

Transformer les eaux usées  
en énergie : Vers un avenir  
durable pour les stations d'  
épuration (STEPS) de l'ONAS  
grâce à la valorisation  
énergétique et à une  
gestion efficace des boues



# Transformer les eaux usées en énergie : Vers un avenir durable pour les stations d'épuration (STEPS) de l'ONAS grâce à la valorisation énergétique et à une gestion efficace des boues

Deliverable #5

## AUTHORS

Samir AMMOUS (APEX)

Adel BEN YOUSSEF (FCR)

Mounir DAHMANI (FCR)

Hamza FATNASSI (FCR)

Ichrak KLAI (FCR)

## REVIEWERS

Barbara Gonella (ISPRA)

Ivana Audia (UNEP-CCC)

Daniela Romano (ISPRA)

September 15, 2023

## DISCLAIMER

All rights reserved. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system or transmitted, in any form or by any means, electronic, photocopying, recording or otherwise, for commercial purposes without prior permission of UNOPS. Otherwise, material in this publication may be used, shared, copied, reproduced, printed and/or stored, provided that appropriate acknowledgement is given of UNOPS as the source. In all cases the material may not be altered or otherwise modified without the express permission of UNOPS.

## PREPARED UNDER

The Initiative for Climate Action Transparency (ICAT), supported by Austria, Canada, Germany, Italy, the Children's Investment Fund Foundation and the ClimateWorks Foundation.

Supported by:



on the basis of a decision  
by the German Bundestag



 Federal Ministry  
Republic of Austria  
Climate Action, Environment,  
Energy, Mobility,  
Innovation and Technology

The ICAT project is managed by the United Nations Office for Project Services (UNOPS).



# Table of Contents

Introduction	2
1. Contexte et bilan énergétique de l'onas	2
2. Une revue documentaire sur les technologies de valorisation énergétique des déchets pour le traitement des eaux usées	6
3. Valorisation énergétique des eaux usées en Tunisie : options et applicabilité	24
4. Analyse de faisabilité pour la mise en œuvre des options en Tunisie	37
Conclusion	39
Références bibliographiques	41

# Introduction

Ce rapport a pour objet d'évaluer le potentiel énergétique du secteur des eaux usées en Tunisie, ainsi que les mesures d'atténuation envisageables afin d'optimiser sa rentabilité et son impact positif sur la politique climatique nationale. En raison de la raréfaction croissante des ressources hydriques et du potentiel d'adaptation au changement climatique qu'il offre, le secteur des eaux usées s'affirme comme un pilier central dans la lutte contre le réchauffement climatique en Tunisie, notamment en matière de d'utilisation de l'eau à des fins agricoles.

La stratégie « Eau 2050 » en Tunisie indique que le traitement des eaux usées du Grand Tunis pourrait, d'ici 2050, offrir une capacité comparable à celle de deux barrages. Ces ressources pourraient ensuite être acheminées vers les gouvernorats de Zaghuan et El Fahs pour stimuler l'agriculture locale. À plus large échelle, l'assainissement des eaux usées s'impose comme un enjeu majeur pour le développement de l'agriculture péri-urbaine, garante de la sécurité alimentaire du pays.

Cependant, le potentiel énergétique du secteur de l'assainissement est souvent négligé. Les avancées technologiques actuelles suggèrent pourtant que ce secteur pourrait devenir un acteur majeur dans la production d'électricité. Ces alternatives, via l'exploitation des eaux usées, restent absentes de la Contribution Déterminée au niveau National (CDN) actuelle de la Tunisie.

À titre illustratif, la ville de Copenhague alimente l'ensemble de son réseau de transport public grâce à l'électricité produite à partir des gaz issus du traitement des eaux. De nombreuses autres métropoles et nations voient également dans le traitement des eaux usées un levier pour la production de gaz naturel. Avec la maturation des technologies, leur application en Tunisie devient de plus en plus pertinente.

L'ambition de ce rapport est de dresser un état des lieux de la situation énergétique du secteur des eaux usées, mettant en lumière son profil énergétique. Si le traitement des eaux usées est intrinsèquement gourmand en énergie, il génère également des sous-produits potentiellement valorisables pour la production d'électricité. Ainsi, l'exploitation énergétique des déchets issus du traitement de l'eau est une perspective de plus en plus alléchante pour la Tunisie.

Ce rapport se décline en quatre sections principales. La première décrit le contexte tunisien et le bilan énergétique de l'Office National de l'Assainissement (ONAS). La seconde section est consacrée à un tour d'horizon des technologies existantes liées à la production d'énergie dans le secteur de l'assainissement. La troisième aborde les solutions et technologies que la Tunisie pourrait adopter pour valoriser énergétiquement ses eaux usées. Enfin, la quatrième section s'attarde sur les aspects techniques et financiers relatifs à l'implémentation de ces solutions.

## 1. CONTEXTE ET BILAN ÉNERGÉTIQUE DE L'ONAS

### 1.1. L'ONAS : mandat, responsabilités et portée

Créé par la loi n° 73/74 du 3 août 1974, l'ONAS est un établissement public à caractère industriel et commercial. Son rôle en tant qu'acteur majeur dans la préservation de l'environnement hydrique tunisien a été consolidé par la loi 41/93 du 19 avril 1993. Sa mission principale consiste à protéger l'environnement à travers une gestion optimale des eaux usées, des eaux pluviales et des boues d'épuration. Il est également un acteur incontournable dans la chaîne de traitement de l'eau en Tunisie,

couvrant la collecte, le traitement et la valorisation des eaux usées.

À l'heure actuelle, l'ONAS gère 125 stations d'épuration (STEPs) à travers le territoire tunisien, comprenant 116 STEP urbaines, 8 STEP rurales et une STEP destinée à l'industrie. Ces infrastructures, d'une capacité globale de traitement s'élevant à 289 millions de m<sup>3</sup>/an, s'avèrent cruciales pour assurer un traitement adéquat des eaux usées avant leur rejet. L'office, cependant, ne se contente pas de purifier l'eau. Il gère également les boues générées durant ce processus, dont la production annuelle atteint 187 millions m<sup>3</sup>.

L'ONAS est mandaté pour concevoir, réaliser, opérer, et maintenir les systèmes d'assainissement publics. Son action vise non seulement la protection environnementale et la préservation des ressources en eau, mais aussi la sauvegarde de la santé publique. Au-delà de la gestion opérationnelle, elle est également responsable de la régulation et supervision du secteur, établissant des normes et veillant à leur respect tout en encourageant l'adoption de technologies innovantes et durables.

Conscient des enjeux actuels liés à l'énergie et à l'environnement, l'ONAS élargit son champ d'action en explorant des voies pour convertir les eaux usées en sources d'énergie renouvelable, alignant ainsi ses initiatives avec les objectifs globaux de durabilité.

## 1.2. Les défis énergétiques dans la valorisation des eaux usées en Tunisie

La Tunisie, à l'instar de nombreux pays, est aux prises avec la complexité de traiter ses eaux usées tout en maîtrisant sa consommation énergétique. Le secteur des eaux usées recèle un potentiel considérable pour la valorisation énergétique, transcendant la simple gestion des boues d'épuration.

Contrairement aux perceptions courantes, les eaux usées, loin d'être de simples agents polluants, sont des réservoirs de ressources exploitables, comprenant des matières organiques, des nutriments et une énergie thermique latente

Comme le souligne la section 2, diverses méthodes peuvent être employées pour récupérer l'énergie des eaux usées, incluant les processus biologiques, thermiques et physico-chimiques. L'adoption de ces méthodes pourrait révolutionner les stations d'épuration, les métamorphosant en centres énergétiques.

Face aux défis énergétiques actuels, couplés aux impératifs environnementaux, une stratégie holistique pour la gestion des eaux usées s'impose en Tunisie. Ces eaux ne doivent plus être perçues uniquement comme des déchets, mais plutôt comme une ressource stratégique contribuant à la sécurité énergétique du pays.

## 1.3. Bilan énergétique de l'ONAS

### 1.3.1. Consommation d'énergie

Le paysage énergétique de l'ONAS a subi des évolutions majeures ces dernières années, en raison de l'expansion continue des infrastructures et de l'effort accru dans le traitement et la valorisation des eaux usées. Une analyse des chiffres montre une tendance à la hausse de la consommation énergétique au fil des ans. En effet, elle est passée de 97,6 Gwh/an en 2017 à 101,9 Gwh/an en 2018, puis à 115,25 Gwh/an en 2019 et 121,79 Gwh/an en 2020. En 2021, la consommation a atteint 126 Gwh/an, ce qui représente une augmentation d'environ 29% par rapport à 2017. Cette hausse progressive pourrait être attribuée à plusieurs facteurs :

- **Expansion du réseau des stations d'épuration :** La croissance du réseau est indéniable. L'évolution de la capacité de traitement est illustrée par une augmentation du nombre de STEP : 119 en 2017, 122 en 2018 et 2019, 123 en 2020, et 125 en 2021. Cette progression est particulièrement significative si on la compare aux chiffres antérieurs : 5 STEP en 1975 et 109

en 2010. Parmi ces 125 stations, 116 sont urbaines, 8 rurales et 1 industriel. Le secteur a enregistré un taux de croissance de 5% sur cette période. Chaque ajout ou expansion d'une STEP implique une consommation énergétique supplémentaire.

- **Complexité accrue des procédés** : Les normes de qualité de plus en plus rigoureuses nécessitent des procédés d'épuration plus sophistiqués et, par conséquent, plus énergivores. L'aération, par exemple, consomme entre 50 et 60% de l'énergie totale d'une STEP, tandis que le pompage, dépendant de facteurs tels que la topographie et la taille de l'installation, représente 20-30%. D'autres processus, tels que la déshydratation et le traitement des boues, peuvent utiliser jusqu'à 20% de l'énergie totale.
- **Impact du matériel d'exploitation** : L'équipement utilisé par l'ONAS, notamment son parc de véhicules et de machines, contribue également de manière significative à la consommation d'énergie. Les données de 2021 montrent que l'ONAS possède 83 hydrocureuses aspiratrices de 8 et 10 m<sup>3</sup>, 30 aspiratrices de 6 m<sup>3</sup>, 13 aspiratrices géantes de 20 m<sup>3</sup>, et 50 engins à boue, entre autres. L'efficacité énergétique de ces machines peut être compromise si elles sont anciennes ou mal entretenues, augmentant ainsi la consommation d'énergie globale.

**Tableau X** : Matériel d'exploitation de l'ONAS (2021)

Nature du matériel	Nombre
Hydrocureuse aspiratrice combinée 8 et 10 m <sup>3</sup>	83
Hydrocureuse aspiratrice combinée équipée d'un système de recyclage	1
Aspiratrice 6 m <sup>3</sup>	30
Aspiratrice géante 20 m <sup>3</sup>	13
Mini hydrocureuse 2 m <sup>3</sup>	13
Mini hydrocureuse aspiratrice combinée 2 m <sup>3</sup>	4
Mini aspiratrice 2 m <sup>3</sup>	2
Engin à boue	50
Mini cureuse sur camionnette pour intervention rapide	58
Véhicule d'inspection du réseau par caméra	9

### 1.3.2. Potentiel de production d'énergie à partir de la boue et des eaux usées traitées

L'ONAS dispose, grâce à ses 125 STEP's recensées en 2021, d'une capacité importante dans la valorisation énergétique des eaux usées et des boues résultantes. Une étude des données issues des rapports annuels de l'ONAS illustre son potentiel à s'ancrer dans une démarche à la fois respectueuse de l'environnement et efficiente sur le plan énergétique.

L'ONAS a démontré sa capacité à traiter et à réutiliser les eaux usées, avec 60 stations dédiées à cette fin. En 2021, l'organisation a traité 289 Mm<sup>3</sup> d'EUT (Eaux Usées Traitées), dont 21,75 Mm<sup>3</sup> ont été réutilisés, représentant un taux de réutilisation de 22%. Bien que ce taux ait légèrement diminué par rapport aux 25,2% de 2020, la tendance globale à la hausse des volumes traités (266 Mm<sup>3</sup> en 2017 à 289 Mm<sup>3</sup> en 2021) montre une orientation positive. L'accent mis sur l'irrigation agricole sert non seulement à réduire la demande en eau potable, mais contribue également à la diminution de la consommation énergétique liée.

Le potentiel du biogaz provenant de la digestion des boues est évident. L'intérêt croissant pour la production de biogaz à partir des boues s'inscrit dans une logique de transition énergétique. Le méthane, principal composant du biogaz, présente un pouvoir calorifique élevé, ce qui le rend particulièrement intéressant pour la production d'énergie. En 2021, l'ONAS a généré 186 000 m<sup>3</sup> de boues. Si l'on considère que chaque mètre cube de boue peut libérer environ 0,2 m<sup>3</sup> de méthane, le



potentiel énergétique est conséquent. Une étude de Couturier et al. (2001) établit que le méthane peut être obtenu à raison de 550m<sup>3</sup> par tonne de matières volatiles (MV) dégradée. Avec une production totale de 186 000 tonnes de boues en 2021, le potentiel énergétique annuel se chiffre à 3 720 GWh, en tenant compte du pouvoir calorifique du méthane évalué à 10 kWh/m<sup>3</sup>. Il est donc pertinent d'explorer davantage les techniques de digestion anaérobie pour maximiser la production de méthane.

L'hydroélectricité, bien que traditionnellement associée aux grands barrages, peut également être exploitée à une échelle réduite à travers les micro-turbines. Les eaux usées, du fait de leur flux constant, offrent une source potentielle d'énergie renouvelable. En utilisant des micro-turbines pour exploiter les eaux usées, l'ONAS pourrait potentiellement produire 14,5 GWh d'électricité annuellement, sur la base d'une récupération de 0,05 kWh/m<sup>3</sup>. Une étude approfondie des débits disponibles et des technologies de micro-turbines serait essentielle pour estimer le potentiel réel.

Énergie thermique : Les eaux usées, grâce à leur température stable, offrent une source inestimable d'énergie thermique. À un rendement de 0,02 kWh/m<sup>3</sup>, on pourrait envisager une production énergétique avoisinant les 5,8 GWh par an.

Les avancées technologiques, telles que les cellules à combustible microbiennes, peuvent ajouter 2,9 GWh d'énergie, en considérant un rendement de 0,01 kWh/m<sup>3</sup>.

Cumulativement, ces diverses stratégies pourraient générer approximativement 26,9 GWh d'énergie renouvelable par an. Cela représente une opportunité significative pour l'ONAS d'augmenter sa contribution aux énergies vertes en Tunisie.

L'analyse régionale des boues produites est essentielle pour comprendre les disparités et adapter les stratégies en conséquence. Selon le dernier rapport d'activité de 2021, les boues sont produites en volumes différents selon les régions. Le Grand Tunis domine avec 53%, suivi du Centre (21%), du Nord (15%) et du Sud (11%). La qualité de ces boues est également à souligner, car les concentrations de métaux lourds, telles que le cadmium, le cuivre, le plomb, etc., sont bien en dessous des normes nationales, ce qui renforce leur potentiel de valorisation sécurisée pour la production d'énergie.

La facture énergétique de l'ONAS s'élevait à 30 millions DT en 2021. Les opportunités abondent pour transformer les eaux usées et les boues en ressources énergétiques. Il est impératif d'intégrer ces ressources dans une vision à long terme qui combine expansion, efficacité et durabilité.

Ainsi, l'ONAS, par son rôle dans la gestion des eaux usées en Tunisie, a une opportunité unique de se positionner comme acteur majeur dans la transition énergétique du pays. La section suivante (section 2) approfondira les techniques et technologies spécifiques permettant de concrétiser ce potentiel. La section 3 abordera en détail les opportunités offertes par la valorisation énergétique des eaux usées en Tunisie, en mettant l'accent sur les options disponibles et leur applicabilité.

## 2. UNE REVUE DOCUMENTAIRE SUR LES TECHNOLOGIES DE VALORISATION ÉNERGÉTIQUE DES DÉCHETS POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

La prise de conscience accrue de l'importance de la durabilité et de la valorisation des ressources dans le domaine de l'assainissement a conduit à l'exploration intensive de diverses méthodes de récupération d'énergie à partir des eaux usées. En résulte un corpus riche de travaux académiques et techniques traitant des technologies de valorisation énergétique des déchets dans le cadre du traitement des eaux usées. La maîtrise de cette littérature est primordiale afin de distinguer les meilleures pratiques, les défis récurrents et les innovations potentielles dans ce domaine.

Les techniques de valorisation énergétique des eaux usées se classifient généralement en trois catégories : biologiques, thermiques et physico-chimiques. Chaque catégorie recèle diverses technologies, chacune présentant ses spécificités, rendements et enjeux.

Les processus biologiques exploitent le potentiel des micro-organismes pour dégrader la matière organique contenue dans les eaux usées, générant ainsi de l'énergie, essentiellement sous forme de biogaz. Parmi ces procédés figurent la digestion anaérobie ou encore les piles à combustible microbiennes (Bora et al., 2020).

Les techniques thermiques, dont l'incinération et la pyrolyse, mobilisent des températures élevées pour transformer les boues d'épuration en énergie, qu'il s'agisse de chaleur, de vapeur ou d'autres formes (Bora et al., 2020 ; GIZ, 2017).

Quant aux méthodes physico-chimiques, elles englobent la carbonisation hydrothermale et la gazéification, et se basent sur des réactions physiques et chimiques pour convertir les eaux usées ou leurs boues en sources d'énergie exploitables (Wang et al., 2013).

Il est à noter que chaque technologie a été l'objet d'analyses approfondies dans diverses publications scientifiques et techniques. Une connaissance exhaustive de ces procédés, couplée à une analyse des défis et perspectives liés à leur mise en œuvre, est essentielle pour orienter et optimiser les stratégies de traitement des eaux usées, tout en valorisant les ressources énergétiques.

### 2.1. Méthodes biologiques

Les procédés biologiques tirent parti des capacités catalytiques intrinsèques des micro-organismes. Ils représentent des alternatives viables et éco-responsables en matière d'extraction énergétique des eaux usées. Ces techniques parviennent à transformer la matière organique contenue dans les eaux résiduelles en diverses sources d'énergie. Dans les sous-sections ultérieures, nous nous pencherons de manière détaillée sur chacune de ces technologies, en exposant leurs mécanismes d'action, leurs avantages, leurs éventuels désavantages et leur pertinence pour des pays en développement, à l'instar de la Tunisie.

### 2.1.1. Digestion anaérobie (DA)

La digestion anaérobie (DA) se positionne en tant que technologie robuste dans le secteur de la valorisation énergétique des eaux usées, avec une mise en application et une reconnaissance qui s'étend sur plusieurs décennies. La DA repose principalement sur la décomposition bactérienne de la matière organique contenue dans les eaux usées, en conditions anaérobies, conduisant à la génération de biogaz. Cette source d'énergie renouvelable est caractérisée par une prédominance de méthane (CH<sub>4</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) (Bora et al., 2020 ; McCarty, 1964 ; SEA, 2017 ; Zarei, 2020).

Le biogaz, étant donné ses propriétés, est multifonctionnel. Il peut être employé dans la production d'électricité et de chaleur et, après épuration, être injecté sous forme de biométhane dans les réseaux de gaz naturel (Drechsel et Hanjra, 2018). Une illustration concrète de cette valorisation est observable à la station d'épuration de Marselisborg au Danemark, où l'application de la DA a permis de transformer ce site de traitement en un producteur net d'énergie (Danfoss, 2023).

Néanmoins, l'emploi de la DA est associé à des avantages spécifiques, mais également à des défis. Parmi ses atouts, on compte la diminution du volume des boues traitées, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la production d'un digestat utile comme amendement agricole (SPREP, 2021). En revanche, elle nécessite un prétraitement minutieux des eaux usées, engendre potentiellement des sous-produits indésirables comme le sulfure d'hydrogène (H<sub>2</sub>S) et a un besoin thermique conséquent, ce qui pourrait restreindre son efficacité dans des environnements au climat plus rigoureux (Pepperl-Fuchs, 2023).

Dans le contexte tunisien, et considérant les spécificités du pays, la DA semble prometteuse. Elle offre une solution durable au traitement des eaux usées tout en contribuant à renforcer la sécurité énergétique à travers la production de biogaz. Bien que l'implantation de cette technologie exige des investissements initiaux conséquents et une surveillance opérationnelle rigoureuse pour préserver l'efficacité bactérienne, les retombées à long terme de la DA sont substantielles. Les gains en matière d'économie d'énergie, couplés aux revenus potentiels de la commercialisation du digestat comme bio-fertilisant, renforcent l'attractivité de cette option.

La mise en œuvre de la DA au sein des stratégies tunisiennes de traitement des eaux usées s'aligne sur l'infrastructure gazière existante du pays et sur ses aspirations en matière de sécurité énergétique durable et de gestion optimale des déchets. Adopter cette approche permettrait à la Tunisie d'adopter une vision plus circulaire de l'économie tout en promouvant la durabilité environnementale.

### 2.1.2. Piles à combustible microbiennes (MFC)

Les piles à combustible microbiennes (MFC) incarnent une percée à la croisée de la biotechnologie et de l'électrochimie, offrant une approche innovante de traitement des eaux usées tout en produisant simultanément de l'énergie. Ces MFC exploitent le potentiel métabolique des bactéries électrogènes qui métabolisent les composés organiques des eaux usées. Pendant cette dégradation, des électrons sont libérés et acheminés vers une électrode, générant ainsi un courant électrique (Siddiqui et al., 2023 ; Vishwanathan, 2021). Cette méthode assure une conversion efficace de l'énergie chimique en électricité, tout en traitant les déchets. Face aux méthodes aérobies traditionnelles, plus coûteuses en énergie, les MFC apparaissent comme une solution à la fois durable et économe (Deng et Zhao, 2015 ; Malik et al., 2023).

Cependant, malgré ce potentiel prometteur, la technologie des MFC en est encore à ses balbutiements. Plusieurs défis restent à relever, notamment l'optimisation de la conception des MFC pour une application pratique, l'adaptabilité à grande échelle, l'amélioration de la densité de puissance en utilisant des matériaux d'électrode adéquats et des souches bactériennes optimisées, et la sélection d'eaux usées offrant la meilleure récupération énergétique (Deng et Zhao, 2015 ; Malik et al., 2023 ; Siddiqui et al., 2023).

Pour la Tunisie, l'introduction des MFC représente un défi financier conséquent, nécessitant des

investissements substantiels en recherche et développement. Néanmoins, les retours sont considérables. Les MFC, par leur capacité à convertir directement les eaux usées en électricité, offrent une réponse aux pénuries d'électricité fréquemment observées en Tunisie, en particulier durant les pics de demande. Un investissement stratégique dans cette technologie pourrait donc non seulement renforcer la production énergétique nationale, mais aussi apporter une réponse verte à la problématique de traitement des eaux usées.

### 2.1.3. Biométhanation :

La biométhanisation est une technique biotechnologique s'apparentant à la digestion anaérobie (DA). Elle capitalise sur l'aptitude de micro-organismes spécifiques à métaboliser la matière organique. Toutefois, contrairement à la DA, la biométhanisation vise essentiellement à augmenter la production de méthane, une bioénergie renouvelable et efficace (Angenent et al., 2004 ; Diamantis et al., 2021 ; Ramya et Senthil Kumar, 2022).

Les bénéfices de la biométhanisation englobent un rendement énergétique optimisé et la réduction potentielle de l'empreinte carbone, en minimisant les émissions de méthane issues des matières organiques. Le biométhane extrait peut subir des traitements supplémentaires pour s'intégrer aux réseaux de gaz naturel, agissant ainsi comme un carburant de transition pour un futur énergétique plus propre.

Néanmoins, l'efficacité de la biométhanisation est tributaire du respect de conditions opérationnelles strictes, notamment en termes de température, de pH, et d'équilibre nutritif, essentiels pour favoriser la production de méthane et préserver la vitalité des micro-organismes. La régulation de ces paramètres peut être complexe, surtout dans les zones où les ressources techniques et l'alimentation électrique sont limitées.

En ce qui concerne la Tunisie, la biométhanisation se présente avec son lot d'opportunités et de défis. Si les conditions climatiques favorables et l'inclinaison nationale vers les énergies renouvelables peuvent constituer des atouts, l'investissement initial, le savoir-faire spécialisé et la nécessité d'une gestion continue peuvent poser des barrières à son adoption. Néanmoins, si ces défis sont judicieusement abordés, la biométhanisation pourrait offrir à la Tunisie un moyen innovant de valoriser ses eaux usées, soutenant ainsi une vision énergétique durable et renforçant sa résilience énergétique (Rajendran et al., 2012).

### 2.1.4. Processus photobiologiques

Les processus photobiologiques sont basés sur l'exploitation des micro-organismes photosynthétiques, tels que les algues et les cyanobactéries, qui captent l'énergie lumineuse pour générer de l'hydrogène, un combustible propre et renouvelable (Ali et al., 2022 ; Melis et al., 2000 ; Srimongkol et al., 2022). Le mécanisme sous-jacent consiste à transformer les nutriments présents dans les eaux usées en hydrogène par l'intermédiaire de ces organismes, sous l'action de la lumière solaire. Ainsi, ce processus s'inscrit comme une alternative écologiquement responsable pour la génération d'énergie.

Néanmoins, certains obstacles peuvent compromettre la rentabilité des processus photobiologiques. Parmi eux, on note les variations de la disponibilité et de l'intensité lumineuse, la compétition avec des organismes non photosynthétiques, ainsi que l'impératif d'une extraction régulière de l'hydrogène pour éviter sa reconversion par les micro-organismes eux-mêmes (Ali et al., 2022 ; Islam et al., 2021 ; Prince et Khashgi, 2005).

Dans le cadre spécifique de la Tunisie, riche de son ensoleillement constant, ces techniques photobiologiques pourraient se positionner comme des candidats énergétiques de choix. Toutefois, les enjeux associés à une diffusion optimale de la lumière et à la gestion appropriée des cultures photobiologiques demandent une attention technique accrue. L'implémentation réussie de ces technologies exigerait probablement d'importants investissements en matière de recherche et de développement.

Toutefois, si les ressources nécessaires sont mises en œuvre et accompagnées technologiques, la Tunisie pourrait tirer profit des processus photobiologiques comme source durable d'hydrogène. Si bien gérée, cette transition vers des énergies renouvelables pourrait grandement améliorer la sécurité énergétique du pays et renforcer sa position en matière de durabilité environnementale.

### 2.1.5. Fermentation sombre

La fermentation sombre est une méthode de bioconversion qui s'appuie sur des bactéries spécifiques pour dégrader la matière organique sans dépendre de la lumière, générant de l'hydrogène gazeux en tant que sous-produit (Hallenbeck, 2009 ; Ramya et Senthil Kumar, 2022). Cette indépendance vis-à-vis de la lumière accroît sa polyvalence dans diverses conditions opérationnelles.

Toutefois, cette technique présente ses défis. Elle requiert des conditions d'exploitation strictement contrôlées et l'utilisation de souches bactériennes adaptées. Sa complexité impose une supervision opérationnelle continue, pouvant augmenter les coûts et exiger une expertise technique avancée (Ren et al., 2006 ; Wang et al., 2011).

Néanmoins, pour un pays comme la Tunisie, engagé vers la voie des énergies renouvelables, la fermentation sombre se profile comme une stratégie énergétique prometteuse. La Tunisie, forte de ses capacités techniques, pourrait surmonter ces défis. Cette technologie, si correctement exploitée, placerait le pays à l'avant-plan de l'économie globale de l'hydrogène.

*La diversité des techniques biologiques pour l'extraction d'énergie des eaux usées, notamment la digestion anaérobie (DA), les piles à combustible microbiennes (MFC), la biométhanisation, les processus photobiologiques et la fermentation sombre, offre un éventail d'options pour convertir une ressource omniprésente, les eaux usées, en énergie.*

*La DA et la biométhanisation peuvent garantir des avantages rapides en raison de leur maturité technologique. Cependant, elles demandent des investissements initiaux conséquents et une maintenance continue.*

*Les MFC, encore à un stade expérimental, incarnent une avenue intrigante pour la technologie de traitement des eaux usées. Malgré cela, elles nécessitent davantage de recherches pour atteindre une commercialisation à grande échelle.*

*En ce qui concerne la production d'hydrogène, les processus photobiologiques et la fermentation sombre présentent des opportunités distinctes. La fermentation sombre, sans dépendre de la lumière, offre une adaptabilité notable mais requiert des conditions bien spécifiques.*

*Pour mettre en œuvre ces technologies en Tunisie, une planification minutieuse, des investissements financiers, et une montée en compétences techniques sont indispensables. Cependant, les bénéfices potentiels en matière d'énergie renouvelable et d'efficacité environnementale font de ces approches biologiques des candidats privilégiés dans l'orientation de la Tunisie vers un avenir plus vert.*

## 2.2. Méthodes thermiques

Les méthodes thermiques représentent une catégorie cruciale de techniques utilisées dans la valorisation énergétique des déchets (WtE). Elles englobent l'incinération, la gazéification, la pyrolyse et l'hydrolyse thermique. Ces procédés permettent de transformer les matières solides présentes dans les eaux usées, souvent désignées sous le terme de « boues », en gaz à haute teneur calorifique ou en énergie. Ils le font en exposant ces matériaux à des températures élevées. De telles transformations sont fondamentales pour une valorisation énergétique efficace et durable des déchets, comme l'ont indiqué Gao et al. (2020) et PROE (2021).

Outre leur capacité à produire de l'énergie, ces technologies thermiques jouent un rôle primordial dans la gestion durable des eaux usées. Elles peuvent considérablement réduire le volume des déchets et neutraliser les agents pathogènes, contribuant ainsi à une gestion plus sûre et plus écologique des boues d'épuration. En optimisant ces procédés, il serait possible de répondre aux défis des pénuries énergétiques, surtout dans des pays en développement tels que la Tunisie. Leur intégration systématique pourrait ainsi jouer un rôle transformationnel en matière de sécurité énergétique et d'assainissement.

### 2.2.1. Valorisation énergétique par incinération

L'incinération est une méthode thermique qui s'appuie sur la combustion des boues d'épuration pour produire de la chaleur et des résidus sous forme de cendres (BRC, 2022 ; Chang et al., 2022). La chaleur générée par ce processus est généralement utilisée pour produire de la vapeur, laquelle peut ensuite alimenter des turbines pour générer de l'électricité. Cette approche offre une double solution : elle permet à la fois de valoriser énergétiquement les déchets et de réduire significativement leur volume, facilitant ainsi leur gestion (Stillwell et al., 2010).

Dans le contexte tunisien, face à une croissance démographique soutenue et à une production croissante d'eaux usées, l'incinération pourrait être envisagée comme une stratégie pertinente pour gérer efficacement les volumes importants de déchets (Al Samsami et al., 2023). Toutefois, ce n'est pas une solution exempte de contraintes.

En effet, l'incinération peut conduire à la libération de composés potentiellement dangereux, comme les dioxines. Cela nécessite la mise en place de dispositifs sophistiqués de traitement des gaz d'échappement pour réduire l'impact sur l'environnement et protéger la santé publique (Breach et Simonovic, 2018). Par ailleurs, les cendres résiduelles, produits secondaires de l'incinération, requièrent des techniques d'élimination adaptées afin de prévenir toute pollution des eaux souterraines par les lixiviats. De plus, malgré ses avantages, le coût initial élevé d'installation des incinérateurs, la consommation énergétique nécessaire à leur fonctionnement, ainsi que les impératifs d'entretien peuvent représenter des obstacles à leur mise en place, en particulier dans les régions où les ressources financières sont plus limitées.

L'adoption de l'incinération en Tunisie doit donc être soigneusement réfléchie, en pesant les avantages en matière de gestion des déchets et de production d'énergie face aux défis environnementaux, économiques et sociaux qu'elle présente.

### 2.2.2. Gazéification et pyrolyse

La gazéification et la pyrolyse figurent parmi les méthodes thermo-chimiques utilisées pour décomposer la matière organique. Ces deux processus se distinguent principalement par leur environnement d'oxygène. La gazéification se réalise en présence limitée d'oxygène, ou en conditions sous-stœchiométriques, tandis que la pyrolyse s'effectue en l'absence totale d'oxygène (Hao et al., 2022 ; Lv et al., 2022). Les produits dérivés de ces processus, à savoir le gaz de synthèse pour la gazéification et la biohuile pour la pyrolyse, possèdent un potentiel énergétique conséquent. Ils pourraient ainsi contribuer à diversifier les sources d'énergie de la Tunisie et à diminuer sa dépendance vis-à-vis des énergies conventionnelles (Mishra et al., 2023).

En comparaison avec l'incinération, la gazéification et la pyrolyse présentent des atouts non négligeables. En effet, ces techniques offrent généralement de meilleurs rendements énergétiques et génèrent des sous-produits ayant un moindre impact sur l'environnement (Nkuna et al., 2022). De plus, la valorisation des déchets via ces processus aboutit à la production de matières valorisables, enrichissant ainsi le spectre des options pour la gestion des déchets. Cependant, ces avantages s'accompagnent de contraintes techniques : le contrôle rigoureux du processus, la nécessité d'une matière première de qualité optimale, ainsi que le recours à des équipements de pointe (Liu et al., 2022). L'investissement initial conséquent et les coûts d'entretien associés à ces technologies



pourraient constituer un frein à leur adoption en Tunisie. Néanmoins, compte tenu de leurs avantages potentiels en matière de production énergétique et de gestion des déchets, l'exploration de ces solutions semble judicieuse pour l'avenir (Carotenuto et al., 2023).

### 2.2.3. Hydrolyse thermique

L'hydrolyse thermique est un procédé avancé qui utilise la chaleur et la pression pour fragmenter les molécules complexes présentes dans les boues d'épuration. Cette technique offre plusieurs avantages, tels que l'amélioration de la digestion anaérobie, une production accrue de biogaz et la réduction du volume de boues. Elle offre également une opportunité d'extraire des substances de valeur comme les lipides, qui peuvent ensuite être utilisées pour produire des biocarburants (Cao et al., 2022 ; Hämäläinen et al., 2022 ; Wen et Li, 2022).

Cependant, malgré ses bénéfices évidents, l'hydrolyse thermique présente aussi des défis. Elle est énergivore et exige des compétences techniques avancées pour assurer une utilisation efficace. De plus, l'investissement initial et les coûts d'entretien peuvent représenter un obstacle pour certains pays comme la Tunisie, où les ressources financières peuvent être limitées.

*La mise en œuvre de techniques de valorisation énergétique thermique telles que l'hydrolyse thermique, l'incinération, la gazéification et la pyrolyse nécessite une réflexion approfondie. Ces techniques, bien que prometteuses, nécessitent une expertise technique pointue, qui pourrait ne pas être disponible dans toutes les régions de la Tunisie. De plus, les implications environnementales, telles que les émissions de gaz nocifs ou la production de déchets secondaires, doivent être soigneusement évaluées et gérées.*

*Sur le plan économique, le coût d'investissement élevé associé à ces technologies pourrait être un frein, en particulier dans les régions où les ressources financières sont limitées. L'entretien et les opérations courantes peuvent également entraîner des coûts importants.*

*Intégrer ces technologies dans l'infrastructure existante de la Tunisie pourrait nécessiter une modernisation majeure ou même la création de nouvelles installations, ce qui serait à la fois coûteux et chronophage.*

*Ainsi, bien que ces technologies présentent un potentiel significatif pour adresser les défis liés à la gestion des eaux usées et aux besoins énergétiques de la Tunisie, leur mise en place nécessite une planification soignée, des investissements considérables et un renforcement des capacités locales. Les décideurs devront peser les avantages et les inconvénients, et prendre des décisions éclairées pour assurer un avenir énergétique durable pour la Tunisie.*

## 2.3. Processus physico-chimiques

Les techniques physico-chimiques s'inscrivent dans une catégorie de technologies destinées à la valorisation énergétique des déchets. Elles visent essentiellement à transformer les eaux usées et les déchets associés en sources d'énergie exploitables ou en d'autres produits à haute valeur ajoutée, optimisant ainsi la récupération énergétique. Le fondement de ces méthodes repose sur l'utilisation combinée de la chaleur, de la pression et de réactifs chimiques, agissant comme catalyseurs pour favoriser ces transformations (Bora et al., 2020 ; van der Hoek et al., 2016).

### 2.3.1. Carbonisation hydrothermale (HTC) et liquéfaction thermo-chimique

La carbonisation hydrothermale (HTC) et la liquéfaction thermo-chimique comptent parmi les procédés physico-chimiques qui tirent parti des conditions de haute pression et de température pour convertir les boues d'épuration en coproduits énergétiques. En particulier, le HTC mène à la création d'un hydrochar, tandis que la liquéfaction thermo-chimique aboutit à la production de bio-huile (Bora et al., 2020).

La carbonisation hydrothermale (HTC) est un processus par lequel les résidus organiques sont exposés à des températures et pressions élevées, aboutissant à la production d'hydrochar, un type de biocarburant. Cette technique rehausse significativement la valeur énergétique et la stabilité de stockage du matériau organique initial. De surcroît, il est prouvé que le HTC peut neutraliser certains polluants, offrant ainsi une solution pour le traitement des eaux usées. Toutefois, en dépit de son potentiel, l'application réussie du HTC exige une forte consommation énergétique et des dispositifs techniques de pointe, ce qui pourrait limiter son adoption dans des régions à ressources contraintes, telles que la Tunisie (Kosińska et al., 2023).

La liquéfaction thermo-chimique, bien qu'ayant des points communs avec le HTC en termes de principes opératoires, est particulièrement adaptée au traitement de la biomasse à forte teneur en humidité, comme les boues d'épuration. Ce procédé est capable de transformer cette biomasse en biopétrole, gaz et charbon. Au-delà de ses apports en matière de récupération d'énergie et de diminution du volume des déchets, la liquéfaction thermo-chimique génère aussi des sous-produits de valeur qui renforcent l'attractivité économique de la technique. Tout comme le HTC, la mise en place de la liquéfaction thermo-chimique se heurte à des contraintes liées à sa haute demande en énergie et à la nécessité de technologies sophistiquées, ce qui pourrait entraver son déploiement dans des pays aux moyens limités, à l'instar de la Tunisie (Rout et al., 2022).

### 2.3.2. Processus d'oxydation avancés (AOP)

Les processus d'oxydation avancés, ou AOP, occupent une position stratégique dans la chaîne de traitement des eaux usées. Bien que leur vocation première ne soit pas la production d'énergie, leur atout majeur réside dans la détoxification des eaux. En recourant à des agents chimiques hautement réactifs et souvent en association avec un rayonnement ultraviolet (UV), les AOP sont en mesure de dégrader des contaminants réfractaires présents dans les eaux usées. Cette étape de décontamination est cruciale, car elle optimise la performance des processus de récupération d'énergie subséquents, tels que les techniques de digestion anaérobie ou les approches de traitement thermique (Deng et Zhao, 2015 ; Kumar et al., 2023).

#### 2.3.2.1. AOP photocatalytiques

Les procédés d'oxydation avancés photocatalytiques tirent parti de l'énergie lumineuse, principalement dans la plage ultraviolette, en association avec des catalyseurs appropriés pour engendrer des radicaux hydroxyles extrêmement réactifs. Ces radicaux, dotés d'une capacité d'oxydation exceptionnelle, sont capables de dégrader une variété considérable de contaminants organiques jusqu'à des produits finaux tels que l'eau et le dioxyde de carbone, minimisant ainsi leur nocivité (Liu et al., 2022).

Dans la perspective tunisienne, la pertinence des AOP photocatalytiques est renforcée par la forte insolation dont jouit le pays, rendant ces procédés dépendants des UV particulièrement attractifs. Cependant, il convient de noter certaines contraintes associées à leur mise en place. En particulier, l'utilisation de catalyseurs spécifiques, dont le coût et la nécessité de renouvellement périodique, pourrait engendrer une augmentation non négligeable des coûts opérationnels. De surcroît, la réussite et l'efficacité du traitement sont tributaires de plusieurs paramètres opérationnels, tels que la durée d'exposition, la concentration des contaminants et les particularités propres à chaque polluant, nécessitant ainsi une approche sur-mesure pour chaque contexte d'application.

#### 2.3.2.2. AOP Fenton et Photo-Fenton

Les procédés Fenton et Photo-Fenton comptent parmi les techniques d'oxydation avancées les plus



reconnues. Ils se basent sur la réaction entre les sels de fer, particulièrement le peroxyde d'hydrogène pour générer des radicaux hydroxyles. Ces radicaux, de par leur grande réactivité, peuvent oxyder et décomposer efficacement divers contaminants organiques présents dans les eaux usées. Le procédé Photo-Fenton diffère du Fenton classique par l'introduction d'une source lumineuse, optimisant ainsi la production des radicaux hydroxyles (Kumar et al., 2023).

L'atout majeur de ces techniques réside dans leur aptitude à éliminer une vaste gamme de contaminants organiques complexes. Néanmoins, leur efficacité peut être influencée par le pH et la température des eaux traitées, imposant une régulation minutieuse pour garantir leur performance optimale. Par ailleurs, le recours aux sels ferreux et au peroxyde d'hydrogène, bien que cruciaux pour le processus, peut engendrer des coûts opérationnels plus élevés. De plus, une gestion inadéquate de ces réactifs peut conduire à une contamination secondaire, posant ainsi des enjeux environnementaux et sécuritaires non négligeables.

### 2.3.2.3. AOP à base d'ozone

Les AOP qui exploitent l'ozone mobilisent ce puissant agent oxydant afin de décomposer efficacement une multitude de contaminants organiques présents dans les eaux usées (Deng et Zhao, 2015). Grâce à cette dégradation, il est possible d'améliorer considérablement la qualité des eaux usées, les préparant ainsi pour des étapes ultérieures de traitement ou de récupération énergétique.

Néanmoins, la mise en place d'une AOP à base d'ozone s'accompagne de défis majeurs. Parmi eux, la nécessité de disposer d'équipements spécialisés ainsi que de techniciens qualifiés aptes à manipuler l'ozone en respectant toutes les mesures de sécurité. En effet, du fait de son haut potentiel oxydatif, l'ozone peut présenter des dangers en cas de mauvaise utilisation ou de fuites. Par conséquent, l'adoption de protocoles de sécurité rigoureux et une formation adéquate du personnel sont primordiales pour garantir la sécurité de l'opération. Ces contraintes, en particulier les coûts associés aux équipements et à la formation, peuvent constituer un frein à l'adoption de cette technique dans des régions où les ressources sont limitées.

### 2.3.2.4. AOP à base de peroxyde d'hydrogène

L'utilisation du peroxyde d'hydrogène dans les AOP s'articule autour de sa capacité à fonctionner comme un oxydant vigoureux, permettant la désintégration des contaminants organiques trouvés dans les eaux usées. En présence de polluants, le peroxyde d'hydrogène les oxyde, les transformant en composés finaux non nocifs.

Toutefois, bien que ces méthodes aient fait preuve d'une grande efficacité, elles peuvent engendrer des coûts conséquents, principalement en raison de la nécessité d'un approvisionnement constant en peroxyde d'hydrogène. La nature très réactive du peroxyde d'hydrogène impose également des protocoles stricts pour sa manipulation, augmentant ainsi la nécessité de mesures de sécurité renforcées. D'autres limitations, telles que les contraintes liées à la composition des eaux usées, peuvent également influencer la performance de ces procédés.

*L'introduction et le déploiement de méthodes physico-chimiques avancées pour le traitement des eaux usées et la conversion énergétique sont pleins de promesse. Ces techniques offrent une opportunité unique de transformer les déchets en énergie tout en minimisant leur empreinte écologique. Les processus évoqués précédemment mettent en lumière les possibilités en matière d'efficacité dans la gestion des eaux usées et la production d'énergies renouvelables.*

*Néanmoins, pour un pays comme la Tunisie, qui est en transition, le déploiement de telles technologies se heurte à des défis économiques et techniques. Le coût d'acquisition et d'exploitation, ainsi que le besoin d'une expertise technique avancée, peuvent freiner l'adoption de ces méthodes.*

*Cependant, la Tunisie, dotée d'un ensoleillement abondant, est en position favorable pour développer des méthodes qui exploitent cette source d'énergie, comme les AOP photocatalytiques. De plus, en investissant dans la formation et le renforcement des compétences locales, il est possible de surmonter certains des défis techniques.*

*L'aide internationale et des mécanismes de financement innovants pourraient aussi aider la Tunisie à surmonter les barrières financières. En outre, la création de partenariats entre le secteur public et le secteur privé pourrait stimuler davantage d'investissements dans ce domaine.*

*Il est fondamental de reconnaître que le choix de la technologie doit être contextuel et adapté aux besoins et capacités spécifiques de chaque pays. Mais avec une vision claire et une stratégie bien définie, la Tunisie pourrait maximiser les avantages de ces technologies, ouvrant la voie à un futur énergétiquement efficient et durable.*

## 2.4. Technologies avancées et émergentes

L'évolution rapide de la technologie et de la recherche scientifique a conduit à l'émergence de nouvelles méthodes dans le domaine du traitement des eaux usées et de la récupération d'énergie. Ces méthodes récentes, bien qu'encore à des stades variés de développement et d'implémentation, présentent un potentiel révolutionnaire pour renouveler notre approche de gestion des déchets et de production d'énergie.

### 2.4.1 Systèmes bioélectrochimiques (BES)

Les systèmes bioélectrochimiques offrent une interface prometteuse entre le monde biologique et les processus électrochimiques. Les piles à combustible microbiennes (MFC) représentent une application majeure de cette technologie, où les bactéries décomposent les matières organiques et génèrent de l'électricité simultanément (Breach et Simonovic, 2018). Ainsi, non seulement ils purifient l'eau, mais ils produisent également une forme d'énergie renouvelable, faisant d'eux une solution prometteuse pour la gestion intégrée des eaux usées.

### 2.4.2. Oxydation à l'eau supercritique (SCWO)

Utilisant les propriétés uniques de l'eau sous conditions supercritiques, l'oxydation à l'eau supercritique permet de décomposer les contaminants organiques en CO<sub>2</sub>, en eau et en d'autres sous-produits inoffensifs. Bien que prometteuse, cette technologie doit encore surmonter des défis tels que la corrosion des matériaux utilisés et les besoins en matériaux résistants aux hautes pressions (Gao et al., 2020).

### 2.4.3. Nanotechnologie

Les avancées dans le domaine de la nanotechnologie offrent de nouvelles perspectives pour le traitement des eaux usées. Les nanomatériaux, en raison de leurs propriétés uniques, peuvent améliorer l'efficacité des processus tels que les AOP, DA et MFC. De plus, les nanogénérateurs, qui convertissent l'énergie mécanique des flux d'eaux usées en énergie électrique, ouvrent de nouvelles voies dans la conversion énergétique des déchets (Kumar et al., 2023).

### 2.4.4. Intelligence artificielle et IoT

L'introduction de l'intelligence artificielle (IA) et de l'Internet des objets (IoT) dans le domaine du traitement des eaux usées pourrait transformer la manière dont nous gérons les systèmes de traitement. Avec l'aide de capteurs connectés pour une surveillance en temps réel et de l'IA pour des prédictions précises, il est possible d'optimiser le rendement des systèmes existants et de détecter rapidement les anomalies (Nguyen et al., 2022 ; Oruganti et al., 2023).

### 2.4.5. Processus assistés par micro-ondes

L'utilisation de l'énergie des micro-ondes pour accélérer les réactions chimiques dans le traitement des eaux usées est en cours d'étude. Grâce à un chauffage uniforme et rapide, ces processus pourraient offrir des taux de réaction améliorés et une meilleure efficacité énergétique. Bien que prometteuse, cette technologie nécessite encore des études et des adaptations pour être mise en œuvre à grande échelle (Lv et al., 2022).

*La Tunisie, comme beaucoup d'autres pays, est en quête constante de solutions innovantes pour répondre à ses défis énergétiques et environnementaux. Dans le domaine du traitement des eaux usées et de la conversion des déchets en énergie, plusieurs technologies avancées et émergentes semblent prometteuses.*

*D'une part, les **systèmes bioélectrochimiques** pourraient offrir à la Tunisie une méthode durable de conversion des déchets organiques en énergie. Cette technologie est particulièrement attrayante pour un pays comme la Tunisie, qui possède une riche biodiversité microbienne et une grande quantité de déchets organiques provenant de diverses sources, notamment l'agriculture et les industries alimentaires.*

*L'**oxydation de l'eau supercritique**, d'autre part, pourrait répondre aux besoins spécifiques du traitement des déchets industriels en Tunisie. Étant donné la nature complexe et souvent toxique de ces déchets, une technologie capable de décomposer ces composés organiques en substances inoffensives serait d'une grande valeur.*

*La **nanotechnologie**, avec son potentiel pour améliorer l'efficacité des processus existants et introduire des innovations comme les nanogénérateurs, pourrait également trouver sa place dans le paysage énergétique tunisien. Cette technologie pourrait non seulement augmenter la quantité d'énergie produite à partir des déchets, mais aussi réduire la quantité de déchets nécessitant un traitement ultérieur.*

*L'**intelligence artificielle et l'Internet des objets** sont d'autres technologies émergentes qui pourraient avoir un impact considérable sur le traitement des eaux usées en Tunisie. Grâce à une meilleure surveillance, une adaptabilité et une optimisation des processus, ces technologies pourraient transformer la façon dont le pays aborde la gestion des déchets.*

*Enfin, bien que les **procédés assistés par micro-ondes** en soient encore à leurs débuts, leur potentiel pour améliorer l'efficacité énergétique ne doit pas être sous-estimé. Si les défis techniques et financiers peuvent être surmontés, cette technologie pourrait également jouer un rôle dans la stratégie énergétique de la Tunisie.*

*La Tunisie se trouve ainsi à un moment charnière de son développement technologique et énergétique. Avec les bons investissements et la volonté politique, elle a le potentiel de devenir un leader dans l'adoption de technologies avancées pour le traitement des eaux usées et la conversion des déchets en énergie.*

## 2.5. Gestion optimisée des boues en station d'épuration

### 2.5. Principe de fonctionnement et gestion optimisée des boues en station d'épuration

Les stations d'épuration jouent un rôle essentiel dans la protection de l'environnement hydrique. Elles traitent les eaux usées en passant par diverses étapes, aboutissant à la production de boues résiduelles. Le traitement de ces boues, tout comme celui des eaux usées, est primordial pour la préservation de l'environnement.

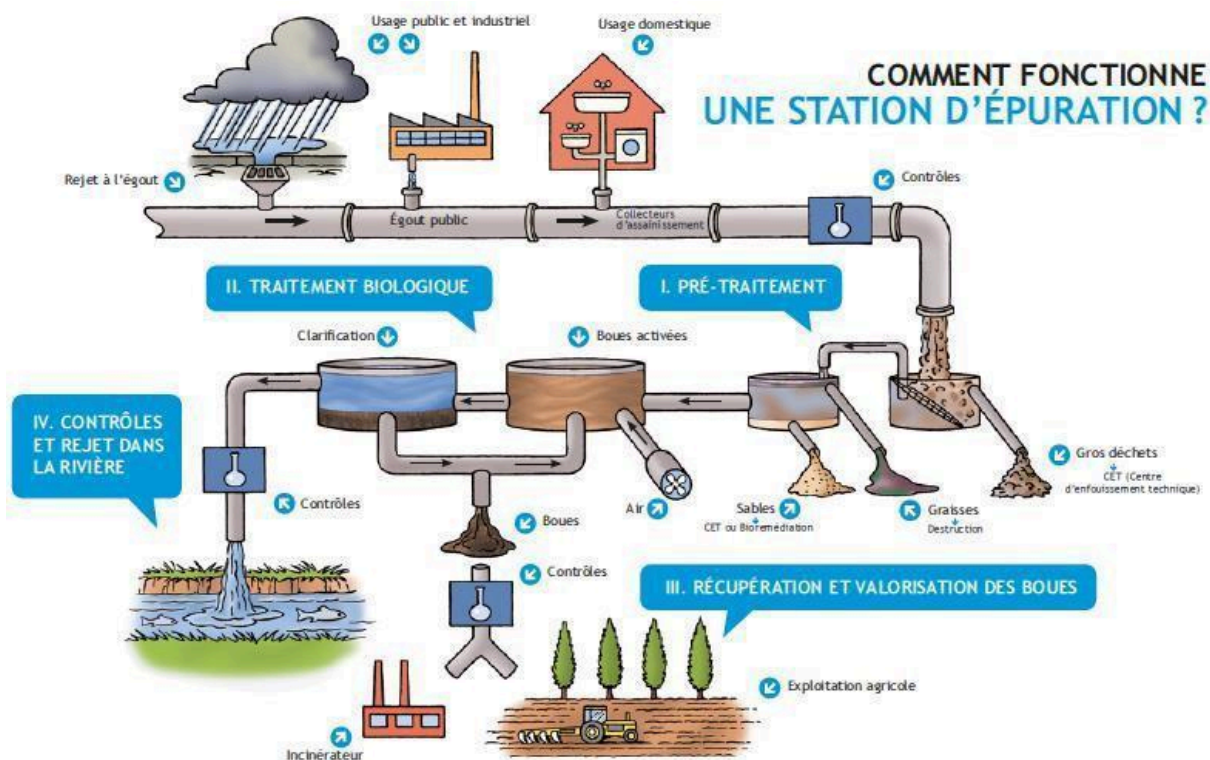
### 2.5.1. Processus de traitement des eaux usées

Avant de se pencher sur la gestion des boues, il est essentiel de comprendre le fonctionnement d'une station d'épuration. Le traitement des eaux usées dans une station d'épuration peut se faire soit par procédés physico-chimiques, soit par procédés biologiques.

La méthode biologique est prédominante. Elle comprend généralement quatre étapes successives, illustrées dans la Figure X :

- **Les prétraitements** : Leur but est d'éliminer les éléments grossiers grâce au dégrillage, d'enlever le sable via le dessablage et d'éliminer les graisses lors du déshuilage.
- **La décantation primaire** : Cette étape, bien que facultative, gagne en popularité. Elle vise à capter les éléments en suspension dans les eaux usées.
- **La digestion aérobie ou traitement biologique** : C'est à ce stade que la matière organique présente dans l'eau usée est dégradée par des micro-organismes formant des « floccs ». Ces micro-organismes produisent ensuite des boues dites "activées", d'où l'importance d'une aération conséquente lors de cette phase.
- **La clarification** : Elle permet de séparer l'eau traitée du « flocc » bactérien.

À l'issue de ce processus, l'eau traitée est rejetée dans la nature tandis que les boues résiduelles sont conservées pour traitement ultérieur. Ces boues, constituées principalement de matières organiques non dégradées, matières minérales, micro-organismes et d'eau (à hauteur d'environ 99%), sont le résultat des particules solides non retenues lors des prétraitements et du traitement biologique.



**Figure X** : Schéma des étapes successives du traitement biologique des eaux usées en station d'épuration (source : Intercommunale de Développement Économique et d'Aménagement du cœur du Hainaut)

### 2.5.2. Épaississement

L'épaississement est primordial pour diminuer le volume des boues. Immédiatement après le traitement des eaux, ces boues possèdent une teneur en eau comprise entre 95 et 99%. La nature de cette eau varie : libre, pouvant être retirée par déshydratation mécanique, ou liée à des bactéries, requérant un séchage thermique (>105°C). Les techniques d'épaississement peuvent être gravitaires, par décantation sur une durée de 24 à 48 heures, ou dynamiques grâce à l'égouttage, la flottation ou la centrifugation (Carotenuto et al., 2023).

### 2.5.3. Stabilisation et hygiénisation

La stabilisation, en minimisant l'activité biologique fermentescible, réduit aussi les odeurs des boues. Elle peut être réalisée biologiquement, via le compostage ou la méthanisation, ou chimiquement comme par le chaulage. Au-delà de cette stabilisation, l'hygiénisation consiste à éliminer presque intégralement les micro-organismes pathogènes à travers des procédés physiques ou chimiques, assurant une sécurité sanitaire accrue (Kumari et al., 2023).

### 2.5.4. Déshydratation et séchage

Après la stabilisation, les boues passent à la déshydratation, visant une réduction de la teneur en eau. Cette phase s'appuie sur des procédés mécaniques comme la centrifugation et les filtres-presses (Al Samsami et al., 2023). Le séchage, en revanche, cible une réduction plus significative de l'eau, avec des taux de siccité dépassant 50%. Selon les conditions, ce séchage peut être solaire, avec les boues étalées à l'air libre, ou thermique, une méthode plus efficace mais aussi plus énergivore (Di Giacomo et Romano, 2022).

### 2.5.5. Conditionnement

Crucial pour optimiser déshydratation et séchage, le conditionnement se sert souvent de substances comme la chaux, les polymères, ou des coagulants tels que le chlore ou le sulfate ferrique. Ces agents améliorent la performance des procédés en préparation des étapes ultérieures, que ce soit la valorisation ou l'élimination des boues (Liu et al., 2022).

### 2.5.6. Élimination ou valorisation

La phase finale du traitement des boues en station d'épuration (STEP) consiste à gérer soit leur élimination, soit leur valorisation pour des usages ultérieurs. Historiquement, les approches conventionnelles privilégiaient l'élimination, telle que la mise en décharge ou l'incinération. Cependant, la tendance actuelle, fortement influencée par des préoccupations écologiques, est tournée vers la valorisation des boues.

Les boues d'épuration sont riches en nutriments essentiels et peuvent, de ce fait, être utilisées comme amendements agricoles. Ces boues permettent d'enrichir les sols avec des éléments fertilisants comme l'azote et le phosphore, tout en stabilisant le pH des sols. L'ajout de boues d'épuration peut améliorer la porosité du sol, sa stabilité, stimuler son activité biologique, et augmenter sa capacité de rétention en eau. D'ailleurs, le retour au sol des boues d'épuration offre un double avantage : il présente un intérêt agronomique indéniable et contribue également à la capture du carbone, jouant ainsi un rôle clé dans la réduction des émissions de CO<sub>2</sub>. Une estimation suggère que l'augmentation du taux de matière organique dans les sols via l'épandage de boues permet de stocker durablement l'équivalent de 250 kg de CO<sub>2</sub> par tonne de matière sèche.

Il est à noter qu'entre 60 et 70% des boues d'épuration retournant aux sols agricoles sont épandues directement. Cette technique présente l'avantage d'être économique, bien que parfois elle nécessite des traitements supplémentaires pour réduire le pouvoir fermentescible des boues, tels que la digestion ou le chaulage.

Néanmoins, cette stratégie de retour au sol direct présente des défis. L'un d'entre eux est l'acceptabilité sociale, car l'épandage de boues d'épuration peut rencontrer des résistances auprès des agriculteurs et des riverains. De plus, la gestion des boues pendant les périodes où l'épandage est impossible ou



interdit pose des questions sur les solutions de stockage appropriées.

Outre l'épandage, la valorisation des boues embrasse également d'autres avenues innovantes. Ainsi, des recherches sont en cours pour transformer les boues en biocarburants ou autres produits valorisables via des procédés thermiques ou hydrothermaux (Kosińska et al., 2023; Liu et al., 2022; Rout et al., 2022). De plus, les boues peuvent servir de source d'énergie ou permettre la récupération d'éléments précieux, comme le phosphore, essentiel pour l'agriculture (Liu et al., 2022 ; Wei et al., 2020).

En dépit de tous ces avantages, il est crucial de gérer avec prudence le retour des boues au sol, notamment en surveillant les traces d'éléments indésirables tels que les éléments traces métalliques (ETM), les composés toxiques organiques (CTO), et les micro-organismes pathogènes.

*Adopter une approche intégrée, combinant une gestion efficace des boues à une stratégie de récupération énergétique, peut significativement renforcer la durabilité et la rentabilité des stations d'épuration. La mise en application de ces méthodes pourrait non seulement minimiser les impacts écologiques, mais aussi favoriser la production d'énergies vertes et la récupération de ressources. L'évolution technologique, associée à une connaissance scientifique croissante, esquisse un avenir prometteur pour la gestion des boues, s'inscrivant dans une valorisation énergétique des eaux usées, aux bénéfices écologiques et économiques multiples.*

## **2.6. Récupération d'énergie à partir des eaux usées : une vision globale à travers des études de cas**

Avec l'évolution technologique, le domaine du traitement des eaux usées s'oriente de plus en plus vers une exploitation énergétique des déchets. Les STEPS saisissent cette chance pour transformer les déchets en énergie renouvelable, établissant un lien solide entre la gestion des déchets et la réduction de la consommation énergétique. Ces études de cas, issues de diverses régions du monde, dévoilent un large éventail de technologies et de méthodes adoptées pour réaliser cette transition.

### **2.6.1. Digestion anaérobie et systèmes de cogénération**

En Afrique, la station d'épuration de Marrakech au Maroc se présente comme un modèle d'efficacité dans le traitement des eaux usées et la valorisation de ses sous-produits. Selon El Moussaoui et al. (2022), cette station mise sur la digestion anaérobie pour traiter les boues, sous-produits des eaux usées, dans un milieu à faible teneur en oxygène. Le biogaz qui en résulte est converti en électricité et en chaleur via des systèmes de cogénération, illustrant une symbiose réussie entre respect de l'environnement et viabilité économique.

Cette innovation n'est pas unique au Maroc. Plusieurs stations aux États-Unis ont incorporé des stratégies de valorisation énergétique, s'appuyant sur la digestion anaérobie pour transformer les boues en biogaz. Stillwell et al. (2010) ont souligné que cette méthode diminue le recours à des sources d'énergie externes, rendant les opérations plus écologiques tout en mettant en avant la possibilité d'une récupération d'énergie à partir des eaux usées à large échelle.

### **2.6.2. Procédés thermochimiques et valorisation énergétique**

Les stations d'épuration croates illustrent une autre facette de la valorisation énergétique des boues : le traitement thermochimique. Selon Đurđević et al. (2019), ce procédé consiste à incinérer les boues, et la chaleur dégagée sert à produire de la vapeur qui actionne ensuite des turbines pour générer de l'électricité.

De son côté, la Grèce a adopté une démarche semblable, mais en exploitant les boues issues de précipitations chimiquement renforcées. Bezirgiannidis et al. (2020) ont accentué le potentiel de cette

transformation thermochimique des boues, non seulement comme moyen de réduction des émissions environnementales liées à leur élimination, mais également comme une source précieuse d'énergie renouvelable.

### 2.6.3. Récupération de chaleur des eaux usées et utilisation de turbines hydrauliques

Le modèle suédois, en particulier celui de Stockholm, se distingue nettement des autres. Golzar et Silveira (2021) ont mis en lumière une technique innovante qui consiste à récupérer la chaleur des eaux usées pour chauffer les infrastructures. Cette démarche illustre comment la valorisation énergétique des eaux usées peut s'étendre au-delà des frontières traditionnelles des stations d'épuration et jouer un rôle clé dans la réduction des besoins énergétiques des bâtiments.

Par ailleurs, en Italie, l'étude de Sinagra et al. (2022) a mis en avant l'efficacité de l'intégration de turbines hydrauliques dans les canaux d'eaux usées. Ce procédé, capitalisant sur l'énergie cinétique du flux d'eaux usées, génère de l'électricité, optimisant ainsi les ressources et renforçant la durabilité des STEPs.

Dans une perspective plus large, Hamlehdar et al. (2022) en Iran ont exploré le potentiel d'insertion de microturbines au sein des systèmes de distribution d'eau. Leurs travaux ont révélé des opportunités prometteuses de récupération d'énergie à partir de ces réseaux, offrant des perspectives intéressantes pour une mise en œuvre élargie.

### 2.6.4. Électrolyse microbienne et digestion anaérobie avancée

Dans le contexte saoudien, l'utilisation des cellules d'électrolyse microbienne pour le traitement des eaux usées urbaines et la génération d'hydrogène est particulièrement remarquable, comme le soulignent Khan et al. (2017). Cette méthode ne se contente pas de traiter les eaux usées, elle produit également de l'hydrogène, une énergie propre, démontrant une exploitation optimale des ressources en eaux usées.

En Chine, Smith et al. (2018) ont mis l'accent sur la nécessité de fusionner les techniques traditionnelles de traitement des eaux usées avec des méthodes plus sophistiquées de digestion anaérobie et de gazéification. L'objectif est de maximiser la valorisation énergétique des matières organiques issues des eaux usées, s'alignant ainsi sur les ambitions nationales de transition vers une économie circulaire et une diminution des émissions carbone.

### 2.6.5. Production fermentaire de biohydrogène et bioréacteur à membrane anaérobie

L'Italie, avec la recherche dirigée par Pecorini et al. (2017), a introduit une dimension novatrice dans le domaine de la valorisation énergétique des eaux usées. Leur étude met en évidence la capacité à générer du biohydrogène par le biais de la fermentation anaérobie des biodéchets. Ce biohydrogène, une fois obtenu, a été exploité pour produire à la fois de l'électricité et de la chaleur au moyen d'une pile à combustible. Cette découverte ouvre des perspectives intéressantes pour l'utilisation d'une ressource souvent considérée comme un déchet, transformant les biodéchets en une source d'énergie renouvelable précieuse.

Dans une démarche similaire, mais avec un focus différent, Pretel et al. (2015) en Espagne ont exploré l'impact de la sédimentation primaire associée à la digestion anaérobie sur la valorisation énergétique des eaux usées issues des zones urbaines. Leurs constatations indiquent qu'un prétraitement par décantation primaire optimise la qualité des boues destinées au digesteur anaérobie. Cette amélioration qualitative se traduit par une augmentation de l'efficacité de la récupération d'énergie, démontrant que les procédures préliminaires peuvent jouer un rôle déterminant dans la maximisation de la production énergétique.

### 2.6.6. Autres approches uniques et perspectives d'avenir

Le traitement des eaux usées est un enjeu majeur pour de nombreux pays. Cependant, des innovations récentes ont révélé que les eaux usées peuvent être une source d'énergie et non seulement un déchet

à traiter. Les études menées dans divers pays montrent des avancées technologiques et offrent des perspectives d'avenir pour un traitement durable des eaux usées.

Au **Mexique**, la recherche de Ortiz-Sánchez et Cuevas-Rodriguez (2023) s'est penchée sur la digestion anaérobie comme moyen de production de biogaz. Leur travail suggère que cette source d'énergie renouvelable pourrait répondre à une grande partie des besoins énergétiques des stations d'épuration du pays.

**En Australie**, l'approche de Li et al. (2017) a été de réaliser une évaluation complète des impacts environnementaux et économiques de différentes méthodes de valorisation énergétique des boues d'épuration. Ils ont souligné le rôle de la digestion anaérobie pour réduire les émissions de gaz à effet de serre et la potentialité de récupérer des cendres qui pourraient servir d'amendements pour les sols.

**En Égypte**, les travaux de Abdel Wahaab et al. (2020) et Helal et al. (2013) ont mis en avant l'importance d'une stratégie nationale pour valoriser énergétiquement les boues d'épuration et d'utiliser différentes technologies pour rendre les stations d'épuration énergétiquement autonomes.

**En Iran et en Espagne**, le potentiel de la microhydroélectricité dans les systèmes de distribution d'eau et les réseaux d'eaux usées a été exploré. Les recherches menées par Hamlehdar et al. (2022), Mérida García et al. (2021), et Llácer-Iglesias et al. (2020) ont montré que l'intégration de microturbines et de micro-machines hydrauliques pourrait être une solution viable pour rendre ces systèmes énergétiquement durables.

**En Grèce**, Karagiannidis et al. (2011) ont étudié comment les boues d'épuration peuvent être intégrées dans une stratégie de valorisation énergétique, en utilisant des méthodes comme la digestion anaérobie, le séchage des boues et la combustion.

*Ces études montrent un changement de paradigme dans la manière dont nous percevons et traitons les eaux usées, suggérant un avenir où les stations d'épuration deviennent des centres de production d'énergie. En ce qui concerne la **Tunisie**, il est essentiel d'explorer ces méthodologies innovantes. L'adoption de la digestion anaérobie, des piles à combustible microbiennes, ou l'intégration de sources d'énergie renouvelable peut offrir une solution durable pour le traitement des eaux usées tout en répondant aux besoins énergétiques. Toutefois, une approche adaptée, basée sur des études de faisabilité approfondies, est cruciale pour garantir le succès de ces initiatives.*

## 2.7. Explorer les défis et les opportunités de la récupération énergétique des eaux usées : aperçus d'études de cas mondiales

La quête de valorisation énergétique des eaux usées est un enjeu global qui dévoile un éventail de défis et d'opportunités. En plongeant dans une analyse détaillée des expériences internationales dans ce domaine, on est confronté à une mosaïque de défis et de réussites qui témoignent des intrications complexes rencontrées lors de l'adoption de telles stratégies énergétiques. Saisir ces nuances est fondamental pour assurer un transfert technologique réussi et une adoption adaptée.

Ce panorama est d'autant plus crucial pour les nations qui envisagent d'entreprendre cette démarche transformatrice, à l'image de la Tunisie. Dans ce contexte, s'inspirer des leçons apprises des expériences internationales pourrait s'avérer être un guide précieux, permettant de naviguer avec assurance vers une transition énergétique et écologique efficiente.

### 2.7.1. Défis : de la complexité technologique à la perception du public

Lorsque l'on s'aventure dans le domaine de la valorisation énergétique des eaux usées, un ensemble de défis se présente. D'abord, le défi technologique. Les technologies avancées comme le système de digestion anaérobie à Marrakech ou la technologie de cellule d'électrolyse microbienne en Arabie



Saoudite, nécessitent des investissements conséquents. De plus, une expertise technique est requise pour assurer leur bon fonctionnement.

Par ailleurs, les conditions infrastructurelles et géographiques peuvent constituer un autre obstacle, comme le montrent les exemples de l'Espagne et de l'Iran avec l'hydroélectricité à faible chute. En Tunisie, pays majoritairement plat, identifier des sites adaptés peut se révéler complexe. Et cela, sans compter le coût potentiel lié à la modification ou à la création d'infrastructures hydrauliques.

Le cadre réglementaire joue aussi un rôle crucial. La Suède, grâce à sa législation solide, a pu intégrer efficacement la valorisation énergétique des eaux usées. À l'inverse, l'environnement législatif tunisien pourrait ne pas être aussi favorable, constituant ainsi un frein potentiel.

La perception publique est tout aussi essentielle. Comme le montre le cas égyptien, la stigmatisation liée à la récupération d'énergie des eaux usées peut entraver l'adhésion populaire. Ainsi, pour assurer une adoption réussie, il est crucial de changer cette perception.

Un autre aspect à considérer est la qualité des déchets. Une qualité variée des déchets, comme évoqué dans l'étude chinoise, influence directement le rendement énergétique. Le défi est d'assurer un approvisionnement constant en déchets de haute qualité.

L'adaptation technologique est également une préoccupation. Le cas de l'Arabie Saoudite illustre la complexité d'ajuster une technologie aux spécificités locales, nécessitant des investissements en recherche et développement ainsi qu'une expertise pointue.

Finalement, les défis opérationnels, comme ceux rencontrés à Marrakech, relatifs à la digestion anaérobie, ne doivent pas être négligés. Assurer un fonctionnement optimal des systèmes est crucial pour maximiser la récupération d'énergie.

Par conséquent, pour réussir la transition vers une valorisation énergétique efficace des eaux usées, il faut surmonter un ensemble de défis : technologiques, infrastructurels, réglementaires, perceptuels, et opérationnels. Ces défis, interconnectés, exigent une stratégie globale, des investissements soutenus, une recherche constante et une sensibilisation efficace du public.

### **2.7.2. Opportunités : Les multiples avantages de la valorisation énergétique des eaux usées**

Reconnaître et surmonter les défis est crucial, mais il est tout aussi essentiel de saisir les opportunités offertes par la valorisation énergétique des eaux usées. Les bénéfices potentiels sont, en effet, vastes et diversifiés.

Premièrement, la perspective de produire de l'énergie par diverses méthodes est séduisante. À Marrakech par exemple, l'alliance de la digestion anaérobie à l'énergie solaire optimise la production énergétique. Dans un pays ensoleillé comme la Tunisie, une stratégie similaire pourrait offrir un rendement énergétique conséquent.

De surcroît, cette valorisation propose une solution durable à la gestion des déchets. La station d'épuration de Bekkelaget à Oslo en est l'illustration parfaite, transformant le déchet en ressource. Un modèle que la Tunisie pourrait envisager comme exemple.

Les bénéfices économiques, malgré des coûts d'installation initiaux, se manifestent sur le long terme. L'exemple croate nous démontre que les économies réalisées grâce à la récupération d'énergie peuvent rapidement amortir les investissements.

Par ailleurs, diversifier les sources d'énergie grâce à la valorisation énergétique renforce la sécurité énergétique d'un pays. Comme l'illustre le cas chinois, cette approche permet une moins grande dépendance vis-à-vis des énergies traditionnelles.

L'évolution technologique présente aussi des opportunités. L'innovation constante, comme celle des piles à combustible microbiennes en Arabie Saoudite, ouvre des portes à des méthodes de récupération d'énergie encore plus efficaces.

Dans le contexte actuel de lutte contre le changement climatique, valoriser l'énergie des eaux usées revêt une importance cruciale. Capturer des gaz à effet de serre comme le méthane et les convertir en énergie présente un double avantage pour notre environnement.

Économiquement, le déploiement de ces technologies peut stimuler le marché du travail local. L'initiative de Stockholm en témoigne, ayant créé de multiples emplois dans divers secteurs liés à la mise en œuvre du projet.

Enfin, sur le plan sanitaire, le traitement efficace des eaux usées empêche la propagation des maladies liées à l'eau, améliorant ainsi la santé publique.

Ainsi, les perspectives offertes par la valorisation énergétique des eaux usées sont nombreuses : de la diversification de la production énergétique à l'amélioration de la santé publique, en passant par la stimulation économique. Autant d'opportunités que la Tunisie pourrait exploiter en investissant dans cette voie.

*L'analyse de diverses études de cas internationales montre que, malgré d'importants défis tels que la complexité technologique, les besoins en infrastructure et la qualité changeante des déchets, la valorisation énergétique des eaux usées demeure une option viable et bénéfique. Pour la Tunisie, l'examen de ces études donne un éclairage sur les avantages potentiels de l'adoption de démarches analogues.*

*Grâce à une sélection rigoureuse et à la mise en œuvre de technologies de pointe, notamment la digestion anaérobie, les piles microbiennes et d'autres méthodes énergétiques durables, il est possible de transformer les déchets en une source d'énergie précieuse. Ces progrès technologiques sont essentiels pour atteindre des objectifs tels que la durabilité, la résistance aux changements climatiques et d'autres défis cruciaux pour la Tunisie.*

*Les bénéfices s'étendent au-delà de la simple innovation technologique, englobant également des enjeux tels que la lutte contre le changement climatique, la création d'emplois et le renforcement de la santé publique. Cela démontre que l'alliance d'une gestion éclairée et de choix technologiques adaptés peut générer des impacts significatifs.*

*Cependant, un point est clair dans ces études : il n'existe pas de solution unique pour la valorisation énergétique des eaux usées. Chaque approche doit être adaptée aux particularités de chaque pays, prenant en compte la qualité et le volume des eaux usées, le contexte technologique, les dimensions socio-économiques et les impératifs environnementaux. Alors que la Tunisie envisage de se lancer dans la valorisation énergétique des eaux usées, ces études internationales fournissent des directives précieuses. En abordant intelligemment ces enjeux tout en exploitant les opportunités, la Tunisie a le potentiel de transformer son système de traitement des eaux usées en une centrale énergétique.*

#### **Encadré 1 : Étude de cas - La station d'épuration des eaux usées de Marselisborg au Danemark (Danfoss, 2023)**

**Située à Aarhus, la station d'épuration des eaux usées de Marselisborg sert de modèle éloquent quant à la capacité des technologies de valorisation énergétique à révolutionner le traitement des eaux usées.**

**Ayant opéré une transformation radicale, cette usine est désormais un producteur net d'énergie, générant 150 % de l'électricité dont elle nécessite pour son fonctionnement. L'énergie excédentaire est vendue au réseau électrique local, enrichissant d'autant le bouquet énergétique renouvelable de la municipalité. Cette transition s'est opérée grâce à**

**l'introduction de technologies de contrôle et d'automatisation avant-gardis s à l'adoption de méthodes et d'équipements ciblant une efficacité énergétique optimale.**

L'une des technologies phares de cette station est la digestion anaérobie des boues, processus qui engendre du biogaz. Celui-ci est par la suite converti en électricité et en chaleur via une unité de cogénération. De surcroît, des systèmes d'automatisation avancés sont mis à contribution pour peaufiner la digestion anaérobie, garantissant ainsi un rendement maximal en biogaz.

En outre, Marselisborg est dotée d'un système novateur de gestion énergétique, s'appuyant sur des données actualisées en continu pour affiner le pilotage énergétique de la station. Grâce à cela, les dispositifs les plus énergivores, tels que les pompes et les ventilateurs, sont optimisés dans leur fonctionnement.

La réussite de cette initiative repose sur une dynamique collaborative ayant rassemblé divers acteurs, incluant les entités publiques, l'équipe de la station, les prestataires technologiques et la population locale. Cet esprit d'ouverture a favorisé un partage riche en termes de savoir-faire et d'expérience, s'avérant crucial pour déployer des solutions adaptées et franchir les défis.

La station de Marselisborg est donc une démonstration convaincante : équipées des outils adéquats, les stations d'épuration peuvent transcender leur mission première pour s'ériger en champions d'une transition énergétique résolument tournée vers l'avenir.

#### **Encadré 2. Le Pakistan transforme ses défis en opportunité : La valorisation énergétique des eaux usées (Gul et al., 2021)**

Confronté à une croissance exponentielle de sa demande énergétique, impulsée par une urbanisation effrénée et une industrialisation fulgurante, le Pakistan a habilement capitalisé sur ses eaux usées industrielles en les convertissant en une précieuse source d'énergie verte. Cette prouesse découle principalement de l'intégration de digesteurs anaérobies haute performance dans des domaines industriels spécifiques tels que les sucreries, distilleries et textiles, générant d'importantes quantités d'eaux usées chargées en matières organiques.

Le biogaz issu de cette transformation se présente comme une alternative énergétique pérenne, avec l'atout supplémentaire de contribuer activement à la dépollution, en valorisant des déchets potentiellement nuisibles. D'après les estimations, le potentiel de production de biogaz au Pakistan, en se basant uniquement sur les eaux usées industrielles, pourrait s'élever à quelque 3,5 millions de m<sup>3</sup> par jour.

Néanmoins, l'instauration de cette démarche innovante ne s'est pas faite sans heurts. Parmi les entraves notoires figurent les coûts initiaux conséquents, un déficit en expertise technique et l'impérieuse nécessité d'établir un cadre réglementaire plus robuste pour stimuler l'adhésion à ces technologies.

En dépit de ces écueils, le succès retentissant du Pakistan dans la mise en place de projets de valorisation énergétique s'affiche comme une source d'inspiration pour d'autres nations. Ce succès témoigne de la capacité à convertir les défis posés par la gestion des déchets en chances de générer une énergie propre tout en préservant l'environnement. Ce modèle, en parallèle, favorise le dynamisme économique en allégeant le fardeau énergétique des industries, incarnant ainsi les bénéfices tangibles d'une transition vers une économie circulaire.

L'expérience pakistanaise est une preuve éloquentes du potentiel inhérent à l'ion énergétique des eaux usées, même en présence d'obstacles. Elle souligne l'importance de stimuler l'innovation, d'accentuer l'appui politique et de développer les compétences nécessaires, propulsant ainsi le pays vers un futur empreint de durabilité et d'autonomie énergétique.

### Encadré 3 : Les multiples bienfaits de la valorisation du biogaz par digestion anaérobie des eaux usées (World Biogas Association, 2021)

La digestion anaérobie (DA) est une technologie avant-gardiste qui transforme la matière organique présente dans les eaux usées en biens précieux comme le biogaz et les biofertilisants. En scrutant de près le rôle de la DA, plusieurs avantages notables se dégagent :

- 1. Génération d'énergie verte :** La DA métamorphose les déchets organiques en biogaz, un mélange essentiellement composé de méthane (CH<sub>4</sub>) et de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Ce biogaz peut alimenter des systèmes de chauffage ou de production d'électricité, ou encore être affiné en biométhane pour intégrer le réseau de gaz naturel ou alimenter des véhicules.
- 2. Diminution de l'empreinte déchets :** La DA contribue à une baisse significative du volume et de la masse des déchets organiques, allégeant ainsi la logistique et les coûts liés à leur gestion.
- 3. Rôle clé contre le changement climatique :** Recourir au biogaz comme source d'énergie diminue drastiquement les émissions de gaz à effet de serre comparativement aux énergies fossiles conventionnelles. De surcroît, la DA prévient la libération spontanée de méthane – gaz à effet de serre particulièrement actif – issu de la décomposition des déchets organiques.
- 4. Valorisation des éléments nutritifs :** La DA génère un biofertilisant, le digestat, qui est enrichi en éléments nutritifs. Ce sous-produit peut être employé en agriculture pour rehausser la qualité des sols, promouvoir une agriculture respectueuse de l'environnement et s'inscrire dans une démarche d'économie circulaire.
- 5. Impulsion économique et sociale :** La conception, la construction et la gestion d'infrastructures dédiées à la DA peuvent générer des emplois et dynamiser l'économie locale. Par ailleurs, une adoption massive de cette technologie renforce la sécurité énergétique et instaure une gestion plus durable des déchets, consolidant ainsi la résilience sociale et favorisant un développement pérenne.

Cet éventail d'atouts dépeint clairement le potentiel de la DA en matière de production de biogaz comme pivot central dans les démarches de gestion écologique des eaux usées. Il consacre également la DA comme un outil incontournable pour concrétiser des ambitions à la fois environnementales, sociales et économiques.

## 3. Valorisation énergétique des eaux usées en Tunisie : options et applicabilité

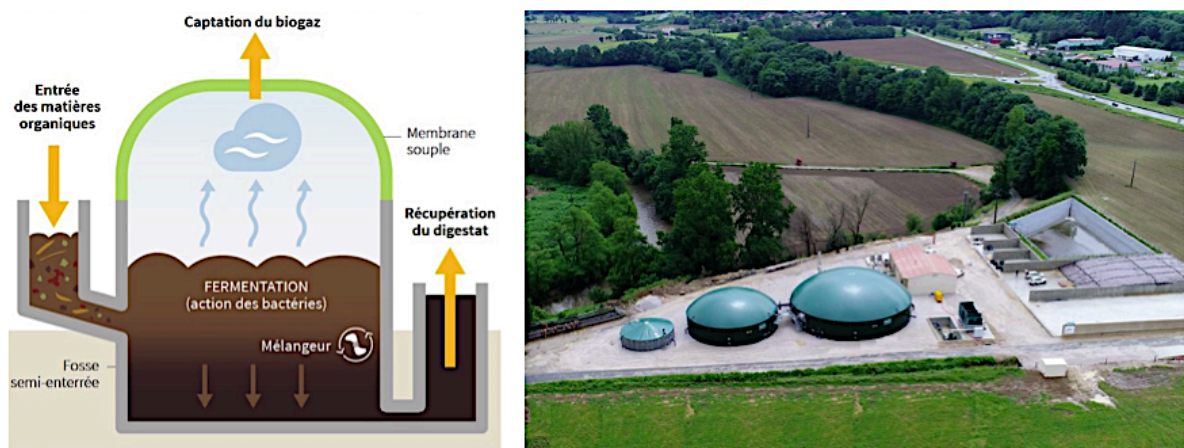
Les eaux usées et les boues d'épuration, souvent perçues comme des déchets, sont une source précieuse de production d'énergie renouvelable. En Tunisie, cette source demeure insuffisamment exploitée, bien que le nombre de STEPs ait connu une croissance régulière, atteignant 125 stations en 2021.

### 3.1. Technologies de Production de Biogaz

La conversion des eaux usées en énergie pourrait constituer une stratégie rentable pour la Tunisie, métamorphosant ainsi un problème environnemental en opportunité économique. Le biogaz issu de la digestion anaérobie des boues d'épuration est une technologie éprouvée, déjà mise en œuvre dans divers pays à travers le monde.

#### 3.1.1. Méthanisation

La méthanisation est un processus anaérobie qui permet la dégradation de la matière organique en l'absence d'oxygène, conduisant à la production de biogaz. Ce biogaz, est composé principalement de méthane (50-70%), de dioxyde de carbone (30-45%), avec des traces d'azote, d'oxygène, d'hydrogène sulfuré et d'autres composés. La proportion de méthane est un facteur clé déterminant la qualité énergétique du biogaz.



**Figure X** : Schéma d'un méthaniseur (source : Chareyron et al., 2021)

Couturier et al. (2001) et Peregrina et al. (2008) fournissent des données précieuses concernant ce processus. Pour chaque tonne de matières volatiles dégradées, il est possible de produire en moyenne 550 m<sup>3</sup> de biogaz. Lorsqu'on s'intéresse spécifiquement aux matières sèches introduites, cette production est d'environ 225 m<sup>3</sup>/tonne. En termes énergétiques, si le biogaz contient 60% de méthane, cela équivaut à la puissance de 0,5 l de diesel ou encore 2 kWh d'électricité.

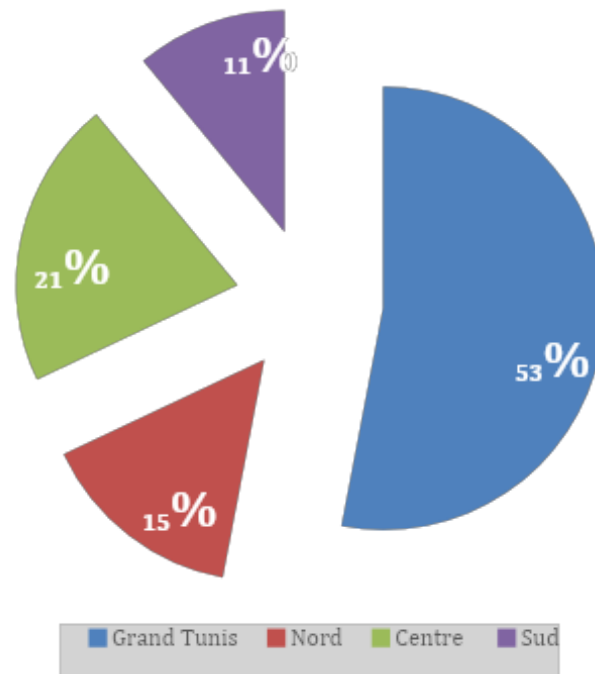
Pour illustrer davantage, si l'on se base sur les données précédemment évoquées pour le Grand Tunis, à savoir une production de boue s'élevant à 152 800 tonnes à 25% de siccité, la potentialité en matière de production de biogaz est conséquente. En utilisant le ratio de Couturier et al. (2001) de 225 m<sup>3</sup>/tonne de matières sèches introduites, cela représente un potentiel de 34 380 000 m<sup>3</sup> de biogaz pour cette seule région. En équivalents énergétiques, cela se traduit par une économie d'environ 17 190 000 litres de diesel ou la production de 68 760 000 kWh d'électricité.

La mise en œuvre pratique de la méthanisation peut se faire via diverses installations. Une des plus accessibles et efficaces est le réacteur anaérobie compartimenté. Son fonctionnement, s'inspirant du concept de fosse septique améliorée, rend sa construction et son entretien relativement abordables. Sa capacité à traiter une grande quantité de matière organique tout en minimisant les coûts en fait un choix judicieux pour les régions à forte production de boue, à l'image du Grand Tunis.

De plus, l'aspect économique n'est pas le seul avantage de ces réacteurs. Ils présentent aussi des

bénéfices environnementaux notables. En transformant la matière organique en biogaz, on évite la libération de méthane – un gaz à effet de serre puissant – dans l'atmosphère. Cette utilisation du méthane comme source d'énergie contribue donc également à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

8

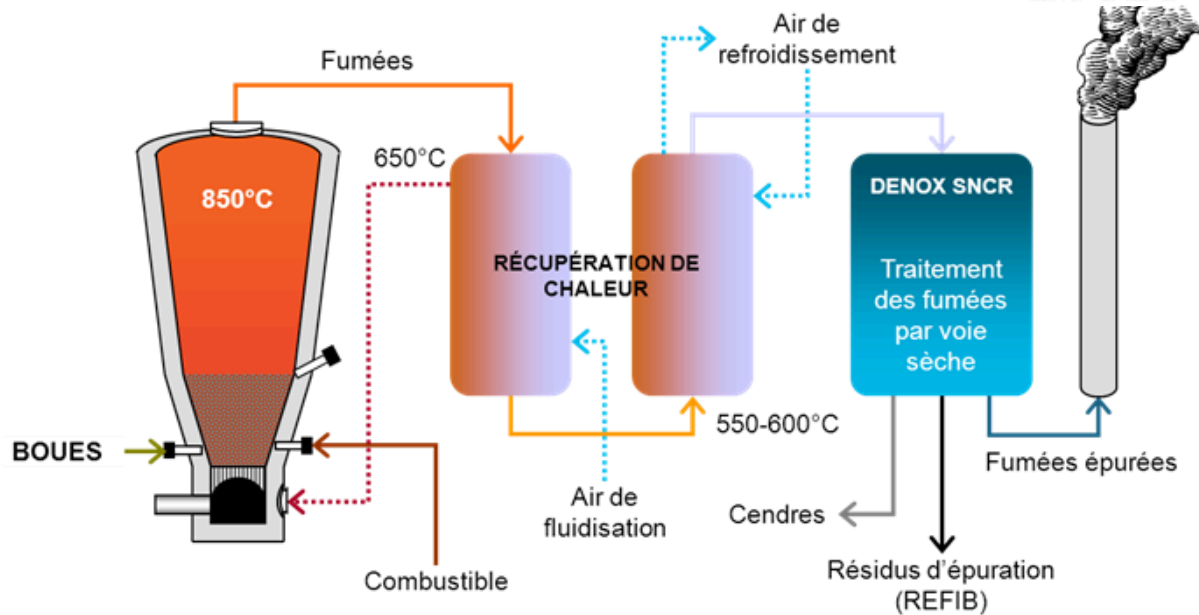


**Figure X.** La répartition régionale de la production de la boue (ONAS, 2022)

### 3.1.2. Co-génération

La co-génération, en tirant parti des avantages de la méthanisation, offre une double utilité : la production simultanée de chaleur et d'électricité à partir d'une seule source, le biogaz. C'est une démarche écoénergétique qui maximise l'utilisation de chaque m<sup>3</sup> de biogaz produit. Couturier et al. (2001) et Peregrina et al. (2008) avaient déjà souligné l'efficacité de la méthanisation, avec une production moyenne de 550 m<sup>3</sup> de biogaz par tonne de matière volatile dégradée. Converti en énergie, ce biogaz peut équivaloir à 0,5 l de diesel ou 2 kWh d'électricité par mètre cube.





**Figure X :** Exemple d'incinérateur – Thermylis™ (Source : Suez)

Les données de 2021 montrent une tendance croissante de la consommation énergétique des stations d'épuration (STEPS) en Tunisie, atteignant 126 GWh/an. Dans le même temps, ces stations produisaient 186 000 m<sup>3</sup> de boues par an. En décomposant ce volume, nous remarquons que 68 000 m<sup>3</sup> de ces boues subissent une déshydratation mécanique et que 118 000 m<sup>3</sup> sont séchés naturellement. Ces boues déshydratées, en plus de leur potentiel en matière de méthanisation, représentent une ressource énergétique inexploitée que la co-génération pourrait valoriser.

**Tableau X :** Équivalence énergétique de 1 m<sup>3</sup> de biogaz contenant 60% de CH<sub>4</sub>

Substance/Énergie	Quantité équivalente à 1 m <sup>3</sup> de biogaz
<b>Diesel</b>	0,5 l
<b>Charbon</b>	1,39 kg
<b>Bois sec</b>	4,34 kg
<b>Butane</b>	0,42 kg
<b>Électricité</b>	2 kWh

Les analyses régionales fournissent des informations supplémentaires. Le Grand Tunis, en tant que principal producteur de boues avec 53% de la production totale, se positionne comme une zone stratégique pour les installations de co-génération. Les régions du Centre, du Nord et du Sud suivent avec des contributions respectives de 21%, 15% et 11%. Installer des unités de co-génération dans ces zones permettrait non seulement d'optimiser la valorisation énergétique des boues, mais aussi de fournir de l'électricité et de la chaleur là où elles sont le plus nécessaires.

En matière de qualité, il est essentiel de veiller à ce que la concentration des métaux lourds dans les boues soit régulièrement surveillée. Les valeurs actuelles, pour des éléments tels que le cadmium, le cuivre et le plomb, sont bien inférieures aux limites établies par la norme NT106.20, assurant ainsi la viabilité de cette ressource pour la production énergétique.

La Tunisie se présente donc avec un double avantage : une ressource sous-exploitée avec les boues d'épuration et une technique de valorisation énergétique via la co-génération. Cette synergie pourrait non seulement renforcer le portefeuille énergétique du pays, mais également proposer une solution

durable pour la gestion des déchets issus des eaux usées. Une mise en œuvre juicuse et une attention continue à la qualité des boues, est cependant impérative pour garantir la réussite et la durabilité de ce projet.

### 3.1.3. Applicabilité et coûts

L'adoption d'une technologie de traitement adaptée, comme celle des eaux usées, en Tunisie dépend largement des spécificités du contexte local et des besoins énergétiques. Parmi les technologies disponibles, les digesteurs à lits fixes et à phase séparée se distinguent comme des options viables. Néanmoins, le choix entre méthanisation et co-génération ne se limite pas uniquement à la technologie ; il englobe une série de facteurs tels que les coûts d'installation, d'exploitation, le prix actuel de l'électricité et les orientations politiques gouvernementales en vigueur.

Les réacteurs anaérobies compartimentés (RAC), évolutions des fosses septiques traditionnelles, représentent une option avantageuse en termes de coûts, de facilité de construction et d'utilisation. Leur design compartimenté permet une meilleure décomposition anaérobie en retenant efficacement la matière et en dégradant la matière organique de manière optimale. De plus, leur format compact les rend idéaux pour les régions à espace limité, comme certaines zones urbaines de la Tunisie.

Pour mieux comprendre l'aspect financier, considérons les coûts de la co-génération. Les turbines à vapeur nécessitent un investissement de 900 à 2100 €/kW installé avec un coût d'entretien de 0,15 à 0,23 €/cents/kWh. Les turbines à gaz coûtent entre 400 et 900 €/kW installé et leur entretien varie entre 0,48 et 0,53 €/cents/kWh. Les moteurs à gaz oscillent entre 245 et 6800 €/kW installé, avec des coûts d'entretien variant entre 0,60 et 3,25 €/cents/kWh. Enfin, les moteurs diesel se situent entre 550 et 2650 €/kW installé avec un coût d'entretien de 0,44 à 2,66 €/cents/kWh.

En considérant le potentiel de la Tunisie, le Grand Tunis en particulier, avec sa production conséquente de boues d'épuration, l'installation de RAC pourrait non seulement traiter ces déchets mais aussi fournir une énergie renouvelable. Cela contribuerait à réduire la dépendance aux combustibles fossiles, diminuer les dépenses énergétiques et offrir une solution durable pour la gestion des déchets.

Toutefois, la mise en œuvre de telles technologies présente des défis. L'analyse de la qualité des boues est primordiale, les concentrations de métaux lourds, par exemple, doivent rester en dessous des seuils fixés par la norme NT106.20 pour garantir un biogaz sûr et de qualité.

Les avantages directs et indirects de ces projets, tels que la création d'emplois et la stimulation du marché des équipements locaux, sont notables. Cependant, pour un succès durable, il est indispensable de renforcer les compétences techniques locales, de sensibiliser les parties prenantes et de mettre en place un cadre réglementaire adéquat.

La Tunisie est à un tournant crucial. D'une part, la valorisation énergétique des eaux usées offre une opportunité d'or pour le pays en termes économiques, environnementaux, et énergétiques. D'autre part, pour concrétiser cette opportunité, des investissements ciblés, une planification rigoureuse, et une réglementation adaptée sont impératifs. Toutefois, la prise de décision devra tenir compte de l'ensemble des facteurs, notamment techniques, économiques et réglementaires, pour assurer une mise en œuvre efficace et durable.

### 3.2. Approches thermiques

Les approches thermiques offrent une voie prometteuse pour la valorisation énergétique des eaux usées et des boues d'épuration en Tunisie. L'hydrolyse thermique et la récupération de chaleur, bien que déjà décrites dans la section 2, peuvent jouer un rôle crucial dans l'optimisation de la chaîne de valeur de traitement des eaux usées et de production d'énergie.

En se basant sur les données disponibles et sur le contexte tunisien, il est essentiel d'étudier l'applicabilité des approches thermiques pour la valorisation énergétique des eaux usées. La production annuelle de boues issues des stations d'épuration, en particulier dans le Grand Tunis, qui



représente 53% de la production totale de boues, offre une opportunité considérable de technologies thermiques.

### 3.2.1. Hydrolyse Thermique

Dans le contexte actuel du traitement des boues, l'hydrolyse thermique émerge comme une solution potentiellement révolutionnaire. L'examen des données disponibles pour la région du Grand Tunis en 2021 révèle des chiffres particulièrement significatifs. La région a généré 153 000 tonnes de boues à un taux de siccité de 25%. Ce volume représente 53% de la production nationale de boue, équivalant à 99,11 milles tonnes.

L'intérêt pour l'hydrolyse thermique réside principalement dans sa capacité à améliorer le rendement de production de biogaz. Considérant une consommation énergétique annuelle pour les STEPs à 126 Gwh en 2021, une augmentation de rendement de 20%, résultant de l'intégration de l'hydrolyse thermique, se traduirait par une production accrue de 19 822 tonnes de biogaz pour la seule région du Grand Tunis. Cette augmentation pourrait offrir une réduction substantielle de la consommation énergétique des STEPs, un aspect crucial pour une gestion énergétique durable.

Par ailleurs, l'hydrolyse thermique pourrait induire une réduction notable du volume de boues à traiter. Pour mettre ces chiffres en perspective, en 2021, le volume de boues déshydratées mécaniquement était de 68 000 m<sup>3</sup>, tandis que les boues séchées naturellement s'élevaient à 118 000 m<sup>3</sup>. Les implications économiques d'une telle réduction sont considérables, en tenant compte des coûts associés à la gestion des boues.

De plus, en 2021, seulement 5 600 tonnes de boues ont trouvé une application en agriculture. Ainsi, l'hydrolyse thermique pourrait potentiellement augmenter la valorisation énergétique des boues, offrant d'autres avenues d'application.

Toutefois, il convient de noter que l'adoption de cette technologie comporte des défis, notamment en termes d'investissement initial et de compétences techniques requises. Néanmoins, au regard des avantages quantitatifs énumérés ci-dessus, l'intégration de l'hydrolyse thermique mériterait une analyse plus approfondie dans les stratégies de gestion des boues du Grand Tunis.

**Tableau X.** Potentiel des boues déshydratées par région et par STEP en Tunisie (ONAS, 2022)

Région	STEP	Boues à 25% de siccité (tMB/an)	Quantités après séchage sous-serres (85%)
<b>Grand Tunis</b>	El Attar	24 500	
	Pôle Sud Meliane	52 600	
	Charguia et Chotrana I	52 300	
	Choutrana II	23 400	
	<b>Total Grand Tunis</b>	<b>152 800</b>	<b>54 000 tonnes</b>
<b>Nord</b>	Hammamet Sud	3 180	
	SE 3 Nabeul	840	
	SE 4 Nabeul	9 080	
	Kélibia	2 740	
	Solimane II	3 240	
	Béja	6 860	
	<b>Total Nord</b>	<b>30 186</b>	<b>11 000 tonnes</b>
<b>Centre</b>	Sousse Nord 1	40 800	
	Sousse Hamdoun Sahline	4 200	
	Sayada	700	
	Monastir Frina	6,2	

	Kairouan 2	11,6	
	<b>Total Centre</b>	<b>63 500</b>	<b>23 000 tonnes</b>

**Note :** Le tableau représente à la fois le potentiel de chaque STEP à 25% de siccité et les quantités totales par région après séchage sous serres à 85%.

### 3.2.2. Récupération de chaleur

Comme indiqué précédemment, en 2021, la Tunisie a enregistré une consommation énergétique des STEPs de 126 Gwh/an, soulignant la nécessité de développer des stratégies d'optimisation énergétique pour minimiser les coûts associés. Une quantité importante de chaleur produite par les STEPs est inutilement disséminée dans l'environnement. Si cette chaleur était captée et réutilisée, cela pourrait induire une diminution considérable de la consommation énergétique. Selon certaines projections, une réduction énergétique s'échelonnant de 10 à 20% pourrait se traduire par une économie allant de 12,6 à 25,2 Gwh/an.

La position géographique de la Tunisie, caractérisée par une forte insolation, présente une opportunité inestimable d'associer l'énergie photovoltaïque au processus de récupération thermique. Cette synergie pourrait intensifier l'efficacité de la récupération de chaleur et ainsi réduire de manière substantielle la consommation nette d'énergie, optimisant ainsi l'efficacité énergétique des STEPs. Le déploiement de 9 véhicules d'inspection munis de caméras dans le réseau illustre clairement l'orientation technologique progressive de la Tunisie. Cette inclination annonce une adéquation prometteuse pour l'intégration de technologies avant-gardistes en matière de récupération de chaleur, assurant une compatibilité avec les systèmes en place et une gestion énergétique optimisée.

Les données relatives aux 187 milles tonnes de boues, avec une siccité de 25% produites en 2021, mettent en exergue des possibilités économiques significatives. Si la récupération de chaleur sur chaque tonne de boues induisait une économie de 0,1 Gwh, cela pourrait se traduire par une réduction avoisinant les 9.35 Gwh pour cette année-là, équivalant à une baisse de 7,4% de la consommation annuelle des STEPs.

Cette stratégie favorise une approche énergétique plus respectueuse de l'environnement et, avec sa complémentarité avec le solaire, réduit la dépendance vis-à-vis des énergies non renouvelables. À long terme, l'adoption de ces mécanismes pourrait engendrer des économies opérationnelles appréciables. Tandis que l'instauration de technologies de récupération de chaleur requiert un investissement initial, le rendement énergétique envisagé garantit un retour sur investissement alléchant, positionnant cette démarche comme non seulement rentable, mais aussi pérenne. Ainsi, la récupération de chaleur se présente comme une avenue prometteuse pour la Tunisie, lui permettant de maximiser son efficacité énergétique, d'atténuer ses dépenses opérationnelles, et de s'orienter résolument vers des solutions écologiquement viables et durables.

### 3.2.3. Applicabilité et coûts

Les méthodes thermiques représentent une avenue prometteuse pour la Tunisie, offrant des avantages non négligeables en matière d'efficacité énergétique. La valeur ajoutée de ces approches est accentuée lorsqu'on considère les caractéristiques uniques du climat tunisien et les besoins énergétiques croissants des STEPs. Néanmoins, avant de s'engager dans la mise en œuvre de ces technologies, il est impératif d'adopter une démarche analytique. Il s'agit de considérer minutieusement les coûts associés, les bénéfices attendus, ainsi que les compétences techniques requises pour une mise en place et une gestion optimales.

Il est intéressant de noter qu'en 2021, seules 9 STEPs ont exploré la valorisation des boues, un chiffre qui, bien qu'encourageant, reste modeste. Cette statistique souligne la nécessité d'une expansion stratégique de ces initiatives. Le potentiel d'autres STEPs à intégrer des solutions thermiques innovantes est encore largement inexploité.

Pour assurer une gestion pérenne et efficace des ressources énergétiques du pays, il est crucial

d'envisager une généralisation de ces techniques à l'échelle nationale. Cela garantirait une meilleure utilisation de l'énergie mais contribuerait également à positionner la Tunisie comme un leader régional en matière d'innovations énergétiques durables.

### 3.3. Méthodes physico-chimiques de valorisation énergétique

Les avancées technologiques dans le domaine du traitement des eaux usées et de la valorisation énergétique des déchets offrent de nouvelles perspectives pour une gestion optimisée des ressources en Tunisie. Dans ce contexte, les méthodes physico-chimiques se présentent comme des solutions potentielles d'intérêt.

#### 3.3.1 Carbonisation hydrothermale (HTC) et liquéfaction thermo-chimique

En 2021, la Tunisie a produit 187 milles tonnes de boues à 25% de siccité. La HTC, qui convertit les matières organiques en charbon hydrothermal, pourrait trouver une application pertinente dans des régions telles que le Grand Tunis, qui à lui seul produit 53% des boues du pays (soit environ 99,1 milles tonnes). Si cette technologie était déployée efficacement, elle pourrait significativement réduire les volumes de déchets.

La liquéfaction thermo-chimique pourrait également être considérée, notamment dans les régions du Nord et du Centre, qui produisent respectivement 15% (soit 28,05 milles tonnes) et 21% (soit 39,27 milles tonnes) des boues nationales.

#### 3.3.2. Processus d'oxydation avancés (AOP)

Les processus d'oxydation avancés (AOP) se positionnent à la frontière des technologies modernes destinées à optimiser le traitement des eaux usées tout en offrant une perspective énergétique. La consommation énergétique des stations d'épuration en Tunisie, se chiffrant à 126 GWh en 2021, met en lumière un potentiel important d'amélioration, tant du point de vue énergétique qu'environnemental.

Les AOP sont caractérisées par la production de radicaux hydroxyles, des agents oxydants très réactifs. Ces radicaux sont capables de dégrader une large gamme de polluants organiques récalcitrants présents dans les eaux usées, transformant ces polluants en eau, dioxyde de carbone et autres composés inorganiques inoffensifs. Durant cette transformation, il y a libération de chaleur qui, si elle est récupérée et utilisée de manière efficace, peut contribuer à diminuer la dépendance énergétique des stations.

En se basant sur le chiffre de 126 GWh, même une réduction modeste de 5% de cette consommation, grâce à l'efficacité des AOP, se traduirait par une économie d'environ 6,3 GWh par an. Ces économies ne sont pas seulement financières. En réduisant la consommation énergétique, la Tunisie pourrait également diminuer ses émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi à ses engagements internationaux en matière de changement climatique.

De plus, les AOP peuvent améliorer la qualité de l'eau traitée, la rendant plus adaptée à la réutilisation, un aspect capital dans un pays où les ressources en eau sont limitées. En 2021, 60 stations d'épuration étaient concernées par la réutilisation des eaux usées traitées, avec un taux de réutilisation de 22%. En optimisant la qualité de cette eau grâce aux AOP, il est envisageable d'augmenter le taux de réutilisation, contribuant ainsi à une gestion plus durable des ressources hydriques.

Cependant, l'adoption des AOP nécessite des investissements initiaux conséquents, tant en matière d'infrastructures que de formation. Une évaluation détaillée des coûts d'implémentation, de maintenance et d'opération devra être effectuée pour déterminer la viabilité économique de cette technologie en Tunisie.

#### 3.3.3. Applicabilité et coûts

La configuration actuelle des STEPs en Tunisie indique une marge d'amélioration notable en matière de

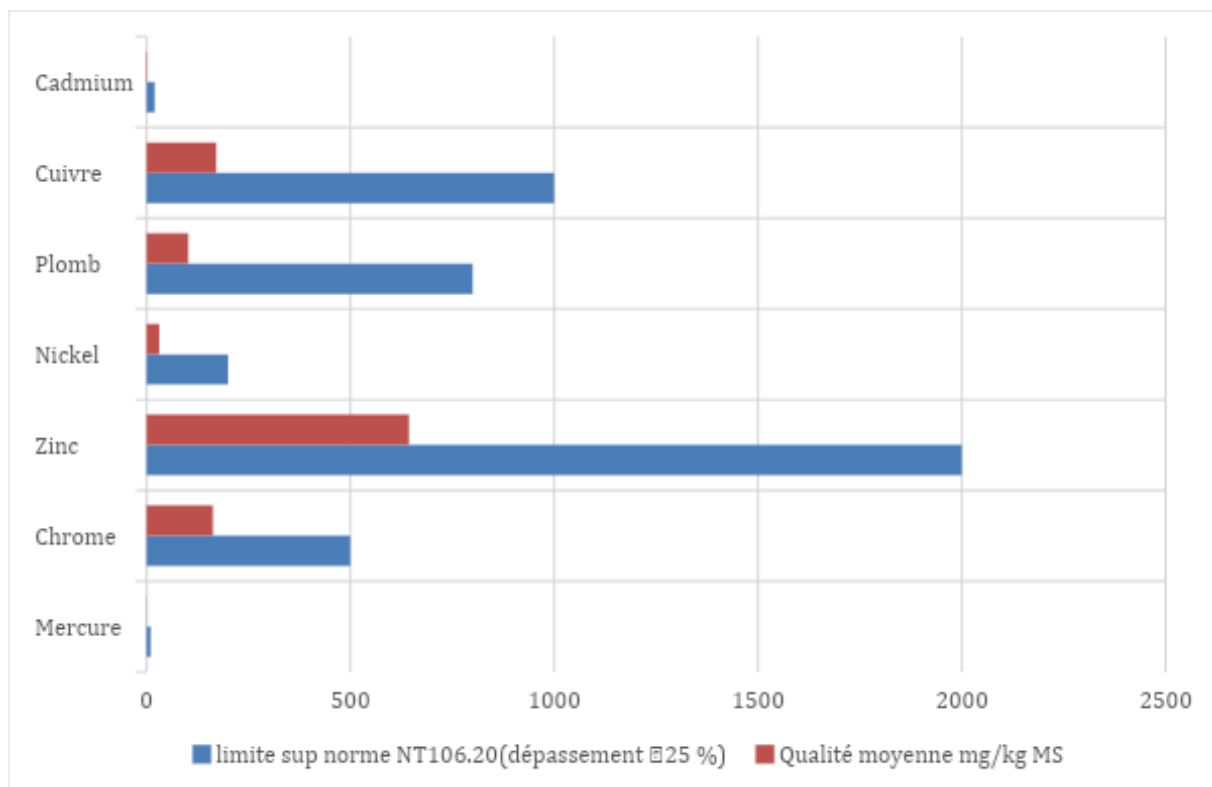
valorisation des boues. Sur les 125 unités enregistrées en 2021, seules 9 se sont conformées à cette valorisation. Intégrer des méthodes physico-chimiques dans ce processus pourrait éventuellement augmenter ce nombre, optimisant ainsi la gestion des ressources et réduisant l'empreinte des déchets.

La composition chimique des boues, notamment leur concentration en métaux lourds tels que le cuivre (170,9 mg/kg MS) et le zinc (643,6 mg/kg MS), est une considération essentielle. Même si ces valeurs sont conformes aux normes réglementaires, il est primordial de garantir leur stabilité. Cela permettrait d'assurer une sécurité environnementale tout en offrant une plus grande flexibilité dans les méthodes de valorisation adoptées.

Cependant, l'aspect financier demeure central dans la décision d'adopter de nouvelles technologies. Les coûts initiaux liés à l'acquisition d'équipements, la formation du personnel, et l'entretien pourraient être substantiels. Néanmoins, en considérant les 187 milles tonnes de boues produites annuellement, leur valorisation pourrait potentiellement permettre des retours sur investissement significatifs. Cela pourrait se manifester par des revenus générés par la vente d'énergie ou de sous-produits, ou encore par les économies réalisées en évitant des méthodes d'élimination coûteuses.

En outre, les avantages indirects, tels que les économies d'énergie, la réduction de la dépendance aux énergies non renouvelables et la diminution de l'impact environnemental, ne doivent pas être négligés.

Cependant, il est à noter que malgré les avantages potentiels des méthodes physico-chimiques, elles ne seraient pas nécessairement les plus appropriées pour le contexte tunisien. La situation financière, les caractéristiques des boues et le climat socio-économique suggèrent la nécessité d'explorer d'autres solutions potentiellement mieux adaptées aux besoins locaux.



**Figure X.** La qualité moyenne des boues pour les métaux lourds (ONAS, 2022)

### 3.4. Énergies renouvelables et intégration

Dans la quête de solutions énergétiques plus durables, les énergies renouvelables représentent une opportunité inestimable pour réduire les émissions de carbone et répondre aux besoins énergétiques croissants. Dans le contexte de la valorisation énergétique des eaux usées en Tunisie, l'intégration des

énergies renouvelables offre une perspective prometteuse pour une production d'énergie propre et durable.

### 3.4.1. Photovoltaïque au sol

L'utilisation de terrains adjacents ou proches des STEPs pour installer des panneaux solaires photovoltaïques au sol peut offrir une double fonctionnalité. D'une part, ces installations produiraient de l'électricité pour alimenter directement les STEPs, réduisant ainsi leur dépendance au réseau électrique conventionnel. D'autre part, elles pourraient contribuer à la valorisation énergétique des eaux usées en fournissant l'énergie nécessaire pour les différents traitements et processus, tels que l'hydrolyse thermique ou l'oxydation avancée.

### 3.4.2. Photovoltaïque flottant (FPV)

Outre l'installation terrestre, la technologie FPV, adaptée aux bassins de décantation ou de traitement des STEPs, offre une alternative ingénieuse. Les panneaux solaires flottants, tout en produisant de l'électricité, réduisent l'évaporation, conservant davantage d'eau dans les bassins. Cette eau conservée peut être réutilisée dans le processus de traitement ou ailleurs. De plus, le refroidissement naturel par l'eau augmente l'efficacité des panneaux solaires, rendant cette solution particulièrement adaptée aux climats chauds de la Tunisie.

### 3.4.3. Applicabilité et coûts

La mise en place de solutions énergétiques renouvelables spécifiques aux STEPs nécessite une évaluation approfondie des coûts et bénéfices. Si le coût initial des installations photovoltaïques au sol est en diminution constante, le potentiel d'auto-alimentation des STEPs rend cet investissement d'autant plus attrayant. Pour le FPV, bien que le coût initial puisse être plus élevé, les avantages en termes de conservation de l'eau et d'efficacité énergétique peuvent justifier l'investissement à moyen et long terme. Dans tous les cas, la valorisation énergétique des eaux usées grâce aux énergies renouvelables pourrait conduire à des STEPs plus autonomes et écologiques.

## 3.5. Approches complémentaires et innovantes

La gestion des eaux usées et leur valorisation, au-delà des méthodes traditionnelles, nécessite une vision holistique et intégrée. La Tunisie, confrontée à divers défis en matière d'assainissement et d'environnement, cherche à exploiter chaque opportunité pour optimiser la valorisation de ses eaux usées. Voici une exploration plus approfondie des approches complémentaires et innovantes envisagées :

### 3.5.1. Plantation d'arbres

**Avantages environnementaux :** La plantation d'arbres autour et sur les terres des STEPs ne se limite pas à des avantages esthétiques. Chaque hectare de forêt peut absorber jusqu'à plusieurs tonnes de CO<sub>2</sub> par an. Si l'on considère les 2734 ha irrigués par les EUT en 2021, cela signifie que des milliers de tonnes de CO<sub>2</sub> pourraient être séquestrées annuellement.

**Avantages socio-économiques :** En plus de promouvoir la biodiversité, ces espaces verts pourraient offrir des espaces de loisir pour les communautés locales. Ils pourraient aussi stimuler le tourisme écologique, générant ainsi des revenus supplémentaires pour la région.

**Avantages opérationnels :** Les arbres, en particulier les espèces à racines profondes, peuvent jouer un rôle dans l'assainissement naturel en filtrant certaines impuretés des eaux usées. C'est une méthode écologique qui complète les processus de traitement conventionnels.

### 3.5.2. Valorisation diversifiée

**Optimisation de la boue :** Avec 187 milles tonnes de boues produites en 2021 à une siccité de 25%, la Tunisie possède une ressource sous-exploitée. La valorisation de cette boue en compost, en matériaux de construction ou même en biocarburant pourrait offrir de nouvelles sources de revenus. Par

exemple, les 54 000 tonnes séchées à 85% dans le Grand Tunis pourraient alimenter des fermes locales, réduisant ainsi la dépendance à l'importation de certaines matières premières.

**Qualité des boues :** Toutefois, la teneur en métaux lourds doit être surveillée. Avec une moyenne de 170,9 mg/kg MS pour le cuivre et 643,6 mg/kg MS pour le zinc, bien que conforme aux normes, la surveillance est primordiale pour garantir une valorisation sûre et sans risque.

### 3.5.3. Applicabilité et coûts

**Investissements nécessaires :** L'introduction de ces méthodes nécessite des investissements initiaux. Que ce soit pour la plantation d'arbres ou l'achat de technologies pour la valorisation des boues, des coûts initiaux sont à prévoir.

**Retour sur investissement :** Cependant, les avantages à long terme, tant économiques qu'environnementaux, peuvent surpasser les dépenses initiales. Les revenus générés par le tourisme écologique, la vente de compost ou d'autres produits dérivés de la boue peuvent compenser et même dépasser les coûts initiaux.

**Collaborations et partenariats :** Pour réduire ces coûts et accélérer l'adoption de ces méthodes, des partenariats public-privé ou des collaborations avec des organisations internationales pourraient être envisagés. Ces collaborations pourraient également apporter une expertise technique et opérationnelle à la Tunisie dans sa quête d'innovation dans la gestion des eaux usées.

## 3.6. Cadre réglementaire et politique de la valorisation énergétique des eaux usées

La valorisation énergétique des eaux usées représente une avancée technologique, économique et environnementale majeure pour la Tunisie. Elle s'insère dans un environnement législatif et politique déjà dense, qui témoigne de la volonté du pays de s'orienter vers des solutions durables.

### 3.6.1. Cadre juridique actuel : une juxtaposition de textes variés

L'Office National de l'Assainissement (ONAS) est au cœur de cette dynamique, travaillant en étroite collaboration avec l'ANGED, institution définie par la Loi n° 96-41, et l'ANPE, émanant de la Loi n°88-91. Ces organismes jouent un rôle de garde-fou, s'assurant que les initiatives ne compromettent pas l'équilibre écologique du pays. Le Décret n°2005-1991 accentue encore cette préoccupation en rendant obligatoire la réalisation d'Études d'Impact Environnemental (EIE) pour tous les projets d'envergure.

Par ailleurs, lorsque la valorisation énergétique entre en interaction avec d'autres domaines comme l'agriculture, la complexité légale s'intensifie. Le Code forestier n°88-20 et la Loi n°95-70, par exemple, sont des balises cruciales pour tout projet utilisant de l'eau usée traitée pour la reforestation ou la conservation des sols. Quant à la Loi n°2007-34 sur la qualité de l'air, elle est une boussole essentielle, guidant les initiatives de valorisation énergétique pour qu'elles respectent les standards nationaux et internationaux en matière d'émissions.

### 3.6.2. La simplification des procédures

La Loi n°2001-14 du 30 janvier 2001, qui porte sur la simplification des procédures administratives, marque un tournant majeur dans l'effort de la Tunisie pour accélérer et optimiser ses démarches administratives. Cette loi vise à alléger les contraintes réglementaires sur les entreprises et les porteurs de projets, en particulier ceux liés à la valorisation énergétique des eaux usées. La simplification des procédures est cruciale pour attirer davantage d'investisseurs et d'innovateurs dans ce domaine.

### 3.6.3. Gestion et élimination des déchets

La gestion et l'élimination des déchets est strictement encadrée par la Loi n° 96-41 du 10 juin 1996. Cette loi traite de l'importance de gérer et d'éliminer les déchets de manière à protéger l'environnement et la santé publique. Dans le contexte de la valorisation énergétique des eaux usées, cela implique la gestion responsable des résidus de traitement et des déchets solides qui en découlent. L'ANGED, créée par cette même loi, joue un rôle central dans la mise en œuvre de ces réglementations.



### 3.6.4. Intégration des politiques agricoles et forestières

L'intégration des politiques agricoles et forestières est essentielle pour garantir une utilisation durable des eaux usées traitées. Le Code forestier n°88-20 du 13 avril 1988 et la Loi n° 30 du 6 mars 2000, relative à la mise en valeur des terres agricoles dans les périmètres publics irrigués, offrent un cadre réglementaire pour cette intégration. Ces textes s'assurent que l'eau issue de la valorisation énergétique est utilisée de manière optimale, tout en préservant la santé des sols et des forêts.

### 3.6.5. Respect de l'environnement et qualité de l'air

L'engagement de la Tunisie envers la protection de l'environnement est attesté par plusieurs textes. La Loi n°2007-34 du 4 juin, qui traite de la qualité de l'air, est particulièrement pertinente pour les projets de valorisation énergétique des eaux usées. Cette loi veille à ce que les émissions produites par les installations de traitement n'affectent pas la qualité de l'air et respectent les normes nationales et internationales. L'Agence Nationale de Protection de l'Environnement (ANPE), établie par la Loi n°88-91, joue un rôle crucial dans la surveillance et la mise en œuvre de ces standards.

### 3.6.6. Les rejets dans le milieu récepteur

L'arrêté du ministre de l'Environnement et du ministre de l'Industrie et des Petites et Moyennes Entreprises du 26 mars 2018 offre un cadre strict concernant les valeurs limites des rejets d'effluents dans le milieu récepteur. Dans le contexte de la valorisation énergétique des eaux usées, ce texte garantit que l'eau traitée, ainsi que les autres effluents résultants, soient rejetés en respectant les critères environnementaux établis. Cette réglementation est fondamentale pour protéger les écosystèmes aquatiques et terrestres de la contamination potentielle.

### 3.6.7. La Constitution de 25 juillet 2022

La Constitution tunisienne adoptée le 25 juillet 2022 marque une étape cruciale dans la reconnaissance et la priorisation des enjeux environnementaux au sein du cadre législatif du pays. Les articles 47 et 48 de cette nouvelle constitution ne se contentent pas de mentionner la protection de l'environnement ; ils consacrent la nécessité de garantir une gestion durable des ressources naturelles et de préserver l'équilibre écologique.

Ces articles renforcent la responsabilité de l'État à prendre des mesures proactives pour contrer les menaces environnementales, tout en assurant une utilisation judicieuse des ressources disponibles. Dans le contexte de la valorisation énergétique des eaux usées, la Constitution, à travers ces dispositions, offre un cadre solide qui encourage l'adoption de pratiques écologiquement responsables, tout en soulignant l'obligation de garantir la sécurité et la prospérité des générations actuelles et futures.

En consacrant ces principes à la plus haute norme juridique du pays, la Tunisie manifeste une volonté indéniable de positionner le respect de l'environnement au cœur de ses politiques publiques, et ce, en harmonie avec les aspirations des citoyens à un développement durable et inclusif.

### 3.6.8. Vers un cadre réglementaire spécifique

La Tunisie, grâce à son arsenal juridique, a indéniablement manifesté une volonté de préserver l'environnement. Toutefois, la complexité de l'enchevêtrement des lois, décrets, et arrêtés existants, bien que reflétant la richesse de la pensée législative, laisse entrevoir un besoin criant d'harmonisation et de simplification pour le secteur spécifique de la valorisation énergétique des eaux usées.

Face à cette pluralité normative, les acteurs concernés peuvent se trouver désorientés. Les intersections entre différentes lois, notamment entre le Code des Eaux, la Loi sur la qualité de l'air, et celles relatives à la protection des terres agricoles et à la gestion des déchets, pour n'en citer que quelques-unes, peuvent générer des zones d'ombres. Ces ambiguïtés, parfois sources de contradictions, sont susceptibles de dissuader des porteurs de projets, faute de clarté sur les démarches à entreprendre ou les normes à respecter.

Il devient donc impératif d'envisager la création d'un cadre réglementaire dédié, qui clarifierait les différentes dispositions touchant à la valorisation énergétique des eaux usées. Un tel instrument juridique permettrait de :

- **Favoriser la cohérence réglementaire** : En rassemblant les dispositions éparées sous un seul chapeau, les redondances seraient éliminées, et les potentiels conflits entre normes seraient résolus.
- **Inciter à l'innovation** : Avec des règles claires et unifiées, les entrepreneurs et les chercheurs seraient davantage enclins à développer des solutions avant-gardistes, sachant qu'ils évolueraient dans un environnement juridique stable.
- **Stimuler l'investissement** : Un cadre spécifique pourrait introduire des mesures incitatives, telles que des allègements fiscaux, des crédits d'impôt recherche, ou encore des subventions dédiées, qui seraient autant de leviers pour encourager les initiatives privées et publiques.

### 3.7. Analyse de rentabilité et sources de financement

L'ambition de valoriser énergétiquement les eaux usées en Tunisie ne peut se concrétiser sans une évaluation minutieuse de sa rentabilité économique et une identification claire des sources de financement potentielles.

#### 3.7.1. Évaluation économique des projets

Le coût initial des technologies de valorisation énergétique peut être élevé. Toutefois, il est essentiel de considérer le retour sur investissement sur le long terme. La méthanisation, par exemple, bien que coûteuse en phase d'installation, peut générer des revenus substantiels via la vente de biogaz. Une évaluation correcte doit donc tenir compte des coûts opérationnels, des économies potentielles, des revenus générés, et du temps de retour sur investissement.

#### 3.7.2. Sources de financement

La réalisation des projets de valorisation énergétique nécessite des investissements conséquents. Pour cela, plusieurs sources de financements, aussi bien nationales qu'internationales, peuvent être mobilisées :

- **Financements publics nationaux** : L'État tunisien pourrait allouer des budgets pour des projets innovants dans ce secteur.
- **Aides internationales et prêts** : Plusieurs organismes internationaux peuvent être sollicités pour obtenir des aides financières, sous forme de prêts, de subventions ou d'aides techniques. Parmi eux :
  - La Banque Mondiale et la Banque Internationale pour la Reconstruction et le Développement (BIRD)
  - Banque Islamique de développement (BID)
  - Agence Française de Développement (AFD)
  - Royaume de Belgique
  - Banque Nordique d'Investissement (NIB) et Fonds Nordique de Développement (NDF)



- Fonds Koweïtien pour le Développement Economique (FKD)
  - Agence japonaise de coopération internationale (JICA)
  - Banque Allemande pour le développement et la reconstruction (KFW)
  - Banque Européenne d'Investissement (BEI)
  - Erste Bank (Banque Autrichienne)
  - Commission Européenne (notamment dans le cadre du FIV)
  - Banque Africaine de Développement
  - Banque Européenne de Reconstruction et Développement (BERD)
  - Recyclage de la dette Italienne
  - Confédération Suisse (SECO)
  - German Corporation for International Cooperation (GIZ)
  - Initiative for Climate Action Transparency (ICAT)
- **Partenariats Public-Privé (PPP)** : Ils offrent une opportunité de mobiliser à la fois l'expertise et le capital du secteur privé, tout en s'assurant que les projets soient réalisés dans un cadre réglementaire et opérationnel stable grâce à la participation du secteur public.
  - **Investisseurs privés et capital-risque** : L'attractivité du secteur, en lien avec la transition énergétique et la protection de l'environnement, peut séduire des investisseurs recherchant des initiatives durables et rentables à long terme.

La diversité de ces sources de financement montre l'intérêt grandissant à l'échelle mondiale pour des projets qui visent à la fois la protection de l'environnement, la valorisation des ressources, et le développement économique.

### 3.8. Évaluation environnementale et sociale

La valorisation énergétique des eaux usées, bien que bénéfique pour l'environnement, doit être mise en œuvre de manière à minimiser les impacts négatifs potentiels.

#### 3.8.1. Impacts environnementaux

Des études d'impact environnemental, telles que celles définies par le Décret n°2005-1991 sur l'Étude d'Impact Environnemental, doivent être rigoureusement menées. Il s'agit d'analyser l'impact sur la biodiversité, les émissions de gaz à effet de serre, la qualité de l'eau et de l'air, ou encore les risques de pollution.

#### 3.8.2. Considérations sociales

La mise en œuvre de projets de valorisation énergétique peut entraîner des répercussions sur les communautés locales. Il est donc essentiel d'évaluer les impacts sociaux tels que la création ou la

suppression d'emplois, les perturbations potentielles pour les populations locales une communication transparente avec les parties prenantes.

### 3.8.3. L'importance de la participation publique

La réussite d'un tel projet repose également sur son acceptabilité sociale. La mise en place de consultations publiques, d'enquêtes et de forums de discussion permettra d'assurer une meilleure adhésion de la population et d'intégrer leurs préoccupations dans la mise en œuvre des projets.

Ainsi, la valorisation énergétique des eaux usées en Tunisie est une ambition à la fois louable et nécessaire. Toutefois, elle requiert une approche holistique, combinant des analyses économiques rigoureuses, des financements adaptés et une évaluation approfondie des impacts environnementaux et sociaux.

## 4. Analyse de faisabilité pour la mise en œuvre des options en Tunisie

Face à l'urgence de répondre aux besoins énergétiques croissants tout en préservant l'environnement, la valorisation énergétique des eaux usées présente une opportunité inédite pour la Tunisie. Les différentes options discutées précédemment dans les sections 2 et 3 demandent à être finement étudiées pour déterminer leur pertinence dans le contexte tunisien.

### 4.1. Aspects techniques

- **Méthanisation** : La méthanisation, en tant que processus de digestion anaérobie, pourrait être une solution idéale pour la Tunisie, notamment en raison de son climat qui favorise la décomposition anaérobie. Néanmoins, les installations nécessiteraient d'être adaptées pour résister à des températures élevées et garantir un rendement constant. Un suivi technique et des investissements dans la formation du personnel seraient également cruciaux pour garantir le bon fonctionnement de ces installations.
- **Co-génération** : Coupler la méthanisation avec la co-génération est non seulement une démarche efficace, mais aussi économique. La Tunisie pourrait transformer le biogaz produit en électricité et en chaleur pour les besoins locaux. Cependant, l'infrastructure actuelle nécessiterait des améliorations, et des investissements significatifs seraient nécessaires pour l'achat et l'entretien des équipements.
- **Intégration des Énergies renouvelables** : La position géographique de la Tunisie, avec son abondance de soleil, rend l'énergie photovoltaïque particulièrement intéressante. Intégrer cette source d'énergie renouvelable à la co-génération pourrait offrir une combinaison optimale pour une production d'énergie stable et respectueuse de l'environnement.

Des approches complémentaires et innovantes peuvent aussi être considérées :

- **Plantation d'arbres** : Cette approche ne se contente pas de compenser les émissions de carbone. Elle présente également des avantages écologiques tangibles, notamment en matière de préservation des sols et de biodiversité. Dans le contexte tunisien, cela contribuerait également à lutter contre la désertification, un enjeu majeur pour le pays.
- **Valorisation diversifiée** : Le digestat, sous-produit de la méthanisation, pourrait être valorisé comme engrais organique. Ce serait une manière efficace de boucler la boucle en utilisant les

déchets de l'une des étapes pour nourrir une autre, tout en soutenant l'agriculture tunisienne.

- **Intégration technologique** : Les nouvelles technologies, telles que l'IA et l'IoT, pourraient optimiser le fonctionnement et le rendement des installations. Des capteurs pourraient, par exemple, surveiller en temps réel la qualité du biogaz produit ou le niveau d'efficacité de la co-génération.

#### 4.2. Aspects financiers

L'analyse financière est cruciale pour évaluer la viabilité des options choisies et leur impact économique pour la Tunisie.

**Investissements initiaux** : La mise en œuvre des technologies de méthanisation, de co-génération et de solutions basées sur les énergies renouvelables nécessite des investissements initiaux importants. Les infrastructures, les équipements et la formation du personnel représentent des coûts significatifs. Par exemple, l'installation d'une unité de méthanisation ou d'une ferme photovoltaïque nécessite une planification financière conséquente.

**Retours sur investissement** : Malgré les coûts initiaux élevés, les options telles que la méthanisation offrent un retour sur investissement attrayant à moyen et long terme, notamment grâce à la vente d'énergie produite et à la réduction des coûts liés à la gestion des déchets.

**Subventions et aides financières** : Plusieurs institutions internationales, telles que la Banque Africaine de Développement, la Banque Européenne d'Investissement et l'Agence Française de Développement, peuvent offrir des prêts ou des subventions pour soutenir de tels projets en Tunisie. Ces aides peuvent considérablement réduire les pressions financières initiales et accélérer la mise en œuvre des projets.

**Coûts opérationnels** : Une fois les infrastructures en place, il faut également considérer les coûts opérationnels, qui incluent l'entretien, la maintenance, le personnel et les éventuels coûts de remplacement des équipements. Ces coûts peuvent varier en fonction de la technologie adoptée.

**Intégration de nouvelles technologies** : L'adoption de technologies complémentaires et innovantes, telles que l'intelligence artificielle et l'IoT, pourrait entraîner des coûts supplémentaires initiaux, mais elles ont le potentiel de réduire les coûts opérationnels à long terme en optimisant les processus et en améliorant l'efficacité énergétique.

Il est donc essentiel que la Tunisie mène une étude financière approfondie, en tenant compte des coûts initiaux, des retours sur investissement, des sources potentielles de financement et des coûts opérationnels pour chaque option envisagée. Cette étude permettrait d'établir un plan financier robuste, garantissant la viabilité et la durabilité des projets.

#### 4.3. Discussion et recommandations

La mise en œuvre réussie de toute initiative, surtout d'une aussi cruciale que la valorisation énergétique des eaux usées, repose sur une compréhension profonde des contextes locaux et des nuances régionales. La Tunisie, avec sa riche diversité climatique et socio-économique, présente des défis et des opportunités spécifiques à chaque région.

**Adaptation au contexte local** : Il ne suffit pas de simplement appliquer une solution globale à toutes les régions. Pour garantir une mise en œuvre réussie et un impact maximal, il est crucial d'adapter les techniques et technologies proposées aux spécificités propres à chaque région. Qu'il s'agisse des variations climatiques, des ressources disponibles ou des besoins des populations, une démarche adaptative garantira que les solutions sont non seulement efficaces, mais également durables sur le long terme.

**Projets pilotes** : Dans cette optique, avant d'envisager un déploiement national, il se commence par des projets pilotes dans des zones spécifiques. Ces projets permettraient non seulement de tester et d'affiner les méthodologies, mais également d'identifier les défis pratiques qui pourraient surgir. Ils serviraient de cas d'étude, facilitant l'anticipation et la gestion des obstacles potentiels lors d'un déploiement à plus grande échelle.

**Coopération et partenariats** : La voie vers la réussite dans un domaine aussi technique et complexe ne peut être parcourue en solo. Une collaboration étroite avec des institutions internationales, des experts en la matière et des entreprises spécialisées est primordiale. Elle peut non seulement offrir un accès à des technologies de pointe et à des formations spécialisées, mais également faciliter l'accès à des financements et des opportunités de co-investissement. Ces partenariats pourraient également contribuer à l'intégration de standards internationaux et à l'adoption de meilleures pratiques.

Pour réaliser son ambition en matière de valorisation énergétique des eaux usées, la Tunisie doit adopter une démarche à la fois ambitieuse et pragmatique. Cette démarche devra nécessairement tenir compte des spécificités locales, tout en s'appuyant sur des partenariats solides et une volonté d'apprendre, d'innover et d'adapter.

## Conclusion

La valorisation des eaux usées en tant que source d'énergie constitue une perspective stratégique pour la Tunisie. Sous la direction de l'ONAS, les stations d'épuration sont appelées à jouer un rôle central dans la transition énergétique du pays. Cette orientation, qui voit les eaux usées non plus uniquement comme des déchets, mais comme des ressources potentielles, pourrait répondre efficacement aux besoins énergétiques et hydriques de la Tunisie, en particulier pour l'agriculture.

La méthanisation, compte tenu des conditions climatiques tunisiennes, nécessite des installations fiables et une expertise locale approfondie, complétée par des formations adéquates. La co-génération, qui vise à utiliser le biogaz produit par la méthanisation de manière optimale, soulève la question de la modernisation de l'infrastructure actuelle et des investissements associés. L'énergie photovoltaïque, compte tenu du potentiel solaire de la Tunisie, pourrait être intégrée à la co-génération, offrant ainsi une solution durable pour une production énergétique constante et écologique.

Dans une perspective environnementale, la plantation d'arbres répond à des enjeux écologiques majeurs, notamment la lutte contre la désertification. De plus, l'utilisation du digestat comme engrais met en avant l'idée d'une économie circulaire, établissant un lien direct entre la valorisation énergétique et le secteur agricole. L'intégration technologique, en utilisant les avancées actuelles, peut permettre une meilleure gestion des installations, offrant à la fois une surveillance en temps réel et une amélioration continue des performances.

Face aux multiples enjeux du 21<sup>ème</sup> siècle, la valorisation énergétique des eaux usées représente une voie essentielle pour la Tunisie. En tirant parti des expériences internationales tout en adaptant les technologies à la réalité nationale, l'ONAS peut contribuer à positionner la Tunisie comme un référent en matière de durabilité et d'innovation.

# Références bibliographiques

- Abdel Wahaab, R., Mahmoud, M., & van Lier, J. B. (2020). Toward achieving sustainable management of municipal wastewater sludge in Egypt: The current status and future prospective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 127, 109880.
- Al Samsami, O., Etri, T., & Baawain, M. (2023). Characterization of sewage sludge in Muscat and estimation of their energy recovery. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 58, 103351.
- Ali, S. S., Mastropetros, S. G., Schagerl, M., Sakarika, M., Elsamahy, T., El-Sheekh, M., Sun, J., & Kornaros, M. (2022). Recent advances in wastewater microalgae-based biofuels production: A state-of-the-art review. *Energy Reports*, 8, 13253–13280.
- Angenent, L. T., Karim, K., Al-Dahhan, M. H., Wrenn, B. A., & Domínguez-Espinosa, R. (2004). Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. *Trends in Biotechnology*, 22(9), 477–485.
- Bezirgiannidis, A., Chatzopoulos, P., Tsakali, A., Ntougias, S., & Melidis, P. (2020). Renewable energy recovery from sewage sludge derived from chemically enhanced precipitation. *Renewable Energy*, 162, 1811–1818.
- Blackridge Research & Consulting (BRC). (2022). What is Waste-to-Energy (WtE)? An Overview of the Leading WtE Technologies and WtE Companies. Gachibowli, India: Blackridge Research & Consulting. Retrieved from <https://www.blackridgeresearch.com/blog/what-is-waste-to-energy-wte-an-overview-of-the-leading-wte-technologies-and-wte-companies>.
- Bora, R. R., Richardson, R. E., & You, F. (2020). Resource recovery and waste-to-energy from wastewater sludge via thermochemical conversion technologies in support of circular economy: a comprehensive review. *BMC Chemical Engineering*, 2(1).
- Breach, P.A., & Simonovic, S.P. (2018). Wastewater Treatment Energy Recovery Potential For Adaptation To Global Change: An Integrated Assessment. *Environmental Management* 61, 624–636.
- Cao, S., Du, R., & Zhou, Y. (2022). Integrated thermal hydrolysis pretreated anaerobic digestion centrate and municipal wastewater treatment via partial nitrification/anammox process: A promising approach to alleviate inhibitory effects and enhance nitrogen removal. *Bioresource Technology*, 356, 127310.
- Carotenuto, A., Di Fraia, S., Massarotti, N., Sobek, S., Uddin, M. R., Vanoli, L., & Werle, S. (2023). Predictive modeling for energy recovery from sewage sludge gasification. *Energy*, 263, 125838.
- Chang, H., Zhao, Y., Zhao, S., Damgaard, A., & Christensen, T. H. (2022). Review of inventory data for the thermal treatment of sewage sludge. *Waste Management*, 146, 106–118.
- Couturier, C., Berger, S., & Meiffren, I. (2001). La digestion anaérobie des boues urbaines: État des lieux, état de l'art. *Toulouse, Solagro/Agence de l'eau Adour Garonne*, 36.
- Danfoss. (2023). Energy generation at the wastewater treatment plant in Marselisborg. Danfoss, Nordborg, Denmark. Retrieved from <https://discover-drives.danfoss.com/en/danfoss-discover-drives-case-story-marselisborg-wastewater-treatment-plant/> (Accessed on July 17, 2023).
- Deng, Y., & Zhao, R. (2015). Advanced Oxidation Processes (AOPs) in Wastewater Treatment. *Current Pollution Reports*, 1(3), 167–176.
- Di Giacomo, G., & Romano, P. (2022). Evolution and Prospects in Managing Sewage Sludge Resulting from Municipal Wastewater Purification. *Energies*, 15(15), 5633.

- Diamantis, V., Eftaxias, A., Stamatelatou, K., Noutsopoulos, C., Vlachokostas, C., & A. (2021). Bioenergy in the era of circular economy: Anaerobic digestion technological solutions to produce biogas from lipid-rich wastes. *Renewable Energy*, 168, 438–447.
- Drechsel, P., & Hanjra, M. A. (2018). Wastewater and biosolids for fruit trees (Tunisia) - Case Study. In M. Otoo & P. Drechsel (Eds.), *Resource recovery from waste: business models for energy, nutrient and water reuse in low- and middle-income countries* (pp. 569-583). Oxon, UK: Routledge - Earthscan.
- Đurđević, D., Blečić, P., & Jurić, Ž. (2019). Energy Recovery from Sewage Sludge: The Case Study of Croatia. *Energies*, 12(10), 1927.
- El Moussaoui, T., Belloulid, M. O., Elharbili, R., El Ass, K., & Ouazzani, N. (2022). Simultaneous assessment of purification performances and wastewater byproducts management plans towards a circular economy: Case of Marrakesh WWTP. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 6, 100228.
- Gao, N., Kamran, K., Quan, C., & Williams, P. T. (2020). Thermochemical conversion of sewage sludge: A critical review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 79, 100843.
- GIZ. (2017). *Waste-to-Energy Options in Municipal Solid Waste Management*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH. Bonn and Eschborn, Germany.
- Golzar, F., & Silveira, S. (2021). Impact of wastewater heat recovery in buildings on the performance of centralized energy recovery – A case study of Stockholm. *Applied Energy*, 297, 117141.
- Hallenbeck, P. C. (2009). Fermentative hydrogen production: Principles, progress, and prognosis. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34(17), 7379–7389.
- Hämäläinen, A., Kokko, M., Chatterjee, P., Kinnunen, V., & Rintala, J. (2022). The effects of digestate pyrolysis liquid on the thermophilic anaerobic digestion of sewage sludge — Perspective for a centralized biogas plant using thermal hydrolysis pretreatment. *Waste Management*, 147, 73–82.
- Hamlehdar, M., Yousefi, H., Noorollahi, Y., & Mohammadi, M. (2022). Energy recovery from water distribution networks using micro hydropower: A case study in Iran. *Energy*, 252, 124024.
- Hao, X., Wu, D., Li, J., Liu, R., & van Loosdrecht, M. (2022). Making Waves: A sea change in treating wastewater – Why thermodynamics supports resource recovery and recycling. *Water Research*, 218, 118516.
- Helal, A., Ghoneim, W., & Halaby, A. (2013). Feasibility Study for Self-Sustained Wastewater Treatment Plants—Using Biogas CHP Fuel Cell, Micro-Turbine, PV and Wind Turbine Systems. *Smart Grid and Renewable Energy*, 04(02), 227–235.
- Islam, A. K. M. K., Dunlop, P. S. M., Hewitt, N. J., Lenihan, R., & Brandoni, C. (2021). Bio-Hydrogen Production from Wastewater: A Comparative Study of Low Energy Intensive Production Processes. *Clean Technologies*, 3(1), 156–182.
- Karagiannidis, A., Samaras, P., Kasampalis, T., Perkoulidis, G., Ziogas, P., & Zorpas, A. (2011). Evaluation of sewage sludge production and utilization in Greece in the frame of integrated energy recovery. *Desalination and Water Treatment*, 33(1–3), 185–193.
- Khan, M. Z., Nizami, A. S., Rehan, M., Ouda, O. K. M., Sultana, S., Ismail, I. M., & Shahzad, K. (2017). Microbial electrolysis cells for hydrogen production and urban wastewater treatment: A case study of Saudi Arabia. *Applied Energy*, 185, 410–420.
- Kosińska, N., Krzyżyńska, R., Ghazal, H., & Jouhara, H. (2023). Hydrothermal carbonisation of sewage sludge and resulting biofuels as a sustainable energy source. *Energy*, 275, 127337.
- Kumar, M., Ambika, S., Hassani, A., & Nidheesh, P. V. (2023). Waste to catalyst: Role of agricultural waste in water and wastewater treatment. *Science of The Total Environment*, 858, 159762.



Kumari, A., Singh Maurya, N., Kumar, A., Kant Yadav, R., & Kumar, A. (2023). Option and Reuse of Wastewater Sludge, Associated Benefit, and Environmental Risk. *Sewage Management*.

Li, H., Jin, C., Zhang, Z., O'Hara, I., & Mundree, S. (2017). Environmental and economic life cycle assessment of energy recovery from sewage sludge through different anaerobic digestion pathways. *Energy*, 126, 649–657.

Liu, Y., Li, B., Guo, D., Munir, M. T., Song, L., Wu, X., & Huang, Y. (2022). Feasibility of using different hydrothermal processes for sewage sludge management in China. *Science of The Total Environment*, 838, 156154.

Liu, Z., Hughes, M., Tong, Y., Zhou, J., Kreutter, W., Lopez, H. C., Singer, S., Zitomer, D., & McNamara, P. (2022). Paper mill sludge biochar to enhance energy recovery from pyrolysis: A comprehensive evaluation and comparison. *Energy*, 239, 121925.

Llácer-Iglesias, R., Pérez, J. M., Satorre-Aznar, J. R., López-Jiménez, P. A., & Pérez-Sánchez, M. (2020). Energy recovery in wastewater treatment systems through hydraulic micro-machinery. Case study. *Journal of Applied Research in Technology & Engineering*, 1(1), 15.

Lv, P., Wu, R., Wang, J., Bai, Y., Ding, L., Wei, J., Song, X., & Yu, G. (2022). Energy recovery of livestock manure and industrial sludge by co-hydrocarbonisation coupled to pyrolysis and gasification. *Journal of Cleaner Production*, 374, 133996.

Malik, S., Kishore, S., Dhasmana, A., Kumari, P., Mitra, T., Chaudhary, V., Kumari, R., Bora, J., Ranjan, A., Minkina, T., & Rajput, V. D. (2023). A Perspective Review on Microbial Fuel Cells in Treatment and Product Recovery from Wastewater. *Water*, 15(2), 316.

McCarty, P. L. (1964). Anaerobic Waste Treatment Fundamentals—Part Four—Process Design. *Public Works*, 95, 95-99.

Melis, A., Zhang, L., Forestier, M., Ghirardi, M. L., & Seibert, M. (2000). Sustained Photobiological Hydrogen Gas Production upon Reversible Inactivation of Oxygen Evolution in the Green Alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiology*, 122(1), 127–136.

Mérida García, A., Rodríguez Díaz, J., García Morillo, J., & McNabola, A. (2021). Energy Recovery Potential in Industrial and Municipal Wastewater Networks Using Micro-Hydropower in Spain. *Water*, 13(5), 691.

Mishra, K., Singh Siwal, S., Kumar Saini, A., & Thakur, V. K. (2023). Recent update on gasification and pyrolysis processes of lignocellulosic and algal biomass for hydrogen production. *Fuel*, 332, 126169.

Nguyen, V. T., Ta, Q. T. H., & Nguyen, P. K. T. (2022). Artificial intelligence-based modeling and optimization of microbial electrolysis cell-assisted anaerobic digestion fed with alkaline-pretreated waste-activated sludge. *Biochemical Engineering Journal*, 187, 108670.

Nkuna, S. G., Olwal, T. O., & Chowdhury, S. D. (2022). Assessment of thermochemical technologies for wastewater sludge-to-energy: An advance MCDM model. *Cleaner Engineering and Technology*, 9, 100519.

Ortiz-Sánchez, M. F., & Cuevas-Rodriguez, G. (2023). Energy recovery from wastewater in Mexico: A systematic review. *Frontiers in Environmental Science*, 11.

Oruganti, R. K., Biji, A. P., Lanuyanger, T., Show, P. L., Sriariyanun, M., Upadhyayula, V. K. K., Gadhamshetty, V., & Bhattacharyya, D. (2023). Artificial intelligence and machine learning tools for high-performance microalgal wastewater treatment and algal biorefinery: A critical review. *Science of The Total Environment*, 876, 162797.

Pecorini, I., Ferrari, L., Baldi, F., Albini, E., Galoppi, G., Bacchi, D., Vizza, F., Lombardi, L., Carcasci, C., Ferrara, G., & Antonio Carnevale, E. (2017). Energy recovery from fermentative biohydrogen production of biowaste: a case study based analysis. *Energy Procedia*, 126, 605–612.



Pepperl-Fuchs. (2023). Energy Generation Processes in Wastewater Treatment Plants. Germany: Pepperl+Fuchs SE. Retrieved from <https://www.pepperl-fuchs.com/global/en/33448.htm>.

Peregrina, C., Rudolph, V., Lecomte, D., & Arlabosse, P. (2008). Immersion frying for the thermal drying of sewage sludge: An economic assessment. *Journal of Environmental Management*, 86(1), 246–261. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.12.035>

Pretel, R., Durán, F., Robles, A., Ruano, M. V., Ribes, J., Serralta, J., & Ferrer, J. (2015). Designing an AnMBR-based WWTP for energy recovery from urban wastewater: The role of primary settling and anaerobic digestion. *Separation and Purification Technology*, 156, 132–139.

Prince, R. C., & Kheshgi, H. S. (2005). The Photobiological Production of Hydrogen: Potential Efficiency and Effectiveness as a Renewable Fuel. *Critical Reviews in Microbiology*, 31(1), 19–31.

Rajendran, K., Aslanzadeh, S., & Taherzadeh, M. J. (2012). Household Biogas Digesters—A Review. *Energies*, 5(8), 2911–2942.

Ramya, M., & Senthil Kumar, P. (2022). A review on recent advancements in bioenergy production using microbial fuel cells. *Chemosphere*, 288, 132512.

Ren, N., Li, J., Li, B., Wang, Y., & Liu, S. (2006). Biohydrogen production from molasses by anaerobic fermentation with a pilot-scale bioreactor system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 31(15), 2147–2157.

Rout, P. R., Goel, M., Mohanty, A., Pandey, D. S., Halder, N., Mukherjee, S., Bhatia, S. K., Sahoo, N. K., & Varjani, S. (2022). Recent Advancements in Microalgal Mediated Valorisation of Wastewater from Hydrothermal Liquefaction of Biomass. *BioEnergy Research*, 16(1), 45–60.

Secretariat of the Pacific Regional Environment Programme (SPREP). (2021). Waste to Energy Research Report. Apia, Samoa: SPREP Publications. Retrieved from <https://library.sprep.org/sites/default/files/2021-12/waste-energy-research-report.pdf>.

Siddiqui, S., Bhatnagar, P., Dhingra, S., Upadhyay, U., & Sreedhar, I. (2021). Wastewater treatment and energy production by microbial fuel cells. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 13(5), 3569–3592.

Sinagra, M., Picone, C., Picone, P., Aricò, C., Tucciarelli, T., & Ramos, H. M. (2022). Low-Head Hydropower for Energy Recovery in Wastewater Systems. *Water*, 14(10), 1649.

Smith, K., Liu, S., Hu, H.-Y., Dong, X., & Wen, X. (2018). Water and energy recovery: The future of wastewater in China. *Science of The Total Environment*, 637–638, 1466–1470.

Source: Gul, M., Gul, M. A., Ahmad, N., Shahzad, K., & Mazzola, P. G. (2021). Energy potential estimation from industrial wastewater in Pakistan: current status, challenges, and future prospective. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 4549–4563.

Srimongkol, P., Sangtanoo, P., Songserm, P., Watsuntorn, W., & Karnchanatat, A. (2022). Microalgae-based wastewater treatment for developing economic and environmental sustainability: Current status and future prospects. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 10.

Stillwell, A., Hoppock, D., & Webber, M. (2010). Energy Recovery from Wastewater Treatment Plants in the United States: A Case Study of the Energy-Water Nexus. *Sustainability*, 2(4), 945–962.

Sustainable Energy Africa (SEA). (2017). Sustainable energy solutions for South African local government: A practical guide. Cape Town: Sustainable Energy Africa. Retrieved from [https://www.sustainable.org.za/userfiles/wastewater%20biogas\(1\).pdf](https://www.sustainable.org.za/userfiles/wastewater%20biogas(1).pdf).

van der Hoek, J. P., de Fooij, H., & Struker, A. (2016). Wastewater as a resource: Strategies to recover resources from Amsterdam's wastewater. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 53–64.

Vishwanathan, A. S. (2021). Microbial fuel cells: a comprehensive review for beginners. *3 Biotech*, 11(5).

Wang, A.-J., Cao, G.-L., & Liu, W.-Z. (2011). Biohydrogen Production from Anaerobic Fermentation. *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, 143–163.

Wang, H., Wang, T., Zhang, B., Li, F., Toure, B., Omosa, I. B., Chiramba, T., Abdel-Monem, M., & Pradhan, M. (2013). Water and Wastewater Treatment in Africa - Current Practices and Challenges. *CLEAN - Soil, Air, Water*, 42(8), 1029–1035. Portico.

Wei, L., Zhu, F., Li, Q., Xue, C., Xia, X., Yu, H., Zhao, Q., Jiang, J., & Bai, S. (2020). Development, current state and future trends of sludge management in China: Based on exploratory data and CO<sub>2</sub>-equivalent emissions analysis. *Environment International*, 144, 106093.

Wen, L., & Li, X. (2022). Production of intracellular lipids from thermally hydrolyzed waste sludge by oleaginous yeast for energy and resource recovery. *Energy Conversion and Management*, 252, 115129.

World Biogas Association (WBA) (2021). Biogas: Pathways to 2030. World Biogas Association. Retrieved from <https://cdn.revolutionise.com.au/cups/bioenergy/files/zpvdwm3upt5zxuec.pdf>.

Zarei, M. (2020). Wastewater resources management for energy recovery from circular economy perspective. *Water-Energy Nexus*, 3, 170–185.