité de la production de concentré en termes de masse.

➤ Consommation d'eau pour une usine de 1,5 million de tonnes par an (m³/jour)

- Sans récupération : 1400 m³/jour.
- Avec récupération : Non mentionné directement, mais selon l'analyse il réduit à environ 575 m³ par jour avec le recyclage.

Analyse : Pour une usine de 1,5 million de tonnes par an, la consommation d'eau sans récupération est de 1400 m³/jour. La réduction significative de la consommation d'eau est un avantage majeur de la récupération

➤ Nombre potentiel d'unités par voie humide de 1,5 million de tonnes

- Sans récupération : 2.
- Avec récupération : 5.

Analyse : Ce point est intéressant car il suggère qu'avec la récupération d'eau, il est possible d'avoir plus d'unités de production de 1,5 million de tonnes, probablement en raison d'une meilleure efficacité hydrique permettant d'étendre la capacité de production sans augmenter proportionnellement la consommation d'eau..

IV.3. Bilan de masse pour une ligne de 1,5 million de tonnes par an

Une estimation préliminaire de l'ordre de grandeur du bilan massique et hydrique d'un système de récupération des eaux installé sur une ligne de production de concentré de 200 tonnes par heure a été établie à partir de facteurs de conception techniques génériques (masse et énergie) pour la condensation et l'évaporation de l'eau.

Tableau 04 : Bilan de masse pour une ligne de 1,5 million de tonnes par an

N° de flux	Description	Tonnes d'eau/h	Temp °C
1	Gaz de combustion	49,8	125
2	Recyclage du débourbeur	439,3	55
3	Eau allant du débourbeur au refroidisseur	439,3	55
4	Eau refroidie vers débourbeur	385,5	30
5	Évaporation refroidisseur	7,3	30
6	Gaz rejetés	6,9	45
7	Pertes/dérive	3,6	30
8	Eau de récupération redirigée vers le procédé par voie humide	41,1	

Interprétation du tableau

Ce tableau détaille les flux d'eau (en tonnes d'eau/heure) et les températures (°C) à différents points d'un système de récupération des eaux.

- **Flux 1 : Gaz de combustion**

49,8 tonnes d'eau/heure à 125°C. Ces gaz chauds contiennent une quantité significative de vapeur d'eau à récupérer.

- **Flux 2 : Recyclage du débourbeur**

439,3 tonnes d'eau/heure à 55°C. Cette eau est recyclée dans le débourbeur pour le refroidissement des gaz et la condensation.

- **Flux 3 : Eau allant du débourbeur au refroidisseur**

439,3 tonnes d'eau/heure à 55°C. C'est la même quantité d'eau qui sort du débourbeur et se dirige vers le refroidisseur n'a pas changé.

- **Flux 4 : Eau refroidie vers débourbeur**

385,5 tonnes d'eau/heure à 30°C. Après que l'eau ait été refroidie dans la tour de refroidissement, elle est renvoyée au débourbeur à une température plus basse. La différence entre la quantité entrante et sortante ($439,3 - 385,5 = 53,8$ tonnes/heure) est le total de ce qui a été perdu en raison de l'évaporation et du dérive ou des fuites.

- **Flux 5 : Évaporation refroidisseur**

7,3 tonnes d'eau/heure à 30°C. Cette quantité d'eau est perdue par évaporation dans la tour de refroidissement

- **Flux 6 : Gaz rejetés**

6,9 tonnes d'eau/heure à 45°C. Ce sont les gaz qui sont libérés après le processus de condensation et de refroidissement, contenant encore une petite quantité de vapeur d'eau.

- **Flux 7 : Pertes/dérive**
3,6 tonnes d'eau/heure à 30°C. Ces pertes représentent l'eau perdue par dérivation ou autres inefficacités du système.
- **Flux 8 : Eau de récupération redirigée vers le procédé par voie humide**
41,1 tonnes d'eau/heure. Cette quantité d'eau est l'eau condensée récupérée et réutilisée dans le processus, ce qui réduit la consommation d'eau neuve.

Analyse globale

Ce tableau illustre le principe de conservation de la masse d'eau dans le système. On peut observer comment l'eau est chauffée par les gaz de combustion, puis refroidie et recyclée. La quantité d'eau récupérée (41,1 tonnes/heure) est une donnée clé pour évaluer l'efficacité du système de récupération. La différence entre l'eau allant au refroidisseur (439,3 t/h) et l'eau refroidie qui en sort (385,5 t/h) plus l'évaporation (7,3 t/h) et les pertes (3,6 t/h) montre le bilan hydrique du système de refroidissement

IV.4. Taux de récupération

La récupération globale de l'eau provenant de la quantité totale d'eau alimentant le système est donc entre **(62-67) %**.

Cela équivaut à une récupération nette de **78 %** de la vapeur d'eau des gaz de combustion dans le four sécheur.

IV.5. Comparaison entre les pays

Afin d'évaluer l'efficacité de ce système au niveau international une comparaison a été réalisée entre plusieurs pays utilisant différents systèmes de récupération d'eau, les différences de performance entre l'Algérie, la Tunisie et la Floride ont été mises en évidence ; cette étude permet également d'identifier et d'améliorer les systèmes de récupération d'eau.

Tableau 05 : Comparaison entre notre étude et les pays

Pays	Le procédé	Taux de récupération
Algérie	condensation des gaz de combustion	67%
Tunisie	Floculation par Flomin 905 (0,1 g/L)	66 % → 91 % [12]
Etats-Unis (Floride)	Recyclage moyen via Life Cycle Assessment	58,1 % → 84 % [13]

- En Algérie, environ 41,1 tonnes/heure d'eau ont été récupérées, soit seulement environ

67%.

- En Tunisie, les taux de récupération ont atteint 91 %.
- Aux États-Unis (Floride), des taux de récupération très élevés ont été atteints (95,6 %).
- Les taux de récupération d'eau en Algérie sont faibles par rapport à d'autres pays, mais ils peuvent être considérablement améliorés grâce à :
 - L'amélioration des technologies de récupération .
 - L'adoption de systèmes de recirculation en circuit fermé, comme c'est le cas en Floride.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Le système intégré de récupération d'eau avec débourbeur représente une avancée technologique majeure pour l'industrie minière, en particulier dans le traitement des phosphates. Cette solution ingénieuse transforme radicalement la gestion des ressources hydriques en captant et recyclant jusqu'à 80% de l'eau contenue dans les gaz de combustion, tout en récupérant l'énergie thermique résiduelle. Son fonctionnement optimisé permet de traiter efficacement les gaz à haute température, réduisant leur impact environnemental tout en récupérant des quantités importantes d'eau purifiée directement réutilisable dans le processus industriel.

La force de ce système réside dans sa conception globale qui intègre parfaitement plusieurs composants clés : le débourbeur pour le contact gaz-eau, l'échangeur thermique pour la récupération d'énergie, et le circuit hydraulique fermé garantissant une efficacité maximale. Avec des performances remarquables comme la condensation de 60-70% de la vapeur d'eau et l'élimination de 90% des particules, cette technologie établit de nouveaux standards en matière d'économie circulaire appliquée à l'industrie lourde.

D'un point de vue économique, l'investissement se justifie pleinement avec un retour sur investissement rapide de 2 à 3 ans, grâce aux importantes économies d'eau et d'énergie générées. Sur le plan environnemental, le système répond aux exigences réglementaires les plus strictes tout en réduisant significativement l'empreinte hydrique des opérations minières. Son caractère modulaire et automatisé en fait par ailleurs une solution adaptable à différentes configurations industrielles.

Cette innovation illustre parfaitement comment l'industrie minière peut évoluer vers des modèles plus durables, conciliant productivité et préservation des ressources. Elle démontre qu'il est possible de transformer des contraintes environnementales en opportunités technologiques et économiques. Le système de récupération d'eau avec débourbeur ne se contente pas d'améliorer l'efficacité opérationnelle - il ouvre la voie à une nouvelle génération de procédés industriels où chaque ressource est optimisée, chaque déchet devient une matière première, et chaque innovation contribue à un avenir industriel plus respectueux de l'environnement.

En définitive, cette technologie positionne l'industrie minière comme un acteur clé de la transition écologique, prouvant que performance industrielle et durabilité environnementale peuvent et doivent aller de pair. Elle sert de modèle pour d'autres secteurs industriels intensifs en ressources, montrant la voie vers une économie véritablement circulaire où rien ne se perd, tout se transforme et être valorisée .



Références

Références

1. UNESCO. (2021). Valuing Water : World Water Development Report.
2. FAO. (2020). The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture. Food and Agriculture Organization.
3. Lemoine, B., C Dupont, S. (2020). The impact of the 1992 French water law on industrial water use. *Environmental Policy and Governance*, 30(3), 187-197.
4. Citerpack. (2024). L'histoire fascinante de la collecte d'eau de pluie en France.
5. Kumar, V., C Sharma, R. (2023). Traditional water conservation techniques in heavy industries : Effectiveness and future prospects. *Industrial Water Journal*, 17(1), 34-48
6. StudySmarter. (2024). Recyclage de l'eau : Techniques C Avantages.
7. ReutilisationEau.fr. (2023). Les eaux non conventionnelles dans l'industrie : freins et leviers.
8. Fernandez, L., Rodriguez, M., C Lee, S. (2022). Advances in nanotechnology applications for industrial water treatment. *Environmental Science C Technology*, 56(4), 2120-2133.
9. Singh, A., Patel, D., C Verma, S. (2023). Water footprint assessment in industrial sectors : A critical review. *Journal of Environmental Management*, 325, 116596.
10. FasterCapital. (2024). Conservation et gestion de l'eau.
11. El-Gohary, F., Wang, J., C Al-Dahhan, M. (2021). Water sustainability challenges in industrial processes : A review. *Journal of Cleaner Production*, 290, 125-134.
12. Ettoumi, M., Jouini, M., Neculita, C. M., Bouhlel, S., Coudert, L., Haouech, I., & Benzaazoua, M. (2022). تحسين استرجاع المياه من طمي الفوسفات في منجم مديلة، تونس. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(45), 68965–68975 .
13. Pradel, M., Lippi, M., Daumer, M. L., & Aissani, L. (2020). *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 2054–2070