



German Water
Partnership



Compendium des eaux industrielles

Un guide pour les décideurs dans la gestion
des eaux usées industrielles en Inde
et dans la région MOAN

giz Deutsche Gesellschaft
für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH

On behalf of:



Federal Ministry
for the Environment, Nature Conservation
and Nuclear Safety

of the Federal Republic of Germany

Table des matières

Avant-propos BMU	4
Avant-propos GWP	5
Liste des abréviations	6
Abrégé	8
1. Production de pétrole et de gaz.....	14
Informations spécifiques aux pays.....	15
Production d'eaux usées dans le secteur	16
Débits et propriétés des eaux usées	17
Procédé de traitement	19
<i>Étude de cas : Traitement des eaux usées d'une raffinerie d'huile minérale dans la province du Shandong, en Chine</i>	<i>20</i>
2. Industrie chimique.....	22
Informations spécifiques aux pays.....	23
Production d'eaux usées dans l'industrie chimique.....	25
Débits et propriétés des eaux usées	25
Procédé de traitement	26
<i>Étude de cas : Galvanoplastie chimique/plastique en Inde</i>	<i>28</i>
<i>Étude de cas : Traitement optimisé des eaux de process pour la production d'engrais en Égypte ...</i>	<i>30</i>
3. Industrie pharmaceutique	32
Informations spécifiques aux pays.....	33
Industrie pharmaceutique et volume d'eaux usées.....	35
Débits et propriétés des eaux usées	35
Procédé de traitement	36
<i>Étude de cas : Industrie pharmaceutique Inde ...</i>	<i>38</i>
4. Industrie minière	40
Informations spécifiques aux pays.....	41
Industrie minière et volume d'eaux usées	42
Débits et propriétés des eaux usées	43
Procédé de traitement	45
<i>Étude de cas : Extraction d'or en Afrique du Sud ..</i>	<i>46</i>
5. Industrie alimentaire	48
Informations spécifiques aux pays.....	48
Industrie et volume d'eaux usées	51
Débits et propriétés des eaux usées	53
Procédé de traitement	54
<i>Étude de cas : Industrie de transformation des olives en Jordanie, en Syrie et au Liban.....</i>	<i>56</i>
<i>Étude de cas : Industrie de transformation du poisson au Maroc.....</i>	<i>58</i>
<i>Étude de cas : Transformation du lait en Inde.....</i>	<i>60</i>
<i>Étude de cas : Transformation de produit alimentaire Soja.....</i>	<i>62</i>
6. Métallurgie et travail des métaux	64
Informations spécifiques aux pays.....	64
Industrie et volume d'eaux usées	66
Débits et propriétés des eaux usées	67
Procédé de traitement	69
<i>Étude de cas : Extraction du zinc/ Lixiviation du zinc en Inde</i>	<i>72</i>
7. Industrie textile et cuir	74
Informations spécifiques aux pays.....	75
Industries et production d'eaux usées.....	76
Débits et propriétés des eaux usées	78
Procédé de traitement	80
<i>Étude de cas : Industrie textile en Inde</i>	<i>82</i>

8. Industrie du papier et de la pâte à papier.....	84
Informations spécifiques aux pays.....	85
Industrie et volume d'eaux usées.....	87
Débits et propriétés des eaux usées.....	88
Procédé de traitement.....	88
9. Décharges.....	90
Informations spécifiques aux pays.....	91
Industrie et volume d'eaux usées.....	92
Débits et propriétés des eaux usées.....	93
Procédé de traitement.....	94
<i>Étude de cas : Décharge au Maroc.....</i>	<i>96</i>
10. Parcs industriels.....	98
Informations spécifiques aux pays.....	99
Infrastructures et gestion des eaux usées.....	100
Défi particulier.....	100
Procédé de traitement.....	102
<i>Étude de cas : Industrie textile en Inde.....</i>	<i>104</i>
<i>étude de cas : Traitement des eaux usées dans des zones industrielles au maroc.....</i>	<i>106</i>
11. Perspectives sur les tendances internationales dans le traitement des eaux usées industrielles.....	108
Bibliographie.....	112
Mentions légales.....	126

Chers lecteurs,

Chers experts du secteur des eaux industrielles, Partout dans le monde, l'industrie doit s'adapter à une fluctuation – et, dans de nombreuses régions du monde, même à un recul – de la disponibilité de l'eau, phénomène dû au changement climatique. Les matériaux utilisés dans les grands secteurs industriels, comme la chimie et l'industrie alimentaire en Inde ou le secteur minier et l'industrie textile dans la région MENA, posent des défis supplémentaires pour un traitement efficace et responsable de la ressource précieuse constituée par l'eau. L'objectif doit être, dans une perspective de durabilité, de réintégrer l'eau épurée dans le cycle naturel de l'eau, sans danger pour les organismes vivants et l'environnement.

Les exemples regroupés pour dix grands secteurs industriels dans le présent compendium sur les eaux industrielles illustrent de manière impressionnante la façon dont ce processus peut réussir du point de vue économique et écologique. L'objectif de ce compendium est de soutenir les décideurs publics et privés dans la région MENA (surtout au Maroc, en Tunisie, en Egypte et en Jordanie) et en Inde dans la mise en œuvre de solutions de traitement industriel des eaux usées qui soient durables et respectueuses de l'environnement. A cet effet, les différentes caractéristiques des marchés et les tendances observables dans ces deux régions sont analysées et identifiées, par exemple l'importance croissante accordée à la réutilisation des ressources ou le développement de parcs industriels permettant de traiter en commun les flux d'eaux usées.

Les innovations techniques en matière de protection de l'environnement et du climat sont aujourd'hui plus demandées que jamais – et constituent en même temps un puissant moteur de croissance pour l'économie. L'initiative en faveur des exportations des technologies environnementales, lancée en 2016 par le ministère fédéral de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité des réacteurs, s'est donné comme mission de diffuser et de renforcer les connaissances sur les technologies environnementales et de protection du climat, ainsi que sur



les infrastructures (vertes) innovantes, et sur leur application dans les pays qui ont besoin d'un soutien. Le présent compendium sur les eaux industrielles, qui poursuit un objectif de développement durable et d'amélioration des conditions de vie, a été réalisé en tant que contribution apportée par la Société allemande pour la coopération internationale SARL (Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH) à l'initiative en faveur des exportations des technologies environnementales.

Nous remercions le donneur d'ordre, GIZ, et l'éditeur, l'association Partenariat allemand de l'eau (German Water Partnership e. V.), pour la mise en œuvre réussie du projet et l'excellente qualité de la coopération. Le compendium a été réalisé avec le soutien technique des experts de l'Agence fédérale de l'environnement (Umweltbundesamt) – nous tenons à les remercier eux aussi pour leur précieuse contribution.

Je vous prie d'agréer, chers experts du secteur des eaux industrielles, chers lecteurs, l'expression de mes meilleures salutations.

Cordialement

A handwritten signature in blue ink that reads "Svenja Schulze". The signature is fluid and cursive, written in a professional style.

Svenja Schulze
Ministre fédérale de l'Environnement, de la Protection de la Nature et de la Sécurité des réacteurs

Chers lecteurs,

Chers experts en gestion des eaux industrielles, Compte tenu de la diminution des ressources en eau dans le monde et des fluctuations de la disponibilité en eau dues au changement climatique, l'importance d'une gestion durable de l'eau va croissant. Les installations de traitement à efficacité énergétique, en particulier dans les économies émergentes d'Asie et la région MOAN, contribuent ainsi de manière importante à la réalisation des objectifs climatiques de Paris. Dans les pages suivantes, vous découvrirez comment les entreprises allemandes apportent un soutien impressionnant au secteur des eaux usées.

Les composants et systèmes allemands destinés au traitement des eaux usées font déjà l'objet d'une demande internationale : en 2019, les exportations dans les domaines du traitement de l'eau, des eaux usées et des boues ont augmenté de 6,8 % par rapport à l'année précédente – pour une valeur totale de plus de 1,1 milliard d'euros. La raison pour laquelle les solutions allemandes sont utilisées dans le monde entier ne tient pas seulement à la bonne réputation de la marque « Made in Germany », qui promet qualité et longue durée de vie. Les entreprises allemandes se caractérisent plutôt par leur force d'innovation et leur flexibilité : être en mesure d'offrir des solutions parfaitement adaptées pour les situations les plus diverses est caractéristique des entreprises allemandes. Les exemples présentés dans ce compendium montrent à titre d'illustration des modèles de solutions possibles pour les défis techniques du traitement des eaux usées industrielles dans la région MOAN et en Inde.

La mission de German Water Partnership e. V. en tant que puissant réseau comptant plus de 350 membres de l'industrie allemande de l'eau et des eaux usées, consiste à rendre ces atouts visibles à l'échelle internationale. Le savoir-faire et la grande expérience du groupe de travail sur la gestion des eaux industrielles ainsi que des forums régionaux en Inde et Afrique du Nord/Jordanie ont été intégrés dans la création du présent compendium.

Avec la création de ce compendium des eaux industrielles, le ministère fédéral de l'Environnement,



de la Protection de la nature et de la Sécurité nucléaire poursuit sa longue et fructueuse collaboration avec German Water Partnership e. V. dans le cadre de l'initiative d'exportation de technologies environnementales. Je tiens à remercier tous les experts participants ainsi que les collaborateurs du projet mondial de la Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), avec lequel la GIZ soutient l'initiative d'exportation de technologies environnementales, pour leur bonne et fructueuse coopération. Une fois de plus, cela pourrait créer un élément important pour la distribution internationale réussie de solutions technologiques durables « Made in Germany » et en même temps apporter une contribution à la protection de notre environnement.

Cordialement

Julia Braune
Directrice
German Water Partnership e. V.

Liste des abréviations

μS	Microsiemens
AFS	Substances filtrables
AOX	Mesure pour les halogènes à liaison organique
PIB	Produit Intérieur Brut
DBO ₅	Demande biochimique en oxygène pendant 5 jours
°C	Degré Celsius
Ca	Calcium
CETP	Station d'épuration commune (Common effluent treatment plant)
CIP	Nettoyage sur site (Cleaning in place)
cm	Centimètre
CO ₂	Dioxyde de carbone
DCO	Demande chimique en oxygène
DOC	Carbone organique dissous (Dissolved organic carbon)
DWA	Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (Association allemande pour la gestion de l'eau, des eaux usées et des déchets)
EGSB	Lit de boue granulaire expansé (Expanded granular sludge blanket)
h	Heure
ha	Hectare
H ₂ S	Sulfure d'hydrogène
ISO	Norme selon les définitions de l'Organisation internationale de normalisation, par exemple ISO 14001 (norme de gestion environnementale)
kg	Kilogramme
km	Kilomètre
km ²	Kilomètre carré
l	Litre
m ³	Mètre cube
MBR	Bioréacteur à membrane
MOAN	Moyen-Orient et Afrique du Nord ; Dans le présent compendium, cela désigne en particulier les pays MOAN Égypte, Jordanie, Maroc et Tunisie
mg	Milligramme
Mio	Millions
Mrd.	Milliards
N	Azote
n.a.	Indisponible
Na	Sodium
NH ₄ ⁺	Ammonium
NTU	Unité de turbidité néphélométrique (Nephelometric turbidity unit)
OPEC	Organisation des pays exportateurs de pétrole (Organization of the petroleum exporting countries)
P	Phosphore
PFAS	Substances per- et polyfluoroalkyle (Per- and polyfluoroalkyl substances)
pH	Potentiel hydrogène
Pt-Co	Numéro de couleur Platine-Cobalt

t.....	Tonne
TOC.....	Carbone organique total (Total organic carbon)
TSS.....	Matières en suspension totales (Total suspended solids)
UASB.....	Lit de boues anaérobie à flux ascendant (Upflow anaerobic sludge blanket)
USD.....	Dollar américain
Rayons UV	Rayons ultraviolets
VOX.....	Halogènes organiques volatils (Volatile organic halogen)
OMS	Organisation Mondiale de la Santé (World Health Organization)
ZLD	Rejet liquide nul (Zero liquid discharge)

Abrégé

Le rejet des eaux usées provenant d'activités industrielles représente un défi planétaire et les pays en voie de développement ainsi que les pays émergents sont particulièrement menacés par la pollution de l'environnement. L'objectif de ce compendium est de soutenir le développement et la mise en œuvre de solutions environnementales en Inde et dans la région MOAN. Il est destiné à servir de guide aux utilisateurs, aux décideurs et aux fournisseurs de technologies en éclairant

la situation des eaux usées industrielles dans les pays partenaires et en présentant des solutions concrètes pour l'épuration des eaux usées. Dans le cadre de l'agenda 2030, ce compendium vise à contribuer à la protection de l'environnement et du climat afin d'atteindre les objectifs de développement durable ^[1].

Le compendium contribue à la mise en œuvre de l'objectif de durabilité 6, qui milite pour

l'eau potable et l'accès aux installations sanitaires. En particulier, il aborde le sous-objectif 6.3 : « D'ici 2030, la qualité de l'eau doit être améliorée en réduisant la pollution, en mettant fin au rejet et en réduisant au minimum la libération de produits chimiques et de substances dangereuses, en réduisant de moitié la proportion d'eaux usées non traitées et en augmentant considérablement le retraitement et la réutilisation sans danger dans le monde entier. »

Pour diverses raisons (par exemple, réduire les coûts, éviter les transports, prendre en compte les particularités locales), la production et l'acquisition des composants des installations industrielles sur place dans les pays partenaires sont à recommander dans de nombreux cas. Cependant, les composants innovants des fournisseurs de technologie allemands spécialisés peuvent apporter une contribution

décisive à des exigences particulières. Le présent compendium se focalise donc sur les technologies de pointe développées en Allemagne pour le traitement des eaux usées industrielles. Par exemple, les filières industrielles à haute valeur ajoutée ou les stations d'épuration communes représentent des domaines d'application prometteurs dans les pays partenaires. Un facteur important pour l'utilisation de technologies d'épuration innovantes est le renforcement

du cadre réglementaire sur site, ainsi que l'optimisation de la sécurité d'approvisionnement et de l'efficacité énergétique. L'expertise des fournisseurs de technologie allemands permet de développer des solutions sur mesure pour des problèmes concrets sur site – en tenant compte des situations techniques, économiques, géographiques et réglementaires. Les technologies qui ont fait leurs preuves dans le traitement des

eaux usées industrielles en Allemagne depuis de nombreuses décennies s'accompagnent désormais d'approches innovantes visant à mettre en œuvre des solutions durables et globales pour les eaux usées.

Le compendium se divise en 10 chapitres mettant en évidence des secteurs industriels sélectionnés dans les pays partenaires. L'importance économique en Inde et dans les pays MOAN est abordée et les principes techniques les plus importants de la situation des eaux usées sont brièvement décrits. Cela inclut la composition type des eaux usées et les solutions de pointe ainsi que les développements législatifs, économiques et techniques actuels. À la fin de chaque chapitre, nous présentons des études de cas pour la mise en œuvre avec succès de la technologie des fournisseurs allemands dans les régions et les secteurs.

Objectif de ce compendium : soutenir les solutions écologiques en Inde et dans la région MOAN

Pertinence de secteurs économiques particuliers

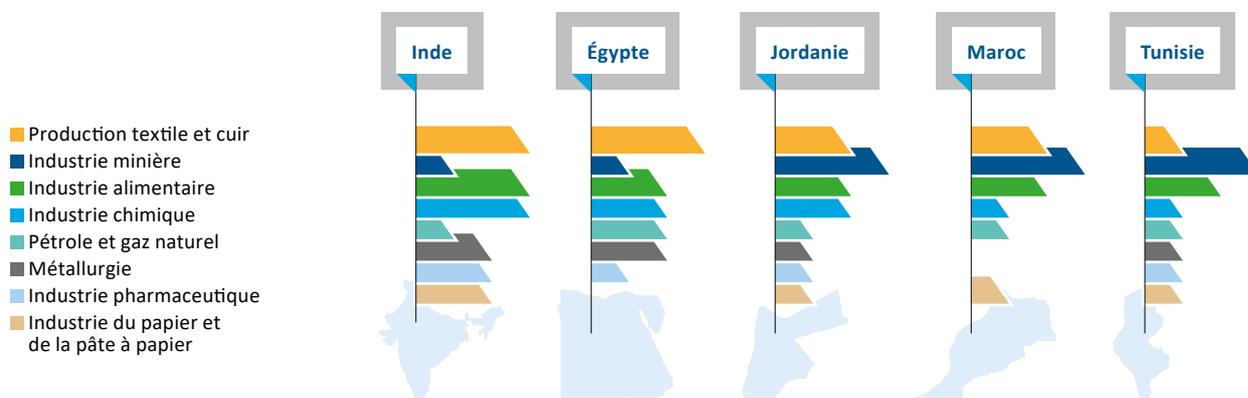


Figure 1: Évaluation semi-quantitative de l'importance des secteurs économiques individuels dans les régions (2020) (basé sur [3])

Eaux usées industrielles en Inde et dans la région MOAN

Inde

L'économie indienne, déjà la sixième économie du monde, compte également parmi les plus dynamiques [2]. Avec 1,35 milliard d'habitants, l'Inde est également le deuxième pays le plus peuplé au monde après la Chine. En tant que puissance économique montante, l'industrie indienne est représentée dans presque tous les secteurs importants avec des entreprises locales et internationales (Figure 1). La pression exercée sur les entreprises par des réglementations environnementales plus strictes et des objectifs de durabilité ne cesse d'augmenter, ce qui oblige à repenser de manière générale l'utilisation de l'eau en tant que ressource. Les thématiques centrales sont actuellement l'évitement des rejets d'eaux usées par le biais du « Zero Liquid Discharge » (ZLD) dans les grandes entreprises et la construction de stations d'épuration centrales pour les eaux usées industrielles.

ZLD est au premier plan, en particulier pour les flux d'eaux usées fortement polluées provenant de sous-secteurs individuels. Les réglementations ZLD sont actuellement obligatoires pour les industries du bassin du Gange et pour certaines branches de l'industrie dans certains États (par exemple pour la transformation du textile au Tamil Nadu). Il est

probable que ces réglementations seront étendues à d'autres zones industrielles avec une forte densité d'industries pertinentes pour l'environnement, notamment la production de textile et de cuir, le papier, la chimie et la pharmacie, l'industrie alimentaire et la métallurgie [3]. Il faut également s'attendre à ce que le régime réglementaire devienne plus strict à l'avenir en raison d'une surveillance en ligne accrue des eaux usées industrielles, exigée par le Central Pollution Control Board.

Les stations d'épuration dites communes « Common Effluent Treatment Plants » (CETP) font de plus en plus leur apparition pour résoudre les problèmes de rejet d'eaux usées dans les petites entreprises et les centres industriels. Il existe actuellement environ 200 CETP en Inde. En raison de changements dans la législation et la responsabilité, les exigences de protection technique de l'environnement sur les CETP sont devenues plus strictes. Les contrats de maintenance des sites sont passés d'un an après la mise en service à 15 ans pour l'exploitation et la maintenance, ce qui conduira à un intérêt accru pour les technologies pérennes [4]. De plus, on peut observer l'implantation et l'expansion croissantes de parcs industriels, ce qui augmentera le nombre d'options disponibles pour la construction de CETP. Le gouvernement indien fournit jusqu'à 75 % des fonds d'investissement pour les CETP [3].

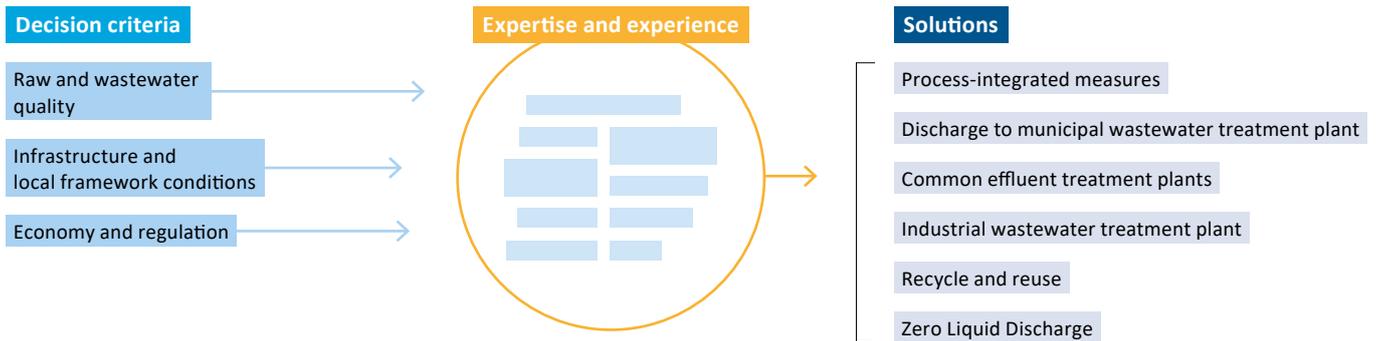


Figure 2: Représentation schématique des processus de recherche de solutions techniques dans le traitement des eaux usées industrielles

Decision criteria

Raw and wastewater quality	Infrastructure and local framework conditions	Economy and regulation
<ul style="list-style-type: none"> • Volume • Temperature • Pollutants: organics, nutrients, solids, salts, metals, toxic/refractory compounds • Water/resource recovery potential 	<ul style="list-style-type: none"> • Fresh water availability and quality • Spatial footprint • Accessibility of municipal wastewater treatment facilities • Disposal options for waste/sludge • Closed loop system potential (energy, resources, water) • Technology availability (local/imported) • Potential synergies with local industries • Supply chain security • Stability of energy supplies • Availability expertise/specialists • Potential for digitisation and automation 	<ul style="list-style-type: none"> • Regulation and enforcement • (National) environmental monitoring schemes • Available investment capital • Costs for raw water, treatment, discharge, external wastewater treatment and energy • Sustainability goals • Energy/carbon reduction targets

Figure 3: Catégorisation et liste des situations et des bases de décision les plus importantes pour trouver des solutions techniques

Région MOAN

Au total, les pays que sont l'Égypte, la Jordanie, la Tunisie et le Maroc comptent environ 163 millions d'habitants. Ce sont des puissances économiques très importantes pour l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient. ^[5] Les branches importantes de l'économie sont l'industrie alimentaire, l'industrie chimique, la production de textile et de cuir ainsi que l'exploitation minière (Figure 1) – les gisements de phosphate au Maroc, qui comptent parmi les plus importants au monde, doivent être signalés en particulier. La raréfaction des ressources en eau résultant des changements des conditions climatiques et des réglementations environnementales plus strictes imposées par les gouvernements responsables affecte de plus en plus les entreprises de la région.

Ici aussi, on peut observer une tendance à la création de parcs industriels centralisés, y compris le traitement centralisé des eaux usées qui l'accompagne ^[6]. En outre, une augmentation du degré de connexion des entreprises industrielles est souhaitée dans la région, comme cela est encouragé, par exemple, dans une initiative gouvernementale en Jordanie ^[7]. La réutilisation de l'eau et des ressources qu'elle contient jouent également un rôle central dans les concepts d'eau industrielle. Dans la région MOAN, l'accent est mis sur son utilisation pour irriguer les plantes. Dans ce contexte, des normes minimales ou directives légales relatives à la réutilisation de l'eau devraient minimiser le risque de pollution pour l'homme et l'environnement. Le cadre réglementaire est le plus développé en Jordanie ; une « Politique de Substitution et de Réutilisation de l'Eau » y est en place depuis 2016. Le volume thématique « Réutilisation non potable » de la Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA) (Association allemande pour la gestion de l'eau, des eaux

usées et des déchets) récapitule les informations sur les processus de traitement possibles pour diverses réutilisations de l'eau ^[8].

Eaux usées industrielles

Bien qu'elles soient très différemment structurées, culturellement et économiquement, les régions considérées présentent également de forts chevauchements – notamment en ce qui concerne la pertinence des différents secteurs industriels, comme on peut le voir dans la Figure 1.

Les principaux moteurs de l'amélioration de la situation des eaux usées industrielles en Inde et dans la région MOAN sont des exigences légales de plus en plus strictes et une disponibilité (régionale) limitée en eau douce. La mise en œuvre optimale du traitement des eaux usées dépend fortement des situations techniques, géographiques, économiques et réglementaires spécifiques (Figure 2).

La base la plus importante pour le choix de la technologie est la quantité et la composition des eaux usées produites, mais aussi les conditions d'infrastructure, par exemple les options pour l'obtention des ressources et pour l'élimination des déchets. D'un point de vue économique, le capital disponible, les structures de coûts et l'expertise spécialisée sur site jouent un rôle décisif. Le degré d'épuration

des eaux usées et, au besoin, de la réutilisation de l'eau dépend de facteurs écologiques, par exemple de la sensibilité du cours d'eau récepteur et de la disponibilité générale d'eau douce sur le site, mais il va sans dire également des exigences légales et réglementaires (Figure 3). Tous les facteurs pertinents sont finalement inclus dans le processus de prise de décision technique pour l'épuration des eaux usées

La réutilisation de l'eau et des ressources qu'elle contient joue également un rôle primordial dans les concepts d'eaux industrielles.

industrielles. Outre les opérateurs d’installations industrielles, des prestataires de services technologiques, qui possèdent l’expertise appropriée et une vaste expérience, interviennent eux aussi généralement. L’implication d’associations industrielles et d’instituts de recherche assure également le transfert de savoir-faire et d’innovation (Figure 4).

La plus haute priorité dans la prise de décision technique devrait être d’adopter une approche intégrative. La meilleure utilisation possible de la ressource eau peut être garantie par l’utilisation judicieuse des synergies entre les (sous-)processus. Un exemple positif d’approche technique globale est le traitement des eaux usées mis en œuvre par Remondis sur un site indien de galvanoplastie chimique/plastique (p. 28). Un prétraitement ciblé et une purification supplémentaire permettent de réutiliser environ 90 % de l’eau. Une utilisation optimale peut également être obtenue en construisant des stations d’épuration industrielles



Figure 4: Interaction des acteurs, dont l’expertise et la vaste ‘expérience concourent à trouver les solutions techniques



communes (CETP). Tant en Inde que dans les pays de la région MOAN, on observe une tendance vers des parcs industriels centralisés et donc des stations d'épuration centralisées. Toutefois, il est important ici de peser soigneusement les avantages et les inconvénients des différents scénarios de traitement – le traitement conjoint des eaux usées peut être très efficace, en particulier pour les entreprises de secteurs industriels similaires, tandis que dans d'autres cas, un (pré)traitement séparé est souvent nécessaire. La mise en œuvre technique spécifique du traitement des eaux usées peut finalement – en fonction de l'objectif de traitement et des conditions sur place – comprendre différentes étapes de traitement, par exemple des procédés biologiques, physico-chimiques ou membranaires (Figure 4).

Le cadre géographique respectif donne souvent lieu à des considérations pour la réutilisation ou l'utilisation ultérieure des eaux usées dans les régions couvertes. Cependant, l'inclusion de facteurs

techniques et d'exigences légales est également importante : le système doit pouvoir fonctionner efficacement – également en ce qui concerne les exigences énergétiques – et garantir le respect des valeurs guides et – le cas échéant – des valeurs limites. Cela s'applique en particulier à la mise en œuvre de systèmes sans eaux usées, qui est actuellement encouragée à la fois en Inde et dans la région MOAN par le biais d'initiatives gouvernementales. Les composants techniques développés pour relever les défis cités sont disponibles aujourd'hui. Cependant, la base d'une planification et d'une conception bien pensées du traitement des eaux usées est d'abord une base de données bien fondée sur la capacité, la composition et d'autres spécificités des eaux usées. En définitive, la surveillance du fonctionnement de la station par l'exploitant et de la qualité des eaux usées par les autorités responsables est indispensable pour un respect fiable des conditions à remplir pour la protection des ressources aquatiques. □

Solutions

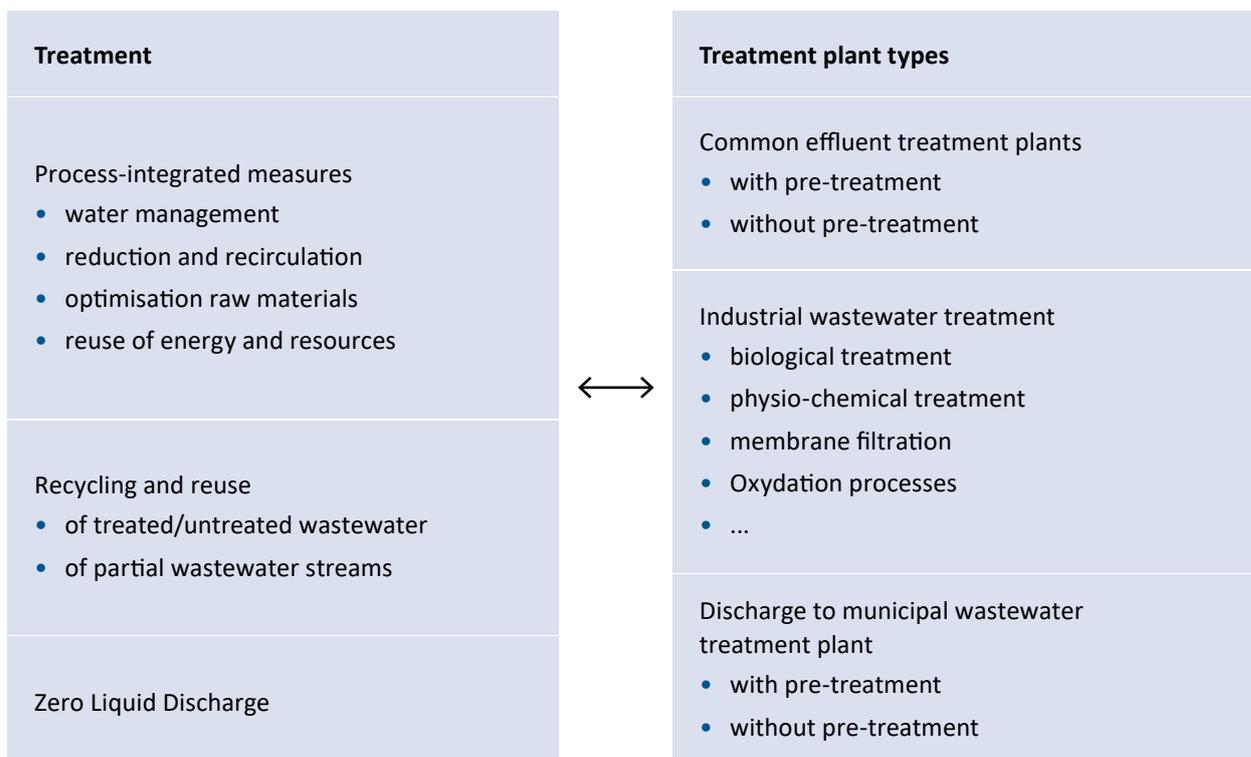


Figure 5 : Aperçu des solutions techniques possibles pour l'épuration des eaux usées industrielles en fonction de la priorité dans le cas individuel

1

PRODUCTION DE

PÉTROLE

ET DE GAZ



Informations spécifiques aux pays

Inde

Le volume de production annuel de l'industrie pétrolière et gazière indienne s'élève à environ 34 millions de tonnes de pétrole brut et 32 millions de m³ de gaz naturel et l'Inde se classe 24e parmi les pays producteurs de pétrole^[9]. Le pays comprend 26 bassins sédimentaires d'une superficie totale de 3,14 millions de km², dont 1,35 million de km² sont en eau profonde (plus de 200 m de profondeur). Une proportion relativement importante des réserves de pétrole et de gaz se trouve donc à terre, ce qui simplifie la production. Les gisements les plus importants se trouvent dans l'Assam et au large de la côte ouest (pétrole et gaz), au Gujarat (pétrole) et au large de la côte est du pays (gaz). Une grande partie des bassins sédimentaires de l'Inde n'est jusqu'à présent que peu ou presque pas développée, avec une densité moyenne d'un puits par 250 km². Dans l'ouest du pays en particulier, des réserves pétrolières encore plus importantes (environ 700 millions de t) attendent d'être exploitées.

Le pays tente de répondre à la demande nationale croissante en pétrole et gaz en exploitant davantage les gisements (y compris les sources non

conventionnelles ou en eau profonde). Un accent important est également mis sur l'amélioration du rendement des installations d'extraction existantes. Outre quelques investisseurs privés nationaux et étrangers, le secteur indien du pétrole et du gaz est dominé par de grandes sociétés nationales – parmi les plus importantes figurent ONGC (Oil and Natural Gas Corporation), Reliance Industries et Indian Oil^[10]. Les défis pour la mise en œuvre des projets d'investissement sont dans certains cas des contraintes réglementaires complexes et la réglementation des prix des produits pétroliers par l'État^[11].

MOAN

Les principaux pays producteurs de pétrole de la région MOAN sont l'Arabie saoudite, l'Iran, l'Irak, le Koweït et les Émirats arabes unis. Outre l'Algérie et la Libye, l'Égypte joue un rôle important sur le continent africain (Figure 1). L'Égypte est le plus grand producteur de pétrole africain en dehors de l'OPEP, le troisième plus grand producteur de gaz sur le continent et bénéficie d'un emplacement stratégiquement favorable sur le canal de Suez. Les gisements les plus importants se trouvent dans le désert occidental et le golfe de Suez. Ces dernières années, d'importants gisements de gaz naturel ont été découverts, et sont aujourd'hui mis en valeur par des investisseurs nationaux et internationaux. L'un de ces gisements est le plus grand champ de gaz naturel



connu de la Méditerranée – Zohr (« fleur ») – qui a été découvert en 2015 ^[12]. En Égypte, des sociétés nationales et internationales (par exemple Shell, BP) sont impliquées dans l’exploration ^[13].

En comparaison directe, la Tunisie n’est qu’un petit producteur de pétrole et de gaz Figure 1) et le marché est dominé par les entreprises nationales ^[13]. Les gisements les plus importants sont El Borma et les champs récemment développés de Zarat et Miskar (en eau profonde) ^[14]. En outre, il existe deux importantes formations schisteuses dans le sud du pays, qui doivent être utilisées à l’avenir comme sources non conventionnelles ^[15]. En Jordanie et au Maroc, le développement des réserves de pétrole et de gaz n’en est qu’à ses balbutiements (Figure 1). Les deux pays couvrent la majeure partie de leurs besoins énergétiques avec des importations et n’ont jusqu’à présent produit que des quantités relativement faibles de pétrole brut et de gaz naturel. Un certain nombre de sociétés nationales ainsi que la quasi-totalité des sociétés internationales de renom (Shell, BP, ENI, Repsol) sont impliquées dans les explorations ^[16]. Les formations de schiste jouent un rôle important en Jordanie ainsi qu’au Maroc – environ 70 % de la superficie de la Jordanie est couverte de schiste bitumineux (environ 30 millions de tonnes de pétrole et donc le quatrième gisement mondial). Cependant, il s’agit d’une ressource relativement difficile à utiliser ^[17, 18].

Production d’eaux usées dans le secteur

Le secteur industriel de la production de pétrole brut et de gaz naturel comprend l’exploration et le développement de gisements au moyen de puits d’exploration ainsi que l’exploitation régulière de puits de production. En plus des gisements de pétrole et de gaz conventionnels, des sources non conventionnelles sont de plus en plus exploitées par fracturation hydraulique. La fracturation consiste à pomper dans des trous de forage un fluide de fracturation sous haute pression (généralement plusieurs centaines de bars) afin de briser hydrauliquement la roche réservoir et ainsi augmenter la perméabilité au pétrole ou au gaz.

De grandes quantités d’eau sont utilisées à toutes les étapes de la production pétrolière et gazière, du forage de puits aux opérations de production. En moyenne mondiale, environ 3 m³ d’eau sont nécessaires par m³ de pétrole extrait – avec une tendance à la hausse. En termes de quantité, le flux d’eaux usées le plus important résultant de l’extraction conventionnelle est l’eau de gisement.

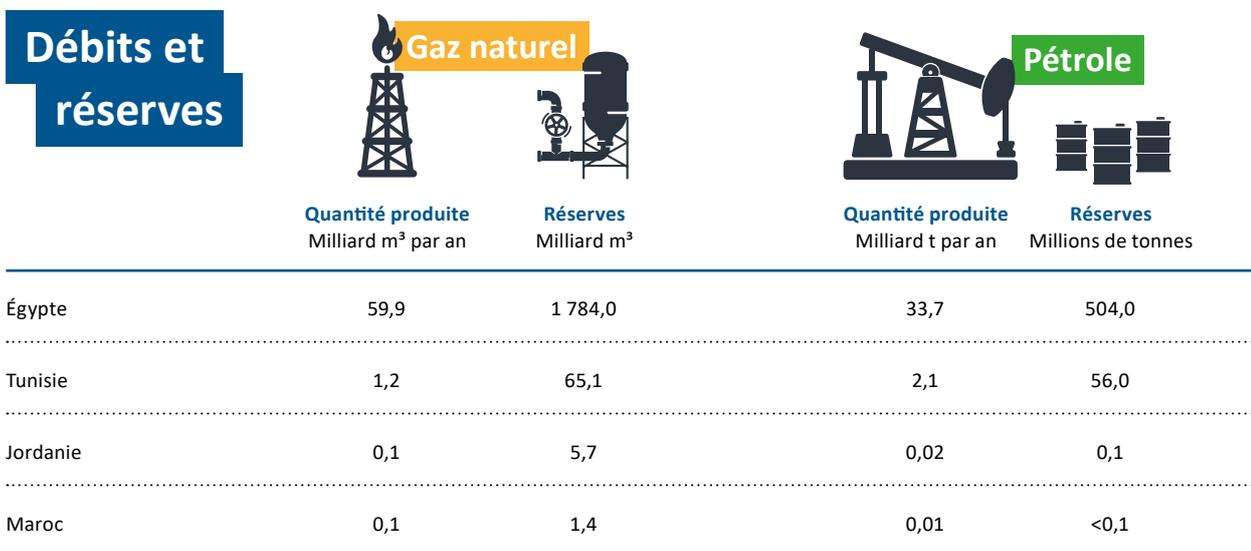


Figure 1: Volumes de production et réserves de pétrole brut et de gaz naturel dans certains pays de la région MOAN (2018) ^[19, 20, 21]

Des eaux usées sont également générées lors de l'inondation de puits de forage vieillissants. De plus, diverses boues (de forage) et eaux de refroidissement peuvent apparaître et doivent être traitées et éliminées. Si des sables bitumineux sont extraits, les bassins de résidus sont une source d'eaux usées à considérer. Dans la fracturation hydraulique, une grande partie du liquide de fracturation utilisé se présente encore sous forme d'eau de retour ^[22].

Le mélange de différents flux d'eaux usées n'est possible que dans une mesure limitée, car les minéraux et les sels dissous peuvent entraîner des précipitations et des dépôts dans les conduites, les installations ou les forages. Les exploitants peuvent maximiser leur rendement en minimisant les pertes d'huile dans les eaux usées et en récupérant l'huile vendable. De même, dans les régions arides, le traitement et la réutilisation des eaux usées peuvent représenter un avantage non seulement écologique mais aussi économique ^[23]. Avant cela, les flux d'eaux usées doivent être analysés au regard des substances nocives qu'ils contiennent, les risques pour la santé humaine, les sols, les eaux souterraines et les plantes doivent être pris en compte et les exigences et mesures correspondantes doivent être définies.

Débits et propriétés des eaux usées

Eau résiduelle

L'eau résiduelle est l'eau stockée dans des formations géologiques qui remonte à la surface par des puits de production. L'eau contient divers résidus de la géofomation stockée jusqu'à saturation, y compris des

Paramètre	Concentration	Unité
Conductivité	4 200–58 600	µS/cm
pH	4,3–10	-
Carbone organique total (TOC)	0–1 500	mg/l
Matières solides	1,2–10 623	mg/l
Huile et graisse	2–565	mg/l
Azote ammoniacal	10–300	mg/l
Chlorure	80–200 000	mg/l
Sulfate	<2–1 650	mg/l

Tableau 1: Paramètres de qualité types de l'eau résiduelle issue de la production pétrolière ^[26]

hydrocarbures liquides ou gazeux et d'autres substances organiques (par exemple benzène, toluène, éthylbenzène, xylène, naphthalène, phénol) soit sous forme dissoute, soit flottant sous forme de pétrole libre. L'eau résiduelle contient également des métaux lourds et d'autres résidus inorganiques – certains avec une radioactivité naturelle – qui, selon la formation géologique, s'accumulent

sélectivement dans l'eau (par exemple, l'uranium, le radium, le radon, le plomb, l'arsenic, le cadmium et les sulfures). En raison de son long temps de séjour dans les couches rocheuses profondes, l'eau qui s'échappe peut avoir des températures élevées (jusqu'à 150 °C) et après avoir traversé le trou de forage, elle peut également être contaminée par des produits chimiques de production (par exemple, agents anticorrosion, briseurs d'émulsion, biocides) ^[22, 24].

Dans la plupart des cas, l'eau résiduelle représente le flux de déchets le plus important dans la production de pétrole et de gaz, et la proportion d'eau produite augmente avec l'âge du forage. Les contaminants nécessitent une manipulation soignée et un traitement minutieux avant leur élimination (Tableau 1). Aujourd'hui, il est recommandé de réutiliser l'eau résiduelle après un traitement approprié, par exemple comme eau d'injection, afin de protéger l'environnement et d'économiser les ressources en eau. Ou encore, le flux de déchets peut être déversé dans des trous d'injection ou rejeté dans l'environnement sous forme d'eaux usées. La meilleure technologie disponible est le traitement de l'eau résiduelle par des procédés physico-chimiques jusqu'à la compatibilité environnementale ^[25]. La qualité de l'eau acceptable pour le rejet dans les eaux de surface est une teneur en hydrocarbures ne dépassant pas 10 mg/l, pour donner un exemple (Figure 2).

Eau de retour

Le liquide de fracturation à base d'eau utilisé dans la fracturation est appelé eau de retour, et il retourne à la surface par le trou de forage une fois les opérations terminées. La quantité d'eau de retour est d'environ 10 à 30 % de la quantité de liquide de fracturation utilisée et dépend également du nombre de phases de fracturation réalisées et des conditions du gisement. Les substances contenues dans les eaux de retour sont diverses, et se composent des additifs chimiques du liquide de fracturation et des impuretés captées dans le forage. En particulier du sable, des agents anticorrosion, des acides, des biocides, des lubrifiants ou des tensioactifs proviennent du liquide de fracturation. Les contaminants géogéniques fréquemment pertinents provenant du trou de forage sont des hydrocarbures aromatiques (par exemple le benzène, le toluène, l'éthylbenzène, le xylène), des substances liées à des particules à haute radioactivité naturelle et des composés volatils du mercure ^[22, 30].

La voie d'élimination la plus importante pour les eaux de retour est le dépôt dans des forages

d'injection ou la réutilisation pour des processus d'extraction secondaires ou tertiaires. Après un traitement approprié, il est également possible de les rejeter dans l'environnement. Certaines impuretés peuvent représenter un défi technique à la fois en termes de réutilisation et de traitement des eaux usées – par exemple, les filtres, les lits fixes et d'autres parties du système peuvent se boucher avec des gels polymères, des solides ou des précipités.

Eau d'injection

L'eau d'injection est utilisée d'une part pour effectuer des tests d'étanchéité hydrostatique et de résistance à la pression sur les systèmes. D'autre part, l'injection d'eau nettoie les forages et stimule ainsi l'écoulement du pétrole. Pour stabiliser l'eau d'injection, cette eau contient généralement un certain nombre d'additifs chimiques, tels que des agents anticorrosion, des biocides, des capteurs d'oxygène, des acides et éventuellement des substances traceuses. Les eaux usées générées après utilisation sont en outre contaminées par des substances provenant du forage,

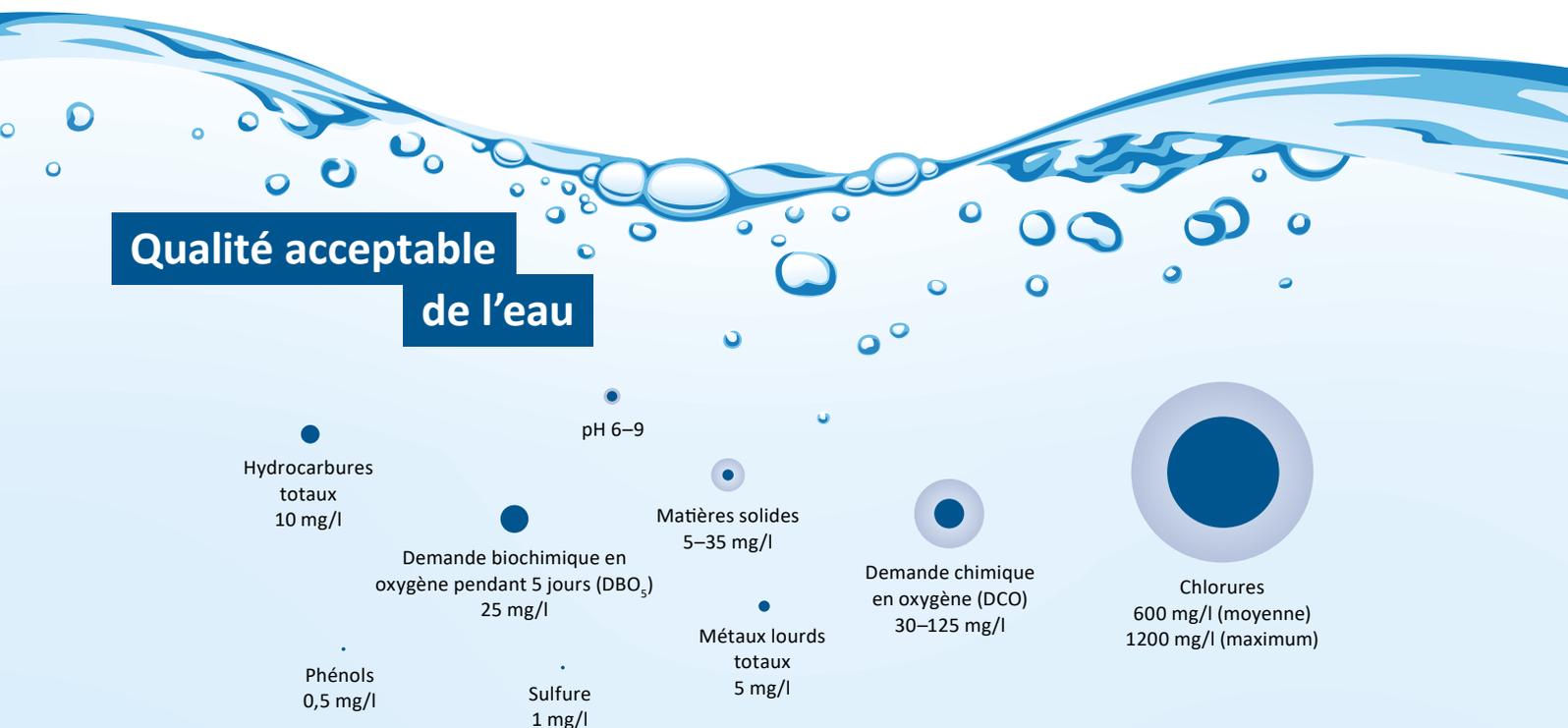


Figure 2: Qualité de l'eau acceptable pour le rejet dans les eaux de surface des eaux résiduelles traitées ^{[27] [28] [29]}

telles que des huiles, des graisses et d'autres hydrocarbures (par exemple, benzène, toluène, éthylbenzène, xylène) ainsi que des solides, du fer et souvent du chlore ^[22]. La meilleure technologie disponible aujourd'hui est la réutilisation des eaux d'injection, éventuellement après traitement sur site ou par des tiers. Si cette eau doit être éliminée, il faut l'épurer physiquement et chimiquement avec un contrôle de qualité ultérieur. ^[25]

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Le choix du procédé de traitement des eaux usées dépend de la composition, des conditions géologiques spécifiques du gisement sur site et de la réutilisation ou de l'utilisation ultérieure éventuellement souhaitée des flux d'eau. En règle générale, un prétraitement par des procédés de séparation physique et chimique a lieu en premier. Cela comprend la filtration grossière avec des grilles de retenue, des filtres ou des filtres à lit fixe, ou la sédimentation en combinaison avec une coagulation électrique ou chimique pour éliminer les matières en suspension.

Un traitement ultérieur au moyen de procédés biologiques est normalement difficile à réaliser en raison de la matière organique difficilement dégradable dans les eaux usées. Au lieu de cela, plusieurs étapes de processus physiques et chimiques avancés sont utilisées pour effectuer les tâches de séparation suivantes ^[31]:

- Élimination supplémentaire des solides en suspension
- Séparation grossière et fine des huiles et graisses dispersées et non dissoutes
- Séparation d'autres hydrocarbures dissous dans la plage de faible concentration
- Appauvrissement en métaux lourds dissous

Si un flux d'eaux usées doit être réutilisé ou utilisé ultérieurement après le traitement – par exemple comme eau d'injection ou comme composant du

liquide de fracturation – le choix du procédé doit répondre à des critères de qualité plus élevés. Dans la plupart des cas, au moins un dessalement supplémentaire doit être prévu.

Traitement plus poussé

Pour la séparation des solides et des huiles, on utilise dans le traitement plus poussé principalement des procédés de séparation physique qui font appel à la différence de densité des différentes phases. La séparation des fines particules en suspension peut être facilitée par l'addition de floculants, tandis que des briseurs d'émulsion peuvent être ajoutés pour séparer les huiles dispersées. Concrètement, les technologies suivantes sont prises en considération ^[25, 32]:

- Séparateur gravitationnel
- Hydrocyclones
- Pelle à godet
- Centrifugeuses
- Flottation au gaz

Après la séparation des phases, les eaux usées contiennent encore des impuretés organiques et inorganiques sous forme dissoute, généralement des hydrocarbures et des métaux lourds. Dans la plupart des cas, ces impuretés sont retirées des eaux usées à l'aide de procédés de séparation chimique, mais selon l'application, des procédés de filtration spéciaux ou des procédés thermiques peuvent également être utilisés. Les opérations de base les plus courantes sont les suivantes ^[25]:

- Filtration sur membrane
- Adsorption
- Extraction sur polymère
- Entraînement à la vapeur

Réutilisation

La réutilisation des eaux usées dans la production de pétrole et de gaz nécessite généralement un dessalement supplémentaire ^[33]. Les cations (par exemple sodium, calcium, magnésium, potassium) et les anions (par exemple chlorure, nitrate, Sulfate) sont éliminés. Les procédures suivantes sont généralement utilisées :

- Échange d'ions
- Procédés sur membrane
- Distillation □

ÉTUDE DE CAS : Traitement des eaux usées d'une raffinerie d'huile minérale dans la province du Shandong, en Chine

Modules de bioréacteur industriel à membrane (MBR)

Contexte

Le raffinage du pétrole brut est une industrie importante dans le monde entier, notamment en Inde et en Afrique du Nord. Dans le traitement biologique des eaux usées des raffineries de pétrole, la composition complexe des eaux usées et une proportion relativement élevée d'huile dans les eaux usées entraînent souvent des problèmes de respect des valeurs de rejet prescrites. L'un des défis qui se pose ici est le comportement de décantation parfois médiocre des boues activées dans la clarification secondaire du traitement biologique et la formation de boues dites flottantes, qui ne peuvent être retenues dans la clarification secondaire. Pour cette raison, des technologies de traitement des eaux usées sont utilisées dans ce domaine et offrent un haut niveau de fiabilité opérationnelle. La technologie des bioréacteurs à membrane (MBR) a donc été sélectionnée pour le traitement des eaux usées dans le projet dans la province du Shandong en Chine.

Défi particulier/Exposé du problème

Les eaux usées à traiter proviennent du raffinage du pétrole brut et, en plus des valeurs élevées de DCO et de DBO, contiennent des proportions élevées d'huiles et de solvants. Afin de respecter les valeurs d'effluent prescrites par la loi (Tab. 1) après le traitement des eaux usées, un contrôle de procédé approprié a été choisi. Les solvants, les huiles et le goudron du pétrole brut en particulier peuvent causer des problèmes au fonctionnement de l'installation. Une diminution fiable de la DBO et de la DCO ne peut être obtenue au stade biologique que si ces substances sont préalablement séparées. En outre, il faut s'assurer que même avec de mauvaises propriétés de sédimentation des boues en termes de biologie et de formation de boues flottantes, une teneur accrue en solides et les valeurs DCO et DBO élevées qui y sont liées dans les eaux en sortie de la station d'épuration doivent être exclues. Cet aspect prédestine notamment un procédé hybride à l'aide de membranes, permettant d'atteindre les plus faibles concentrations de solides au cours de l'étape biologique.

Proposition de solution

En raison de performances insuffisantes, une installation de traitement des eaux usées de la raffinerie de pétrole de la province du Shandong, en Chine, a été convertie en une solution MBR avec des modules MICRODYN BIO-CEL® XL. 14 modules BIO-CEL XL ont été utilisés dans la station d'épuration, qui offrent une surface membranaire totale de 26 880 m². Les modules sont disposés en deux lignes de filtration distinctes

Paramètre	Entrée	Sortie	Requis
DCO [mg/l]	700	≤ 60	≤ 70
DBO [mg/l]	200	≤ 15	≤ 20
Azote total [mg/l]	100	8	≤ 15
Phosphore total [mg/l]	3	0	≤ 1
TSS [mg/l]	230	≤ 10	≤ 10
Huile [mg/l]	25	0	≤ 5
Turbidité (NTU)	-	≤ 0,5	≤ 1

Tableau 1 Paramètres d'entrée et de sortie



Figure 1 : Modules membranaires immergés après installation (gauche) et en fonctionnement (droite)

dans un même bassin. Les débits maximum et moyen sont respectivement de 13 500 et 9 600 m³/jour.

Les processus du système d'épuration comprennent également :

- Séparateur d'huile
- Traitement CAF (Cavitation Air Flotation)
- Traitement DAF (Dissolved Air Flotation)
- Réservoir de compensation
- Réservoir primaire anoxique
- Réservoir de sédimentation
- Cuve anoxique secondaire
- Cuve de filtration (MBR)

Résultats

Les résultats résumés dans le tableau 1 de ce système MBR montrent que les modules MICRODYN BIO-CEL® XL traitent avec succès les eaux usées des raffineries de pétrole et peuvent systématiquement répondre

aux exigences du permis environnemental pour les eaux usées. Comme l'illustre le tableau 1, le système MBR a répondu à l'exigence d'eaux usées TSS de 10 mg/l. Les valeurs de DCO, DBO, azote total, phosphore total, huile et turbidité ont été considérablement réduites et ont dépassé les exigences du client en matière d'eaux usées. Le système de filtration membranaire est surveillé en mesurant en continu le débit, la pression transmembranaire et la turbidité.

Apport de la technologie fournie

L'installation d'un système MBR permet un fonctionnement stable avec une séparation presque complète des solides, même dans des conditions difficiles (par exemple, boues flottantes). Les modules MICRODYN autoportants utilisés ici offrent une densité d'assemblage très élevée et un fonctionnement relativement économe en énergie. □

2

INDUSTRIE

CHIMIQUE



Informations spécifiques aux pays

Inde

L'industrie chimique compte parmi les plus anciennes industries de l'Inde et contribue de manière significative au développement économique national du pays. La plupart des entreprises de fabrication de produits chimiques sont basées au Gujarat, suivi du Maharashtra et d'autres régions moins importantes. Le gouvernement soutient cet important pilier de l'économie en autorisant 100 % des investissements directs étrangers et par la production de la plupart des produits chimiques (à l'exception des substances dangereuses) sans redevance. Dans le dernier plan quinquennal national (2012–2017), en plus d'une variété de mesures de financement, un budget de l'équivalent de 83 millions de dollars a été mis à

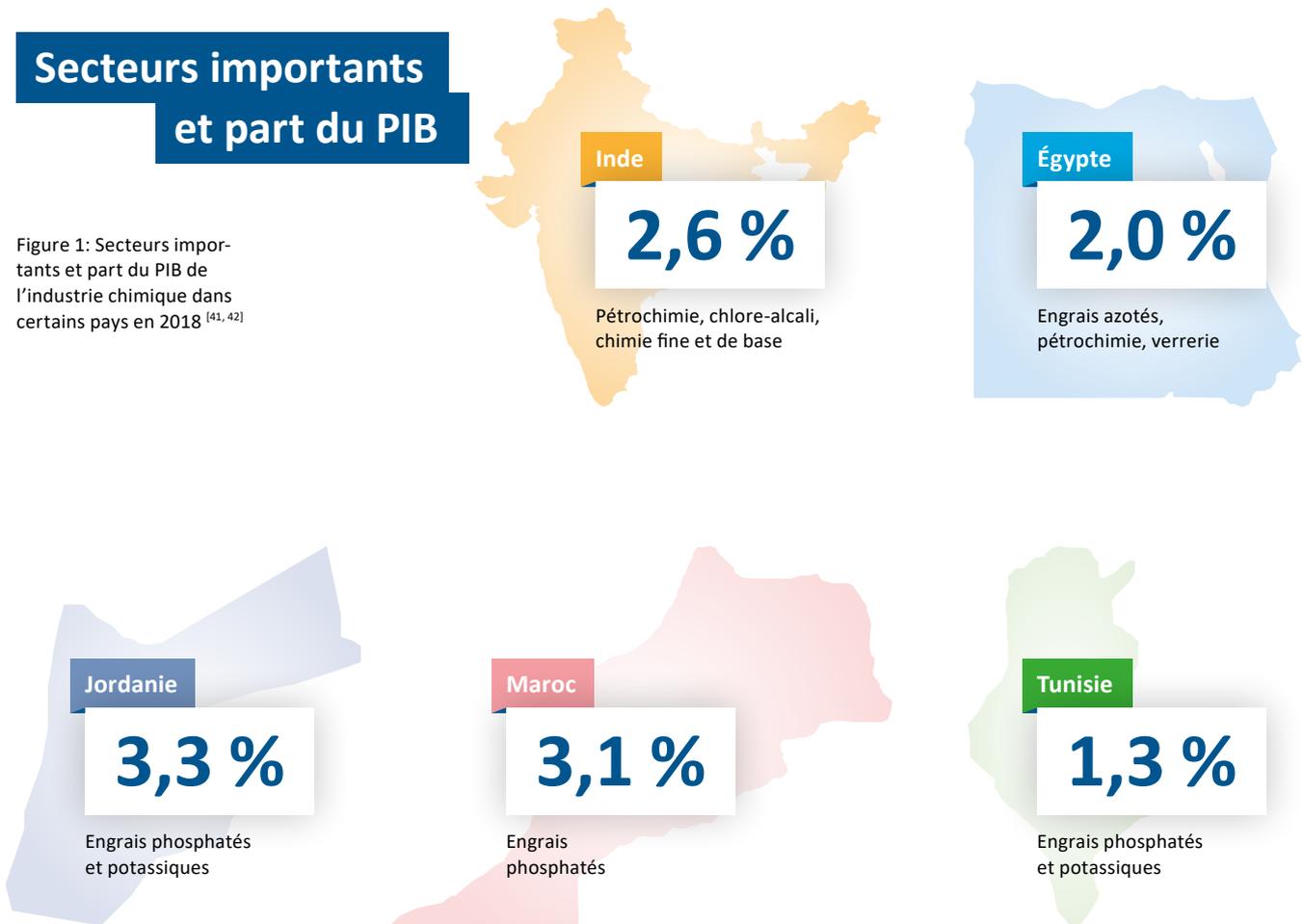
disposition pour améliorer le respect de l'environnement de l'industrie chimique. La croissance de l'industrie chimique est estimée à 13–14 % pour 2020–2025, celle de la pétrochimie notamment à 8–9 %^[34]. On peut trouver des grandes entreprises nationales et internationales. Certains des principaux producteurs de produits chimiques en Inde sont Aarti Industries, Atul, BASF, Evonik, Pidlite Industries, Tata Chemicals et UPL^[35].

- Les principaux secteurs de l'industrie chimique en Inde sont les suivants^[34]:
- Pétrochimie et produits chimiques organiques de base
- Produits chimiques inorganiques de base, en particulier industrie des engrais et du chlore-alcali
- Polymères
- Chimie fine et de spécialité, notamment colorants et pigments
- Industrie pharmaceutique



Secteurs importants et part du PIB

Figure 1: Secteurs importants et part du PIB de l'industrie chimique dans certains pays en 2018 ^[41, 42]



MOAN

Dans la région MOAN, l'industrie chimique s'est développée en lien étroit avec les ressources disponibles, c'est-à-dire que le traitement du pétrole brut et du gaz ainsi que des matières premières minérales joue le rôle le plus important (Figure 1).

Dans de nombreux pays de la région MOAN, la production d'engrais est le secteur le plus important et qui connaît la croissance la plus rapide. L'Égypte produit environ 2 millions de tonnes d'engrais par an avec une tendance à la hausse et est le plus grand producteur d'engrais azotés (ammonium/urée) de la région. Le marché est dominé par des entreprises locales telles qu'Abu Qir Fertilizers et Alexandria Fertilizers ^[36]. D'autres branches industrielles pertinentes sont la pétrochimie et la production de polymères, en particulier dans les régions

industrielles du Caire, d'Alexandrie et d'Helwan.

Le pays poursuit également un plan sur 20 ans pour étendre ses capacités de production de (poly)éthylène et d'autres oléfines ^[37].

Les autres ressources importantes de la région sont les minéraux phosphatés et potassiques. La Jordanie et la Tunisie possèdent de tels gisements et en tirent principalement des engrais phosphorés et potassiques ^[38]. Plus de 70 % des réserves mondiales de phosphate sont situées sur le territoire marocain, de sorte que la transformation du phosphate en engrais et en acide phosphorique est de loin la branche la plus importante de l'industrie chimique ^[39, 40]. Les principales entreprises de l'industrie marocaine et jordanienne des engrais sont étroitement liées aux gouvernements des États respectifs par le biais de partenariats ou de modèles de financement.

Production d'eaux usées dans l'industrie chimique

L'industrie chimique englobe une très grande variété de produits et de processus de production. Les procédés utilisés diffèrent selon le sous-secteur et le produit, par exemple dans la voie de synthèse respective, la catalyse et la gestion des procédés. L'industrie pétrochimique comprend le raffinage du pétrole, la production de produits chimiques organiques de base, par exemple par craquage thermique ou catalytique, et, sur cette base, la production de polymères comprenant des fibres synthétiques. Dans l'industrie des engrais, les matières premières minérales telles que les roches phosphatées ou potassiques sont souvent traitées. L'ammoniac, la matière de base des engrais azotés, est obtenu à l'aide du procédé Haber-Bosch à forte intensité énergétique. L'industrie du chlore-alcali produit de la soude, de la potasse, du chlore et, comme sous-produit, de l'hydrogène. Ce sont des matières premières importantes pour la production de produits chimiques inorganiques de base, de produits chimiques fins et de biens de consommation. Les substances inorganiques sont principalement produites à partir de solutions aqueuses des matières premières de base par cristallisation, filtration et séchage ^[22, 43].

La diversité des sous-secteurs et des processus de production dans l'industrie chimique se traduit par un degré élevé d'hétérogénéité des flux d'eaux usées. Les matières premières ou les produits cibles ne se trouvent que dans une faible mesure dans les eaux usées, qui contiennent plutôt les sous-produits de diverses réactions. Ces impuretés apparaissent lorsque des réactions ont lieu en phase aqueuse (l'eau comme solvant), des flux de substances sont lavés avec des solutions aqueuses ou dans le cas de réactions de condensation ^[22, 44].

Débits et propriétés des eaux usées

Pétrochimie et produits chimiques organiques de base

Dans presque toutes les raffineries, la vapeur est utilisée pour les processus de distillation et de séparation. Elle entre en contact direct avec les hydrocarbures à raffiner et constitue, sous forme condensée, le flux d'eaux usées le plus important en pétrochimie : des eaux acides avec des impuretés telles que l'ammoniac, l'hydrogène sulfuré et des hydrocarbures. Ce flux peut également contenir des résidus de métaux, de sels et d'autres substances inorganiques ^[22, 45].

Lors de la transformation ultérieure du pétrole en produits chimiques organiques de base et finalement en polymères, les flux d'eaux usées les plus importants se présentent sous forme d'eau de réaction ou d'eau de lavage lors du lavage (intermédiaire) du produit. Il existe souvent des charges organiques élevées sous forme d'acides organiques ou d'alcalis. Dans certains cas, cependant, des huiles, des métaux (lourds) et d'autres composés toxiques et/ou réfractaires, en tant que résidus de catalyseurs et adjuvants utilisés, se retrouvent également dans les eaux usées ^[46, 47, 48].

Production d'engrais

En plus d'oxydations catalysées, en particulier des procédés de filtration, de cristallisation et de



fusion sont utilisés dans les processus de production d’engrais. En plus des produits proprement dits, des flux de sous-produits pertinents apparaissent également, tels que les acides sulfurique et phosphorique dans le traitement du phosphate ou l’urée et l’acide nitrique dans le traitement de l’ammoniac. Les produits et les sous-produits se retrouvent parfois à d’importantes concentrations dans les eaux usées, qui apparaissent en particulier dans l’épuration des gaz rejetés, mais également en tant que fluide de refroidissement ou solvant utilisé. Les flux d’eaux usées sont généralement souvent acides et contiennent de multiples impuretés inorganiques [49, 50].

Industrie du chlore-alcali et autres produits chimiques inorganiques de base

Dans les usines de chlore-alcali, le chlore et l’alcali sous forme d’hydroxyde de sodium ou d’hydroxyde de potassium sont produits par électrolyse d’une solution saline. Cela crée à la fois une eau acide et une eau alcaline avec de fortes concentrations de sels et de métaux dissous. De nombreux flux d’eau sont très concentrés, de sorte que la récupération des sous-produits, le recyclage des adjuvants ou l’évaporation et l’élimination sont judicieux à la fois écologiquement et économiquement. Les adjuvants utilisés dans les systèmes chlore-alcali traditionnels sont

le mercure (dans le procédé au mercure) et l’amiante (dans le procédé à diaphragme). Aujourd’hui, cependant, les deux procédés ne sont plus considérés comme la meilleure technologie disponible et sont de plus en plus remplacés par le procédé moderne à cellules membranaires, dans lequel les eaux usées sont relativement peu polluées [51, 52].

En général, les flux d’eaux usées provenant de la production de produits chimiques inorganiques de base contiennent souvent des chlorures, des Sulfates, des phosphates, des fluorures et d’autres composés inorganiques. L’ammoniac et les teneurs élevées en solides peuvent également jouer un rôle important ici [50, 53]. Les eaux usées provenant de la production de carbonate de sodium sont souvent caractérisées par des pH élevés et de fortes teneurs en solides, tandis que des eaux usées contenant de l’acide sulfurique sont produites dans le lavage du chlore gazeux.

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Les flux d’eaux usées hétérogènes et diversement pollués de l’industrie chimique nécessitent souvent

	Neutra- lisation	Précipita- tion	Adsorption	Échange d’ion	Extraction	Entraîne- ment à la vapeur	Oxydation
Pétrochimie et produits chimiques organiques de base	✓	✓	✓		✓	✓	✓
Production d’engrais	✓			✓		✓	
Industrie du chlore- alcali et autres produits chimiques inorganiques de base	✓	✓	✓	✓			✓

Tableau 1: Processus couramment utilisés dans l’industrie chimique pour le prétraitement des eaux usées avec les sous-secteurs respectifs dans lesquels ils sont utilisés (basé sur [22, 46, 48, 50, 53, 54])

des schémas de traitement complexes, dont la mise en œuvre spécifique dépend de la composition respective des eaux usées. De nombreux flux d'eaux usées contiennent des charges organiques élevées à bonne biodégradabilité – dans ces cas, le traitement biologique constitue le cœur du traitement des eaux usées. Si les eaux usées sont également contaminées par des substances gênantes, elles doivent d'abord être soumises à un prétraitement, qui peut pour- suivre, entre autres, les objectifs suivants ^[22]:

- Neutralisation pour créer des conditions optimales de biodégradation
- Élimination des substances ayant un effet toxique sur le système biologique
- Augmentation de la biodégradabilité des eaux usées (par exemple par oxydation)
- Élimination des impuretés non biodégradables
- Réduction de charge de demande chimique en oxygène (DCO) ou en azote selon la capacité du système biologique

Dans l'industrie chimique, le traitement des flux d'eau est difficile à distinguer des procédés de production et des procédés auxiliaires de production, par exemple lorsqu'il s'agit du recyclage de solvants ou d'eaux de lavage. Avec des possibilités techniques croissantes, il existe également un potentiel pour le traitement, le recyclage et la réutilisation d'adjuvants et de sous-produits à partir de solutions aqueuses. Le traitement de l'eau de process avant son utilisation dans le processus lui-même joue également un rôle important.

Prétraitement des eaux usées

Presque toutes les eaux usées industrielles doivent être prétraitées avant le traitement biologique. Afin d'atteindre les objectifs mentionnés ci-dessus, en particulier des méthodes de traitement chimique-physique ou thermique sont utilisées (Tableau 1). Les plus courantes sont ^[22, 46, 48, 50, 53, 54]:

- Neutralisation
- Précipitation
- Adsorption
- Échange d'ions
- Extraction
- Entraînement à la vapeur
- Oxydation

Épuration biologique

Les flux d'eaux usées dans l'industrie chimique ont des propriétés physiques et chimiques très différentes. De nombreux flux d'eaux usées de l'industrie chimique ont des propriétés favorables pour les processus d'épuration biologique, c'est-à-dire des charges organiques élevées et des températures modérées. L'épuration biologique comprend deux étapes :

- Dégradation du carbone via le procédé aérobie des boues activées
- Élimination de l'azote par nitrification et dénitrification

Les systèmes peuvent être conçus en plusieurs étages avec différentes interconnexions des différents étages du processus. L'aération est généralement réalisée à l'aide de systèmes d'injection robustes qui permettent une introduction efficace de l'oxygène. Dans certains cas, les gaz rejetés du premier étage biologique doivent être traités afin d'éviter le rejet de substances volatiles.

Des fluctuations de l'alimentation et de la concentration, des impuretés gênantes et des teneurs en sels élevées (>20 g/l) peuvent cependant avoir un effet problématique sur le fonctionnement d'un système d'épuration biologique. De plus, les eaux usées de l'industrie pétrochimique ne contiennent souvent que de faibles quantités de composés phosphorés utilisables, ce qui rend nécessaire une addition supplémentaire de phosphates ou d'acide phosphorique pour l'épuration biologique ^[22, 55].

Traitement ultérieur

La récupération et la réutilisation d'adjuvants liées à la production ou intégrées à la production, par exemple le recyclage de condensats ou la récupération de solvants par distillation, sont traditionnellement établies et indispensables pour une efficacité élevée du système. Si l'eau doit être récupérée et réutilisée, l'ultrafiltration et l'osmose inverse sont généralement utilisées. Avec la concentration croissante des entreprises manufacturières dans les parcs industriels, la fermeture des cycles de matériaux locaux par la récupération et la réutilisation des (sous)produits est également à portée de main. D'autant plus que les parcs industriels permettent désormais un traitement efficace des eaux usées très complexes dans l'industrie chimique ^[44]. □

ÉTUDE DE CAS : Galvanoplastie chimique/plastique en Inde

Conception et exploitation d'un système à rejet liquide nul (ZLD)

Contexte

En 2017, Euro American Plastic Products (EAP) a construit une nouvelle unité de production pour le revêtement de pièces en plastique pour l'industrie automobile près de New Delhi (Inde). REMONDIS a été mandaté par EAP pour construire, financer et exploiter le système d'assainissement dans le cadre d'un contrat BOOT.

Défi particulier/Exposé du problème

La composition des eaux usées est typique pour ce type de revêtement galvanique. Le tableau 1 montre

Paramètre	Valeur
Quantité [m ³ /jour]	200
pH	4–6
Lf [µS/cm]	12 000
DCO [mg/l]	113
Cr total [mg/l]	1 418
Ni [mg/l]	54
Cu [mg/l]	67
Fe [mg/l]	9

Tableau 1 : Composition des eaux usées mélangées

les valeurs moyennes en novembre – décembre 2017.

En raison de l'industrialisation croissante et de la demande en eau qui en résulte avec en même temps une disponibilité en eau limitée, les autorités locales d'autorisation ont à la fois stipulé la technologie ZLD pour le traitement des eaux usées et limité l'allocation des quantités d'eau pour la production.

L'unité devait être intégrée dans un bâtiment existant, ce qui impliquait une limitation considérable de l'espace d'installation disponible, notamment en ce qui concerne les bassins tampons et d'égalisation.

Proposition de solution

Le traitement des eaux usées commence par des traitements en flux partiel pour les eaux usées au chrome (VI) et pour les eaux usées à forte propor-

tion d'agents complexants. Le premier est réduit par le bisulfite de sodium et l'acide sulfurique, tandis que les eaux usées contenant des agents complexants sont prétraitées dans un processus discontinu séparé. Ensuite, tous les flux partiels sont mélangés et la précipitation des métaux lourds a lieu. Les solides sont séparés à l'aide d'un séparateur à plaques parallèles, d'un filtre à gravier et d'un filtre-pressé à chambres. Ce traitement correspond à la procédure habituelle même sans la technologie ZLD. Afin de réutiliser les eaux usées, il est également nécessaire de séparer les sels introduits dans le processus de production au moyen d'une osmose inverse (OI) en deux étages, les étages atteignant un rendement en perméat de 80 % ou 70 %. Le flux entrant dans l'OI est prétraité par ultrafiltration afin d'éviter le blocage de la membrane d'OI avec des particules. La structure de l'étage de membrane est illustrée sur la Fig. 1.

Résultats

Grâce aux étapes de traitement décrites, environ 90 % des eaux usées peuvent être réutilisées, tandis que les sels et les résidus organiques restent dans le flux de concentré (Tab. 2). Ces concentrés sont évaporés et la saumure est éliminée avec le gâteau de filtration. Le condensat obtenu est à nouveau mis à disposition du cycle de l'eau de process.

Étage de traitement	Conductivité [µS/cm]
Perméat de premier étage d'osmose inverse	220
Concentré de premier étage d'osmose inverse	38 500
Perméat de deuxième étage d'osmose inverse	30
Concentré de deuxième étage d'osmose inverse	3 700

Tableau 2 : Qualités des eaux de process produites

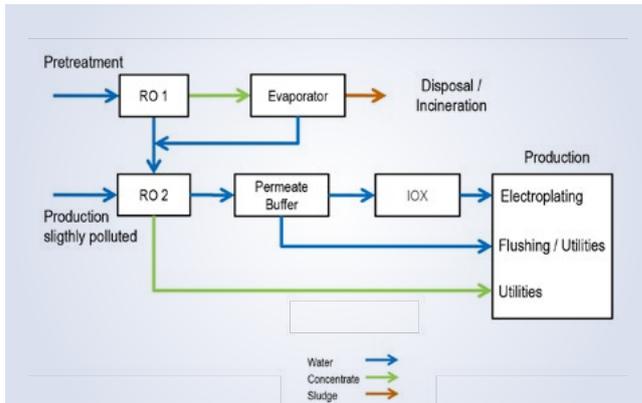


Figure 1 : Structure de l'étage de membrane avec la technologie ZLD en galvanoplastie plastique (gauche) Image de l'étage OI 1 (droite)

Afin d'optimiser les coûts de traitement, une distinction est faite entre trois niveaux de qualité différents lors du recyclage de l'eau traitée dans la production. Le concentré du deuxième étage d'OI a encore une qualité suffisante pour les processus de rinçage simples et d'autres applications d'eau de traitement. Le perméat de cet étage peut être soit utilisé directement dans le bain de galvanoplastie, soit, pour des exigences de qualité particulièrement élevées, de nouveau épuré à l'aide d'un échangeur à lit mixte.

La tâche la plus exigeante lors de la mise en service était la génération d'une qualité d'eaux usées uniforme à l'entrée des étages d'osmose inverse et le développement d'un régime d'épuration pour tous les étages sur membrane. Le premier étage de l'unité d'OI en particulier est exposé à des charges particulièrement élevées et nécessite une fréquence de nettoyage élevée en conséquence. Pour le nettoyage des membranes, le régime de nettoyage décrit dans le tableau 3 s'est avéré être le meilleur entre rendement et moyens déployés pour le nettoyage.

Apport de la technologie fournie

Remondis a fourni un système de traitement complet pour le traitement des eaux usées et le traitement des eaux de processus conformément au ZLD.

Le prétraitement robuste par ultrafiltration, la haute résistance à l'encrassement et le nettoyage efficace des étages d'osmose inverse, ainsi que l'interconnexion et la réutilisation appropriées des flux d'eau sont déterminants pour le fonctionnement efficace du système. □

Étage	Fréquence	Produits chimiques de nettoyage
UF	mensuellement	NaOCl et acide citrique
premier étage d'osmose inverse	tous les 7 à 10 jours	HCl et NaOH
Deuxième étage d'osmose inverse	mensuellement	HCl et NaOH

Tableau 3 : Schéma de nettoyage des étages sur membrane

Paramètre	Entrée
Quantité [m ³ /jour]	200
pH	4–6
Conductivité [μS/cm]	12 000
DCO [mg/l]	113
Cr total [mg/l]	1 418
Ni [mg/l]	54
Cu [mg/l]	67
Fe [mg/l]	9

Tableau 4 : Aperçu des valeurs d'entrée du traitement de l'eau – valeurs moyennes de la période de mise en service nov. – déc. 2017. Les valeurs en sortie ne sont pas pertinentes dans ce cas, car il s'agit d'un système ZLD.

ÉTUDE DE CAS : Traitement optimisé des eaux de process pour la production d'engrais en Égypte

Optimisation du traitement des eaux de process avec osmose inverse et échangeurs d'ions

Contexte

Alexandria Fertilizers Co. (Alexfert) est l'un des plus grands fabricants d'engrais en Égypte, qui a été fondé en 2003 en tant qu'entreprise publique. La production d'engrais nécessite de grandes quantités d'eau de process de haute qualité, qui est principalement obtenue à partir d'un canal du Nil. En raison des fluctuations saisonnières, le traitement est particulièrement difficile, car une qualité d'eau constamment élevée avec un rendement élevé est requise (Tab. 1).

Défi particulier/Exposé du problème

L'usine d'Alexandrie produit un débit d'eau de process d'environ 5 750 m³/jour et dispose d'une floculation pour réduire les substances organiques et d'un adoucissement calcaire à froid en tant que prétraitement. Afin d'obtenir la qualité souhaitée pour une utilisation comme eau d'alimentation de chaudière, entre autres, une combinaison de différents procédés d'échange d'ions (fortement acide (SAC), faiblement basique (WBA), fortement basique (SBA) et un lit mixte) a été utilisée pour la déminéralisation. Cependant, comme l'eau du canal a une

Figure 1 : Traitement des eaux de process avec osmose inverse et échangeurs d'ions



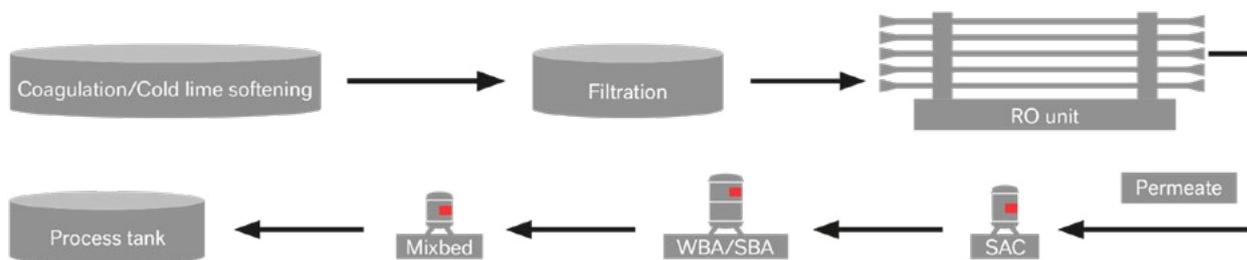


Figure 2 : Traitement de l'eau de la production d'engrais Alexfert avec système d'osmose inverse

teneur en sel de 300 à 550 mg/l selon la saison, une régénération régulière des échangeurs d'ions avec de l'acide et de l'alcali était nécessaire. La présence de silice raccourcissait également la durée de vie des échangeurs d'ions.

Proposition de solution

Si les échangeurs d'ions ne peuvent fonctionner dans des conditions difficiles qu'inefficacement avec des temps d'arrêt courts et une utilisation élevée de régénérant, un prétraitement peut être nécessaire. Le système décrit ci-dessus a été étendu en 2016 pour inclure une osmose inverse, qui réduit la charge en sel avant les échangeurs d'ions (Fig. 1, 2). Comme l'eau du canal n'est pas de bonne qualité malgré un prétraitement, les éléments d'osmose inverse Lewabrane B400 FR de LANXESS* ont été utilisés, et sont particulièrement adaptés à de telles qualités. Le système se compose de deux lignes, chacune avec deux stades de concentré. Le rendement en perméat de l'osmose inverse est de 74 %. Les résines monodispersées Lewatit sont utilisées pour la déminéralisation avec des échangeurs d'ions afin d'optimiser davantage l'utilisation des produits chimiques.

Résultats

La membrane en polyamide hautement réticulé peut éliminer plus de 99,7 % des sels. La conductivité après l'osmose inverse est de 3 à 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, avec une conductivité à l'entrée de 700 à 1 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Comme cela quadruple la durée de vie des échangeurs d'ions, 60 % des produits chimiques de régénération sont économisés. En sortie de l'échangeur d'ions de

Lewatit, une conductivité de l'eau de production de 0,08 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a pu être atteinte, avec une concentration finale de silice de 2 ppb.

Apport de la technologie fournie

LANXESS a fourni un système d'osmose inverse particulièrement robuste qui garantit une qualité de perméat élevée et constante, même avec une faible qualité à l'entrée. La conception spéciale de l'espaceur d'alimentation réduit considérablement l'encrassement de la membrane – et donc

aussi la perte de charge dans le module. L'intégration du processus augmente la durée de vie des échangeurs d'ions et réduit la quantité de produits chimiques de régénération. □

Performance	5 750 m ³ /jour
Rendement	Environ 74 %
Type d'eau	Eau du canal du Nil
Teneur en sels à l'entrée	300–550 mg/l
Teneur en sels en sortie	<0,01 mg/l
Installation	Février 2016

Tableau 1 : Résumé des paramètres du système dans le traitement de l'eau à Alexfert, Alexandrie

* L'activité membranes de Lanxess Deutschland GmbH a été reprise par SUEZ WTS Germany GmbH à Ratingen après la fin de la rédaction.

3

INDUSTRIE PHARMA-

CEUTIQUE



Informations spécifiques aux pays

Inde

L'industrie pharmaceutique en Inde revêt- en tant que sous-secteur de l'industrie chimique – une grande importance nationale et internationale. L'Inde est le plus grand fabricant mondial de médicaments génériques et produit plus de 80 % des médicaments utilisés contre le SIDA (syndrome d'immunodéficience acquise). De plus, l'Inde est le premier producteur de paracétamol et plus de 50 % des vaccins utilisés dans le monde proviennent d'Inde. La croissance du secteur était de 9,8 % en 2019, tandis que la croissance des sous-secteurs biotechnologiques est même estimée à environ 30 % par an ^[56]. Le marché très diversifié abrite à la fois des sociétés indiennes (par ex. Sun Pharma et Dr. Reddy's), ainsi que la plupart des groupes pharmaceutiques internationaux (par ex. Pfizer, GSK, Sanofi, Merck, Roche) ^[57].

La fabrication de médicaments en Inde repose en grande partie sur des principes actifs pharmaceutiques importés, dont la plupart proviennent de Chine. Un objectif important à moyen terme pour le renforcement de l'industrie nationale est donc la promotion de la production de principes actifs dans le pays. Sur recommandation du Comité Katoch, des parcs industriels sont ainsi implantés à l'échelle nationale, qui doivent offrir, avec les infrastructures appropriées et les services groupés (approvisionnement en énergie, traitement des eaux usées, entrepôts, laboratoires d'essais, etc.) des incitatifs spécifiquement aux fabricants de principes actifs pharmaceutiques et de médicaments. Fin 2019, il a été décidé de mettre en place un tel parc à Hyderabad avec un financement public approprié (« Hyderabad Pharma City ») ^[58].

En Inde, les aspects de la production liés à l'environnement et à l'eau sont réglementés par le « Central Pollution Control Board » qui, entre autres, stipule les conditions de rejet des eaux usées pharmaceutiques. En particulier, le rejet de résidus d'antibiotiques des installations de production, qui comme on le sait conduit à la propagation de germes résistants aux antibiotiques dans les eaux de surface indiennes, fait actuellement l'objet de discussions

critiques. Un projet de loi pour une réglementation et un contrôle plus stricts des concentrations d'antibiotiques dans les flux d'eaux usées industrielles est en cours de consultation depuis début 2020 et pourrait à l'avenir augmenter considérablement les exigences en matière de traitement des eaux usées pharmaceutiques en Inde ^[59].

MOAN

Les industries pharmaceutiques des pays de la région MOAN sont relativement peu tournées vers l'exportation et visent plutôt à couvrir les besoins nationaux. Il en résulte une forte dépendance vis-à-vis du système de santé national du pays concerné ^[60].

Le fabricant de médicaments le plus important de la région est l'Égypte, avec une croissance annuelle de l'industrie pharmaceutique d'environ 8 %. Aussi bien des entreprises privatisées (Novartis, GSK, Sanofi) que des entreprises publiques contribuent à la production pharmaceutique, qui couvre 90 % de la demande nationale de médicaments

(principalement à travers les génériques). Dans l'ensemble, l'industrie est considérée comme stable et durable, même si le contrôle étatique des prix des médicaments et la forte dépendance aux matières premières importées (environ 90 %) posent des défis pour la production dans le pays ^[61, 62].

L'industrie pharmaceutique au Maroc est la deuxième industrie chimique du pays (après les phosphates) et la deuxième d'Afrique (après l'Égypte). L'industrie croît à un taux annuel de 6,7 %, le principal fabricant est Sanofi, suivi des sociétés locales Cooper et Bottu SA ^[63]. En 2015, le pays a pu couvrir environ 65 % des besoins nationaux en médicaments avec sa propre production. ^[64] La Tunisie atteint un taux similaire, où 60 % des médicaments sont fabriqués au niveau national ^[65]. En Jordanie, la production de médicaments joue aussi un rôle important dans l'économie nationale. La plupart des produits pharmaceutiques fabriqués dans les zones industrielles autour d'Amman sont exportés en partie vers les pays voisins ^[66].

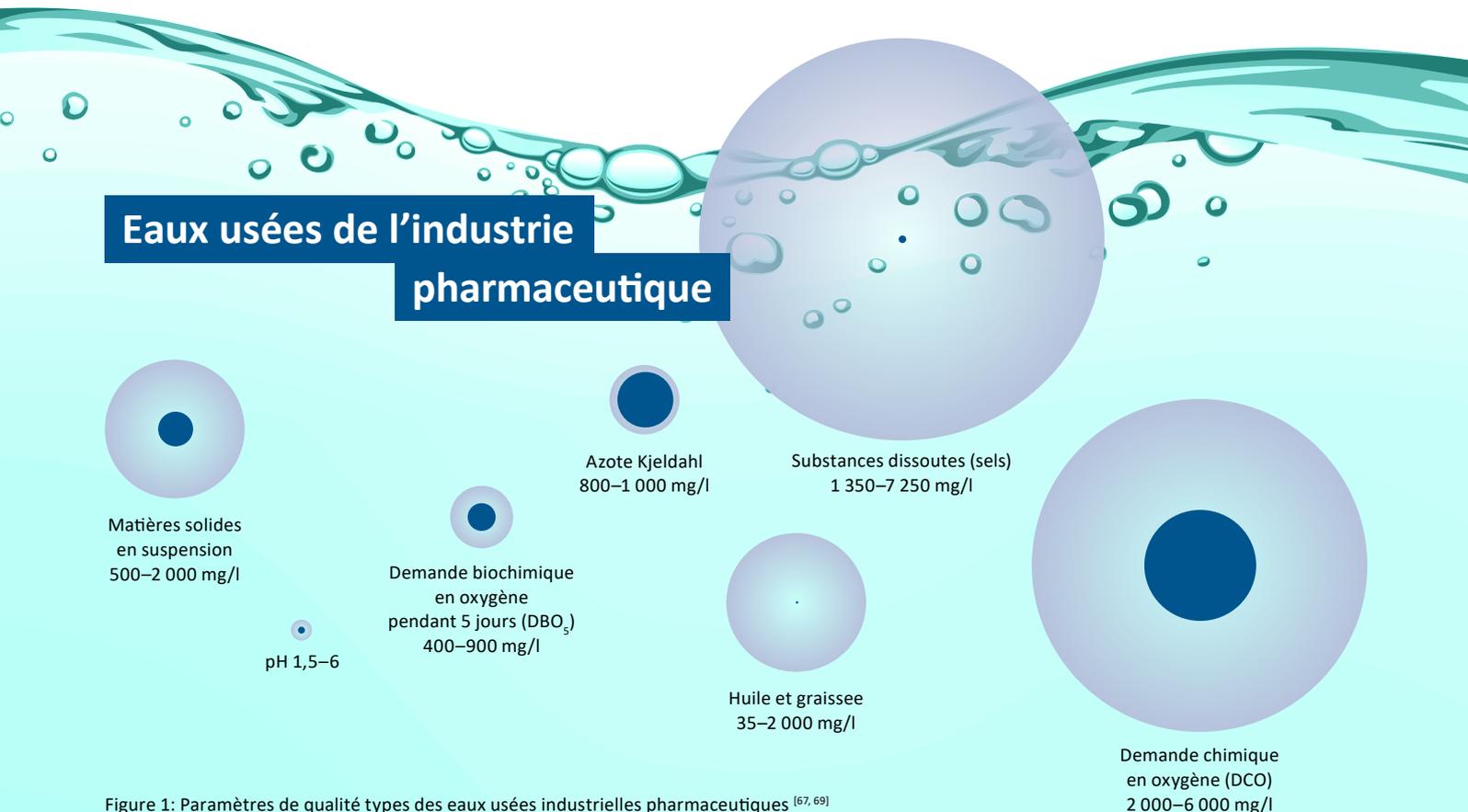


Figure 1: Paramètres de qualité types des eaux usées industrielles pharmaceutiques ^[67, 69]

Industrie pharmaceutique et volume d'eaux usées

L'industrie pharmaceutique comprend la fabrication, l'extraction, le traitement, la purification et le conditionnement de substances chimiques ou biologiques utilisées dans les produits pharmaceutiques et cosmétiques. L'industrie se caractérise par une grande variété de produits et de processus de production. Les étapes de processus les plus courantes dans l'industrie pharmaceutique sont les suivantes :

- Synthèse de produits chimiques organiques
- Procédés biotechnologiques
- Extraction de substances naturelles
- Formulation et conditionnement des produits

L'industrie pharmaceutique se distingue des autres industries principalement par les changements fréquents de lots et de produits. Les étapes de production individuelles sont souvent réalisées successivement dans un procédé de production semi-continu ou discontinu dans des réacteurs polyvalents. À chaque nettoyage intermédiaire, de grandes quantités d'eau de rinçage sont créées, qui constituent la majorité des eaux usées industrielles. Les eaux de rinçage peuvent contenir des concentrations importantes de substances pharmaceutiquement actives et doivent donc être soigneusement nettoyées. À cela s'ajoutent les solutions de régénération et les concentrés issus du traitement des eaux (brutes), qui sont généralement très complexes, ainsi que les eaux de purge des tours de refroidissement. La plupart des eaux usées de l'industrie pharmaceutique proviennent de procédés de synthèse chimique et de fermentation ^[22].

Synthèse

La synthèse fait référence à la production de principes actifs pharmaceutiques à partir de matières premières organiques et inorganiques dans une série de réactions chimiques. Cela entraîne généralement la formation de nombreux produits intermédiaires

et sous-produits. Les produits cibles sont finalement séparés à l'aide de procédés de séparation (par exemple, extraction liquide-liquide, cristallisation ou filtration). Les différentes réactions chimiques aboutissent à des eaux usées de synthèse très hétérogènes contenant des matières premières, des produits et sous-produits pharmaceutiquement actifs ainsi qu'une large gamme d'adjuvants. Outre les solvants, des acides, des bases, des nitrates, des Sulfates et des cyanures sont également utilisés comme adjuvants. Avec des pH de 1 à 11, la demande chimique et biologique en oxygène de ces eaux usées est généralement élevée ^[67].

Fermentation

Les processus biotechnologiques comprennent la croissance, la culture et la fermentation de micro-organismes tels que les champignons et les bactéries. Pendant la fermentation, sont ajoutés des nutriments, des sels inorganiques et d'autres substances, puis les produits cibles sont séparés du bouillon de fermentation (par exemple par précipitation et filtration). Les produits de fermentation importants comprennent les antibiotiques, les stéroïdes et les vitamines. Le flux d'eaux usées le plus important provenant des processus de fermentation est constitué par les bouillons de fermentation, qui contiennent non seulement des matières premières et des nutriments inutilisés, mais également des résidus de micro-organismes. Des adjuvants tels que des tampons, des chélates et des désinfectants ainsi que des solvants et des précipitants tels que des sels métalliques et des halogènes peuvent également être trouvés dans les eaux usées ^[67].

Débits et propriétés des eaux usées

Impuretés types

Les eaux usées pharmaceutiques se caractérisent par une forte demande biologique et chimique en oxygène, des composés organiques volatils et, dans certains cas, des substances hautement actives ou toxiques. Cela inclut de nombreuses matières

premières et catalyseurs utilisés dans la production, ainsi que, bien sûr, les principes actifs pharmaceutiques eux-mêmes ^[68] (Figure 1). La présence de principes actifs pharmaceutiques dans les eaux usées est problématique d'une part en raison de leur niveau élevé de toxicité environnementale, et d'autre part ces apports de substances jouent un rôle dans la propagation de la résistance microbienne aux antibiotiques. Les solvants usés (par exemple, le benzène, le phénol ou le toluène), qui sont utilisés dans les processus de production comme milieux de réaction et de purification et sont rejetés dans les eaux usées via des systèmes de récupération de solvants, peuvent représenter une autre contamination importante. En général, un défi dans l'industrie pharmaceutique réside dans la grande hétérogénéité de la quantité et des caractéristiques des eaux usées de production individuelles, ainsi que dans la persistance élevée et la faible biodégradabilité de nombreuses impuretés ^[22, 69].

Procédé de traitement

Épuration biologique

Dans l'industrie pharmaceutique, les eaux usées sont traditionnellement traitées par des procédés d'épuration biologique. Les eaux usées contiennent souvent une charge organique facilement biodégradable. Souvent, les eaux usées comportent aussi des substances difficiles à biodégrader ou peuvent même avoir un effet toxique sur le système biologique – cela devient un défi pour de nombreux processus d'épuration biologique. La biodégradabilité d'un composé chimique dépend principalement de sa stéréochimie, de sa toxicité et de sa concentration. Sur le plan opérationnel, l'adéquation de la culture de la souche respective, les conditions de dégradation et le temps de séjour dans le système biologique jouent un rôle important ^[66].

Les procédés aérobies pour le traitement des eaux usées sont les plus fréquemment utilisés dans l'industrie pharmaceutique car ils sont très robustes en fonctionnement. Les procédés à boues activées

avec sédimentation et âges élevés des boues sont souvent la méthode de choix, mais les bioréacteurs à membrane sont également de plus en plus utilisés pour obtenir une qualité élevée en sortie. Les procédés aérobies se sont avérés dégrader de nombreux principes actifs pharmaceutiques (par exemple l'ibuprofène, le naproxène, le bézafibrate et les œstrogènes), mais atteignent leurs limites, en particulier avec les sulfamides (par exemple, le sulfaméthoxazole, le clopamide, le sotalol). Les processus anaérobies sont moins courants car ils sont relativement sensibles à de nombreuses substances pharmaceutiquement actives et de nombreux désinfectants ^[67].

Au cours des dernières décennies, l'accent s'est également porté de plus en plus sur les principes actifs pharmaceutiques dans les eaux usées, qui se présentent à des concentrations relativement faibles, mais sont difficiles à éliminer et présentent un niveau élevé de toxicité environnementale. L'élimination de ces substances actives aussi près que possible de leur source (c'est-à-dire décentralisée dans le flux d'eaux usées respectif) sert notamment aux objectifs suivants :

- Élimination des substances ayant un effet toxique sur le système biologique
- Augmentation de la biodégradabilité de l'eau
- Élimination des contaminants non biodégradables

En fonction des conditions générales et de la matrice des eaux usées, il peut également être judicieux de purifier davantage le flux d'eaux usées après le traitement biologique. Dans les deux cas, l'élimination des principes actifs pharmaceutiques persistants est obtenue grâce à des procédés de nettoyage physico-chimiques plus poussés. Les méthodes les plus couramment utilisées sont ^[67, 69]:

- Coagulation et floculation
- Précipitation
- Adsorption
- Oxydation
- Filtration sur membrane

Même s'il n'y a pas de valeurs limites contraignantes pour l'introduction de certains principes actifs pharmaceutiques dans de nombreux endroits, une purification supplémentaire est déjà répandue dans de



nombreuses sociétés de production pharmaceutique. L'une des raisons en est que les sociétés opérant à l'échelle mondiale définissent souvent des normes de qualité opérationnelle élevées qui doivent être respectées quelles que soient les exigences locales.

Dans l'industrie pharmaceutique, la réutilisation des eaux usées traitées n'est possible, si tel est le cas, que pour des applications hors production. La raison ? Les exigences internationales de qualité très élevées pour les flux d'eau pure qui peuvent être utilisés à des fins de production et de nettoyage. Le rejet dans l'environnement est également problématique en raison de la contamination. D'autre part, il y a plus de potentiel dans la récupération et la réutilisation d'autres matières premières, telles que les solvants, les acides et les principes actifs individuels. La base de ces approches de récupération est souvent l'opération d'un traitement ultérieur efficace et décentralisé des eaux usées [22].

Oxydation

De nombreux composés chimiques difficilement biodégradables et pouvant difficilement être éliminés des eaux usées par adsorption peuvent être facilement éliminés par des processus d'oxydation. Par la réaction avec l'oxygène, des produits d'oxydation sont formés à partir des molécules initiales. Il est souvent observé que ces produits d'oxydation peuvent être mieux décomposés dans une étape biologique ultérieure que les substances d'origine. Cependant, il convient également de souligner que les produits de réaction résultants ne sont pas en principe inoffensifs et, dans certains cas, peuvent

même avoir une toxicité plus élevée que les produits de départ.

Le procédé d'oxydation le plus fréquemment utilisé dans le traitement des eaux usées industrielles est le traitement à l'ozone gazeux. Les molécules d'ozone réagissent sélectivement avec certains groupes fonctionnels dans la matrice des eaux usées, mais elles se décomposent également en radicaux hydroxyle, qui oxydent moins sélectivement les composants des eaux usées et ont un potentiel d'oxydation plus élevé. Les procédés d'ozonation sont répandus dans l'industrie pharmaceutique, par exemple pour l'élimination ciblée des antibiotiques à partir de flux d'eaux usées [70].

Au lieu de l'ozonation, des procédés d'oxydation avancés sont de plus en plus utilisés, et visent principalement à la formation de radicaux hydroxyle à réaction non sélective et sont destinés à réduire la formation de produits d'oxydation problématiques. La gamme de procédés éprouvés est large et va de la réaction à catalyse homogène à la réaction à catalyse hétérogène. Les catalyseurs utilisés sont principalement des métaux de transition ; une source d'énergie externe, telle que le rayonnement UV, peut également être utilisée. Les procédés d'oxydation supplémentaires courants pour le traitement des eaux usées sont, par exemple [71, 72]:

- Combinaison d'ozone et de peroxyde d'hydrogène
- Procédé (photo)Fenton avec du sel de fer comme catalyseur
- Électro-oxydation
- Photocatalyse TiO_2 (actuellement à l'échelle pilote) □

ÉTUDE DE CAS : Industrie pharmaceutique Inde

Filtration membranaire pour le recyclage des eaux usées biopharmaceutiques jusqu'à rejet liquide nul (ZLD)

Contexte

Une entreprise mondiale de biotechnologie recherchait un traitement des eaux usées fiable et efficace pour sa nouvelle usine de fabrication d'enzymes et de micro-organismes près de Mumbai, en Inde.

Défi particulier/Exposé du problème :

Les eaux usées issues des processus de production biotechnologique sont généralement caractérisées par une charge organique élevée et facilement dégradable et peuvent également contenir des substances auxiliaires (par exemple, des précipitants, des solvants ou des agents chimiques d'inactivation). Pour l'exploitant, un traitement biologique était donc dans un premier temps une option pour épurer ses eaux usées, suivi d'une filtration membranaire en deux étapes (ultrafiltration et osmose inverse). Dans les conditions spécifiques sur site, les problèmes opérationnels suivants étaient néanmoins à prévoir avec ce choix de procédure :

- Expulsion des boues de l'étape biologique et un prétraitement complexe correspondant pour l'ultrafiltration, en particulier en cas de matières en suspension
- De grandes quantités d'eau de lavage à contre-courant sont nécessaires pour les systèmes à membrane et la charge hydraulique supplémentaire sur le système associé au recyclage d'eau de rinçage
- Consommation élevée de produits chimiques et grand encombrement pour la combinaison de processus

Face à ces enjeux, l'exploitant s'intéressait à une solution sur mesure et économique pour le traitement des eaux usées. L'objectif le plus important était le traitement approfondi de tous les flux d'eaux usées afin de se conformer au concept de rejet liquide nul (ZLD), qui est souvent requis en Inde, et de réutiliser ou utiliser ultérieurement en totalité l'eau purifiée.

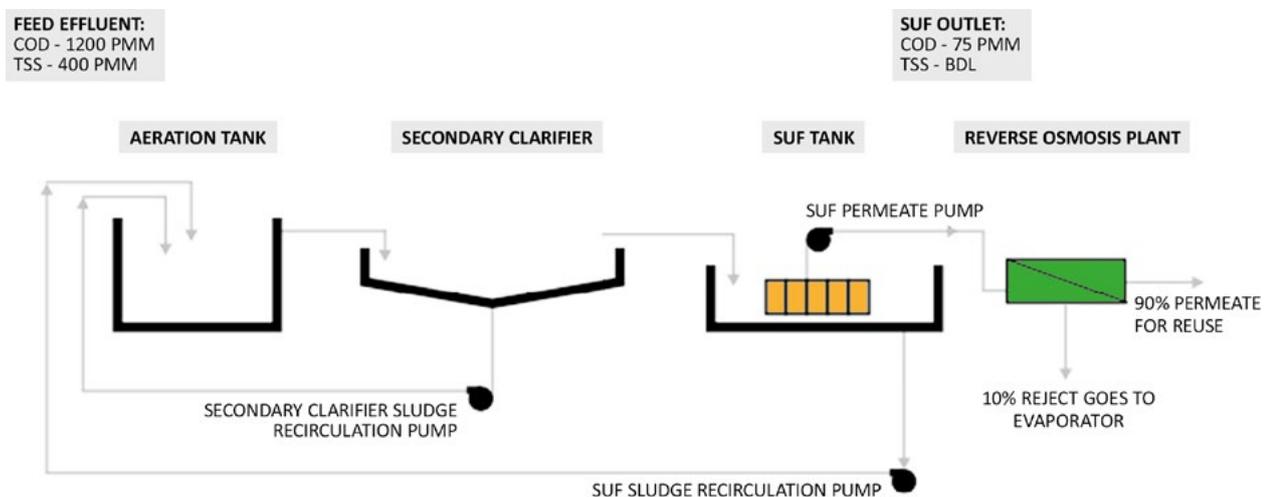


Figure 1 : Représentation schématique du déroulement du processus pour la procédure SUFRO®



Figure 2 : Station SUFRO® de 8,3 m³/h près de Mumbai, Inde – épuration biologique (gauche) osmose inverse (centre) décanteur secondaire et cuve d’ultrafiltration (droite)

Proposition de solution

A.T.E. HUBER Envirotech (AHET) a développé la solution technologique suivante en étroite collaboration avec le client : AHET a proposé son système de traitement biologique avec la technologie SUFRO®. Le système comprend une membrane de filtration Biomem de HUBER SE – un stratifié de membrane d’ultrafiltration immergé et fonctionnant sous dépression avec une taille de pores de 38 nm au lieu d’une ultrafiltration à surpression traditionnelle – suivie d’un système d’osmose inverse (Fig. 1).

Cette technologie promettait de grands avantages en termes de fonctionnement du système ainsi que de lavage à contre-courant et d’espace requis et a donc été acceptée et approuvée sur le plan conceptuel par la direction.

Résultats

Une station d’épuration biologique basée sur la technologie SUFRO®, d’une capacité équivalente à 8,3 m³/h a été planifiée, installée et mise en service par AHET.

En raison de sa conception et de son mode de fonctionnement, la filtration membranaire Biomem est nettement plus robuste que l’ultrafiltration sous pression traditionnelle, eu égard aux fortes teneurs en matières en suspension à l’entrée. Le prétraitement à l’aide de filtres à sable sous pression, de filtres à charbon actif ou de filtres à panier, requis sinon, n’est plus nécessaire. La biomasse dans le trop-plein

de la clarification ultérieure est efficacement retenue dans le réservoir à membrane et renvoyée vers le bassin d’aération, ce qui empêche un lessivage de la biomasse. La charge hydraulique du traitement biologique n’est pas augmentée par l’accumulation d’eau de lavage à contre-courant, celle-ci étant collectée dans le réservoir membranaire. Le lavage à contre-courant de la membrane utilise également moins de produits chimiques et d’eau par rapport aux méthodes traditionnelles. Le perméat d’ultrafiltration est introduit directement dans un système d’osmose inverse à 3 étages, sans prétraitement supplémentaire. Grâce à la combinaison de procédés, la teneur en DCO peut être réduite de jusqu’à 1 200 mg/l à moins de 75 mg/l, tandis que dans le même temps, les solides en suspension sont amenés à un niveau indétectable (Fig. 1). La haute qualité des eaux usées traitées permet de réutiliser jusqu’à 90 % comme eau de refroidissement dans l’usine de production.

Apport de la technologie fournie

Le système mis en œuvre se caractérise par son haut niveau de robustesse (par exemple vis-à-vis de fortes concentrations de solides) et sa facilité d’utilisation. L’élimination d’étapes de prétraitement supplémentaires fait du système une solution très compacte pour la réutilisation de l’eau jusqu’au rejet liquide nul (ZLD). Le nettoyage très efficace de la membrane réduit au minimum les quantités nécessaires d’eau et de produits chimiques. □

4

INDUSTRIE MINIÈRE



Informations spécifiques aux pays

Inde

L'Inde possède de vastes gisements minéraux et une industrie minière développée en conséquence, qui s'est principalement installée dans le nord-est du pays (États du Jharkhand, du Bengale occidental et de l'Orissa). Les ressources les plus importantes sont le charbon, le minerai de fer pour la production d'acier et la bauxite, dont on extrait l'aluminium (Figure 1). La croissance de l'industrie minière indienne était de 3,6 % en 2019 et est étroitement liée au développement des industries en aval. Le secteur à la croissance la plus rapide est l'extraction du minerai de fer, qui est utilisé dans les industries de la construction, des infrastructures et de l'automobile.

85 % de l'industrie minière indienne est entre les mains du gouvernement (par exemple, la National Mineral Development Corporation, Vedanta, Hinalco Industries), en particulier dans le secteur des mines de charbon. Les entreprises privées nationales et internationales sont également particulièrement actives dans l'exploitation des ressources métalliques ^[75]. Selon les secteurs, l'État autorise jusqu'à 100 % d'investissements étrangers sans autre contrôle et accorde des baux d'une durée de 20 à 30 ans. La « National Mineral Policy » adoptée en 2019 vise également à assurer la réglementation, la transparence et la durabilité de l'industrie minière indienne. L'exploitation minière n'est pas spécifiquement mentionnée dans les directives nationales de protection de l'environnement, mais l'élaboration et la mise en œuvre de plans progressifs pour la fermeture ordonnée des mines sont requises ^[73, 76].



MOAN

L'industrie minière dans la région MOAN est caractérisée par l'extraction de ressources non métalliques. La matière première la plus importante est certainement la roche phosphatée, pour laquelle il existe une forte demande de production d'engrais dans le monde entier. Le plus important producteur de phosphate de la région est le Maroc – le pays est le troisième producteur mondial et environ 75 % des réserves mondiales de phosphore sont situées sur le territoire marocain. L'extraction du phosphate est exploitée par la société d'État OCP (Office Chérifien des Phosphates) et, selon les estimations, contribue à environ 7 % du PIB du Maroc ^[77]. Le minerai de phosphate est également la ressource la plus importante de l'industrie minière en Tunisie (entreprise publique Chimique de Tunisie) et en Jordanie (Jordan Phosphate Mines partiellement privatisée), ainsi que d'autres matières premières non métalliques telles que les sels de potasse ou le gypse. Cependant, l'exploitation minière n'est pas l'un des secteurs les plus importants dans l'ensemble ^[78].

L'industrie minière égyptienne se concentre dans le désert oriental et la péninsule du Sinaï, où elle extrait principalement du charbon et des ressources métalliques. En plus de l'or, la tantalite est une matière première importante (quatrième plus grand producteur mondial) – ce métal est utilisé comme support d'informations dans l'industrie électronique. En assouplissant les conditions pour les investisseurs étrangers au début de 2020, le gouvernement vise à promouvoir le développement et l'utilisation des ressources. ^[79]

Industrie minière et volume d'eaux usées

L'industrie minière comprend le développement, l'extraction et le traitement des ressources du sol telles que les matières premières métalliques, les combustibles fossiles et les minéraux. Les matières premières peuvent être extraites dans des mines à ciel ouvert (par exemple le phosphate, l'or, le minerai de fer) ou en exploitation souterraine (par exemple le charbon). La roche extraite est généralement d'abord broyée mécaniquement et la substance cible est ensuite séparée soit mécaniquement (flottation ou séparation magnétique) soit chimiquement (par lixiviation et précipitation). La pertinence environnementale dans ce domaine est un thème global : en plus de l'encombrement important, la consommation d'eau élevée et le rejet éventuel dans l'air et l'eau de substances nocives pour l'environnement jouent un rôle important. L'eau douce est principalement utilisée dans l'exploitation minière aux fins suivantes :

- Pour le transport de matières premières sous forme de boues ou de suspensions
- Pour les étapes de fragmentation ou de séparation en phase aqueuse, telles que le broyage ou la flottation
- Extraction acide ou basique ciblée de métaux à partir de minerais et de sols



Figure 1: Principales ressources minérales de l'industrie minière indienne ^[73] ^[74]



Ces flux d'eau sont appelés eaux de process et, après un traitement approprié, peuvent être réutilisés dans une large mesure. L'eau de process en excès est produite sous forme d'eaux usées. La majorité des eaux usées contaminées dans l'exploitation minière ne proviennent pas des eaux de process, mais du ruissellement et de l'infiltration des eaux de pluie. Lors du passage dans les fosses et les décharges, les eaux de pluie s'enrichissent en impuretés minérales et peuvent en outre déclencher des réactions d'acidification. En tant qu'eau d'infiltration (acide), elles représentent le flux d'eaux usées le plus problématique et le plus important en termes de volume dans l'exploitation minière ^[80].

Débits et propriétés des eaux usées

Eaux de process

Dans l'exploitation minière, les eaux de process apparaissent dans des conditions relativement contrôlées et leur composition est directement influencée par la gestion du procédé respectif. L'eau utilisée pour transporter, fragmenter ou séparer mécaniquement

les matières premières est principalement contaminée par des solides et des impuretés minérales. Les flux d'eau après lessivage acide sont à considérer de manière plus critique : Pour l'extraction généralisée du phosphate à partir de l'apatite minérale très peu soluble, l'utilisation d'acides forts (acide sulfurique ou phosphorique) est nécessaire. Dans certains cas, des produits chimiques sont également ajoutés pour améliorer la solubilité ou la formation de complexes, par exemple des cyanures ou des Sulfatees, qui s'accumulent également dans l'eau ^[81, 82].

Eaux d'infiltration

Les minerais, qui sont normalement intégrés dans des couches rocheuses à l'abri de l'oxygène, sont broyés par l'exploitation minière et exposés à un environnement oxydant. Le contact avec l'air ambiant et l'eau de pluie déclenche des réactions chimiques, selon le degré auquel la matière première est soluble, hydrolysable ou adsorbable. L'eau d'infiltration résultante est souvent très acide et dissout ainsi, par exemple, les métaux et les Sulfatees à de fortes concentrations à partir de la roche. Les propriétés caractéristiques de l'eau d'infiltration sont des pH <6 (parfois aussi jusqu'à pH 9) et des concentrations élevées de Sulfatees de l'ordre de 1 à 10 g/l. ^[80]

Impuretés	Concentration dans les eaux usées	
	avant traitement	après traitement
pH [-]	5–10	6–9
Substances dissoutes [mg/l]	N/A	<1 000
Solides [mg/l]	10–500	5–35
Sulfatee [mg/l]	5 000–10 000	50–2 000
Composés azotés [mg /l]		
- Nitrite	0,1–1	0,01–1
- Nitrate	1–100	0,1–50
- Ammonium	1–50	0,1–10
Phosphore [mg/l]	0,1–10	0,01–2
Chlore [mg/l]	N/A	20–200
Demande chimique en oxygène (DCO) [mg/l]	N/A	15–100
Métaux [mg/l]		
- Arsenic	0,1–5	0,01–0,05
- Cadmium	0,005–0,5	0,002–0,02
- Chrome	0,005–0,05	0,002–0,02
- Cuivre	0,02–0,2	0,0002–0,1
- Fer	2–50	0,02–2,5
- Plomb	0,05–5	0,01–0,05
- Nickel	0,1–0,5	0,01–0,2
- Zinc	0,5–5	0,01–0,5
Cyanures [mg/l]	N/A	<0,1

Tableau 1: Contamination type dans les eaux de process provenant de l'exploitation minière ^[80]

Impuretés types

Les flux d'eaux usées provenant de l'exploitation minière sont souvent très acides et pollués par de fortes concentrations de métaux, de semi-métaux et parfois de sels (Tableau 9). La plupart des impuretés contenues dans les eaux usées proviennent directement des formations géologiques respectives, mais certaines sont également des substances auxiliaires issues du traitement des matières premières. Les charges les plus importantes sont les suivantes ^[80, 81, 83, 84]:

- Le pH : est influencé par la composition de la roche exploitée. De plus, les agents d'extraction acides ou basiques peuvent jouer un rôle dans la dissolution des métaux, comme par exemple dans l'extraction de l'or, de l'aluminium ou de l'uranium.
- Substances dissoutes et solides : La teneur en substances dissoutes dépend des propriétés de la matière première. L'extraction de la potasse produit des eaux usées avec une teneur en sel particulièrement élevée. Des concentrations élevées de matières particulaires en suspension apparaissent principalement dans les mines de charbon.
- Nutriments : L'azote est généralement introduit via des explosifs pour l'extraction de la roche et se présente généralement sous forme de nitrite, de nitrate ou d'ammonium. Dans l'extraction du phosphate, il y a souvent des concentrations résiduelles élevées de phosphore dans les eaux usées, mais dans d'autres secteurs également, le phosphore peut être transporté dans les eaux usées à partir de la végétalisation de terrils (par exemple par l'érosion des sols ou par les engrais). Le phosphore se trouve principalement sous forme de phosphate dans les eaux usées.
- Autres : Selon la composition de la matière première extraite, les eaux usées peuvent contenir des concentrations importantes de chlore et de Sulfatees. Ces impuretés sont particulièrement importantes dans l'industrie de la potasse. Les résidus de métaux de la roche peuvent également contaminer les eaux usées, par exemple l'arsenic dans l'or ou le cadmium dans l'extraction du phosphate. Certains métaux et cyanures sont également utilisés comme auxiliaires, notamment pour l'extraction de l'or dans les lessives basiques.

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Dans les régions sèches en particulier, la réutilisation de l'eau joue un rôle important dans la réduction des besoins en eau douce. L'eau de process est aujourd'hui collectée séparément dans la plupart des opérations minières, traitée et, en majeure partie, réutilisée dans l'étape de traitement respective. Cela peut également permettre la récupération efficace des matières premières de valeur des flux d'eau. Cependant, en raison de l'accumulation d'eau de process en excès et de grandes quantités supplémentaires d'eaux d'infiltration, l'exploitation minière est encore loin dans la pratique d'atteindre l'objectif de « rejet liquide nul ».

Le traitement des eaux usées est généralement effectué à l'aide de procédés physico-chimiques destinés à effectuer les tâches suivantes :

- Séparation des solides
- Élimination des sels, nutriments et métaux dissous
- Neutralisation étendue

Lors du choix du procédé, d'une part on utilise des procédés actifs, également répandus dans d'autres industries, qui permettent le traitement ciblé des flux d'eaux usées en utilisant de l'énergie et/ou des matières auxiliaires. Au lieu ou en plus de cela, il est également possible d'envisager des processus passifs qui s'auto-entretiennent sur des périodes plus longues (10-30 ans) sans coûts d'exploitation notables. Il s'agit essentiellement de procédés biologiques ou physiques qui peuvent être utilisés principalement à des débits d'eau faibles (<50 l/s) et pour de faibles charges (charge acide <10 kg/jour ou <800 mg/l). Les processus passifs fréquemment utilisés sont, par exemple, des bassins de clarification ou des zones humides aérobies ou anaérobies (créées artificiellement) ^[80, 83].

Traitement physico-chimique

Les procédés gravitaires sont généralement utilisés pour séparer les solides des eaux usées, souvent avec l'ajout de floculants. En fonction du débit volu-

mique et des propriétés des matières en suspension, des procédés de filtration sont également utilisés.

Les meilleures techniques disponibles sont ^[80] :

- Sédimentation dans des séparateurs gravitaires ou des bassins de clarification
- Flottation à gaz
- Centrifugation
- Filtration de surface ou volume

Les bassins de clarification sont des bassins créés artificiellement pouvant contenir jusqu'à plusieurs 100 000 m³ d'eaux usées. L'eau les traverse sur une faible pente, une étanchéification du fond empêchant l'eau de s'échapper. Deux processus se déroulent ici en parallèle, à savoir l'évaporation de l'eau propre (tant que les eaux usées ne contiennent pas de composants volatils) et la sédimentation des solides, tels que les produits de précipitation ^[80, 81].

Les substances dissoutes sont généralement éliminées des eaux usées à l'aide de procédés physico-chimiques. Les procédés suivants, entre autres, sont utilisés à cette fin :

- Précipitation
- Adsorption
- Échange d'ions
- Procédés sur membrane

Selon la composition des eaux usées, diverses conditions chimiques peuvent entraîner la précipitation de contaminants. Certains métaux réduisent leur solubilité dans des conditions oxydantes (soit aération artificielle soit par aération biologique active), d'autres par réduction dans des conditions anaérobies. De nombreux métaux peuvent également être précipités et séparés sous forme de composés hydroxyde ou carbonate au cours de la neutralisation ^[80, 83]. □



ÉTUDE DE CAS : Extraction d'or en Afrique du Sud

Des pompes drainent des mines inondées en Afrique du Sud

Contexte

L'extraction de métaux précieux est une industrie très importante en Inde, et l'exemple suivant en Afrique du Sud montre des parallèles potentiels avec la situation locale. La ville de Johannesburg a été fondée au cours de la ruée vers l'or du Witwatersrand en 1886. Depuis, 40 000 t – 30 % de l'or mondial – ont été extraites des mines locales. De nombreux puits et mines abandonnés sous la ville témoignent encore de cette ruée vers l'or. Cependant, ces vestiges représentent un risque croissant pour les personnes et l'environnement. Suite à la pénétration des eaux de pluie dans ces puits, un lac aux eaux acides et fortement polluées par endroits s'est formé sous la ville, et continue de s'étendre. Pendant l'exploitation minière, les eaux souterraines pénétrantes ont été pompées hors des mines à travers l'infrastructure existante. Cependant, avec la fermeture de nombreuses mines, ce processus a été interrompu. Le dénommé bassin occidental s'est rempli et a commencé à se vider en 2002. Arrêt des pompages dans le bassin central en 2008 et dans le bassin oriental début 2011.

Défi particulier/Exposé du problème

Le pompage de l'eau de mine pose de nombreux défis, notamment en raison de sa composition chimique. La roche métamorphique des tunnels de la mine contient le minéral pyrite, qui réagit avec les eaux de pluie ou souterraines, qui contiennent

de l'oxygène, ce qui conduit à des concentrations accrues de Sulfates et finalement à des pH bas. À des pH de deux, l'acide sulfurique dissout l'aluminium, les métaux potentiellement toxiques et l'uranium de la roche et produit de l'oxyde de fer comme sous-produit lorsque le pH augmente. En conséquence, le pH de l'eau peut atteindre des niveaux qui la rendent dangereuse pour l'homme et l'environnement. Le drainage minier est ainsi devenu une question et un défi écologiques.

Proposition de solution

Afin de protéger les eaux de surface et souterraines, toutes les options doivent être épuisées lors du démantèlement des mines, par exemple une étanchéification la plus complète possible ou un traitement passif à long terme de l'eau de la mine. Des technologies de pompes fiables peuvent ici apporter une contribution importante.

Le groupe technologique

international ANDRITZ propose une série de pompes spécialement conçues pour les conditions difficiles de l'exploitation minière – la série Heavy Duty Mining (HDM) (Fig. 1). Avec ce type de pompe, deux motopompes immergées sont disposées l'une au-dessus de l'autre dans des sens opposés et entraînées par un arbre de pompe continu. Les zones d'aspiration des deux pompes se situent aux extrémités du HDM. Chacune des deux pompes transporte la moitié du débit à pleine pression vers le centre de la pompe. Là, une étape de déviation dirige le flux à travers des canaux d'enceinte externes dans la conduite de pres-



Figure 1 :
Motopompe submersible ANDRITZ
de la série HDM (Heavy Duty Mining)



Figure 2 : Installation d'une des pompes ANDRITZ

sion. La conception à double flux neutralise complètement la poussée axiale et les charges du granulat sur l'unité sont réduites au minimum.

Afin de pouvoir utiliser ces pompes pour le pompage d'eau de mine acide, certains composants devaient être protégés contre l'acide agressif. À cet effet, les moteurs submersibles ont été encapsulés de manière que la pression interne excède la pression externe. Cela empêche l'eau de pénétrer et d'attaquer les composants à l'intérieur du moteur. Afin de garantir une longue durée de vie des matériaux en contact avec le milieu, plusieurs options de matériaux ont été sélectionnées et des tests de qualification ont été réalisés. Parmi les matériaux en question, ceux ayant les meilleures propriétés mécaniques ont été sélectionnés pour les pièces du groupe motopompe afin de permettre une conception compacte. La hauteur manométrique variable des pompes sélectionnées est comprise entre 300 et 500 m avec un débit allant jusqu'à 1 500 m³/h. La taille du moteur est de 2 400 kW.

Résultats

Toutes les unités de pompage sont identiques et ont le même système hydraulique. Au moins un groupe motopompe complet est stocké démonté sur le site ; cela signifie qu'une pompe de remplacement est immédiatement disponible. De plus, un certain nombre de pièces de rechange sélectionnées sont également stockées sur place. Les deux pompes –

pesant 21 t, chacune de 15 m de long et 1 m de diamètre – sont en service depuis juin 2014 (Fig. 2). Suspendues librement à des tubes de 430 m de long en acier duplex, elles acheminent les eaux de mine acides vers la surface puis vers une station d'épuration voisine. Là on élève le pH en ajoutant de la chaux, l'acide est neutralisé et les métaux lourds dissous dans l'eau sont précipités sous forme d'hydroxydes.

Les autorités construisent deux autres stations de pompage à l'ouest et à l'est de Johannesburg avec l'objectif à long terme d'abaisser le niveau d'eau dans les mines inondées, des 200 m environ actuels à une profondeur de 1 000 m. Avec cette étape, l'exploitant souhaite également regagner l'accès aux niveaux supérieurs afin de pouvoir y reprendre l'exploitation de l'or et du minerai d'or. ANDRITZ a fourni un total de sept pompes installées dans ces deux stations de pompage.

Apport de la technologie fournie

Les avantages de la technologie de pompe fournie sont sa longue durée de vie et l'absence de maintenance avec des débits très importants dans des conditions très agressives. Ceci est assuré d'une part par la sélection ciblée de matériaux chimiquement et mécaniquement très stables, d'autre part, l'encapsulation spéciale avec une pression interne accrue permet de protéger les composants critiques du système. □

5

INDUSTRIE ALIMENTAIRE

Informations spécifiques aux pays

Inde

L'industrie alimentaire indienne repose sur une agriculture nationale stable avec de vastes étendues de terres et des conditions climatiques favorables. La prospérité croissante, l'urbanisation croissante et l'évolution des habitudes alimentaires impliquent que la transformation des produits alimentaires joue également un rôle de plus en plus important dans le pays. Aujourd'hui, la valeur actuelle nette de l'industrie de transformation des produits alimentaires représente environ 30 % de l'industrie alimentaire indienne, soit environ 188 milliards de dollars ^[85, 86].

L'horticulture (fruits et légumes) est la branche la plus rentable de l'agriculture en Inde, le deuxième plus grand producteur de fruits et légumes au monde (Tableau 1). Cependant, seuls 2 % environ des produits sont transformés en Inde, ce qui est très peu en comparaison internationale (USA : 65 %, Philippines : 78 %, Chine : 23 %). Les taux de transformation du riz et du blé sont légèrement plus élevés. Le pays est autosuffisant en riz et en blé. Environ 10 millions de producteurs laitiers sont actifs en Inde, faisant du pays le plus grand producteur mondial de lait. Environ 35 % du volume sont utilisés dans la transformation des produits alimentaires pour la production de lait en poudre, de beurre, de fromage et d'autres produits laitiers. Cela fait de l'industrie laitière une branche importante de l'économie du pays, le secteur est dominé par les grandes entreprises locales. La production de poisson (deuxième producteur mondial)

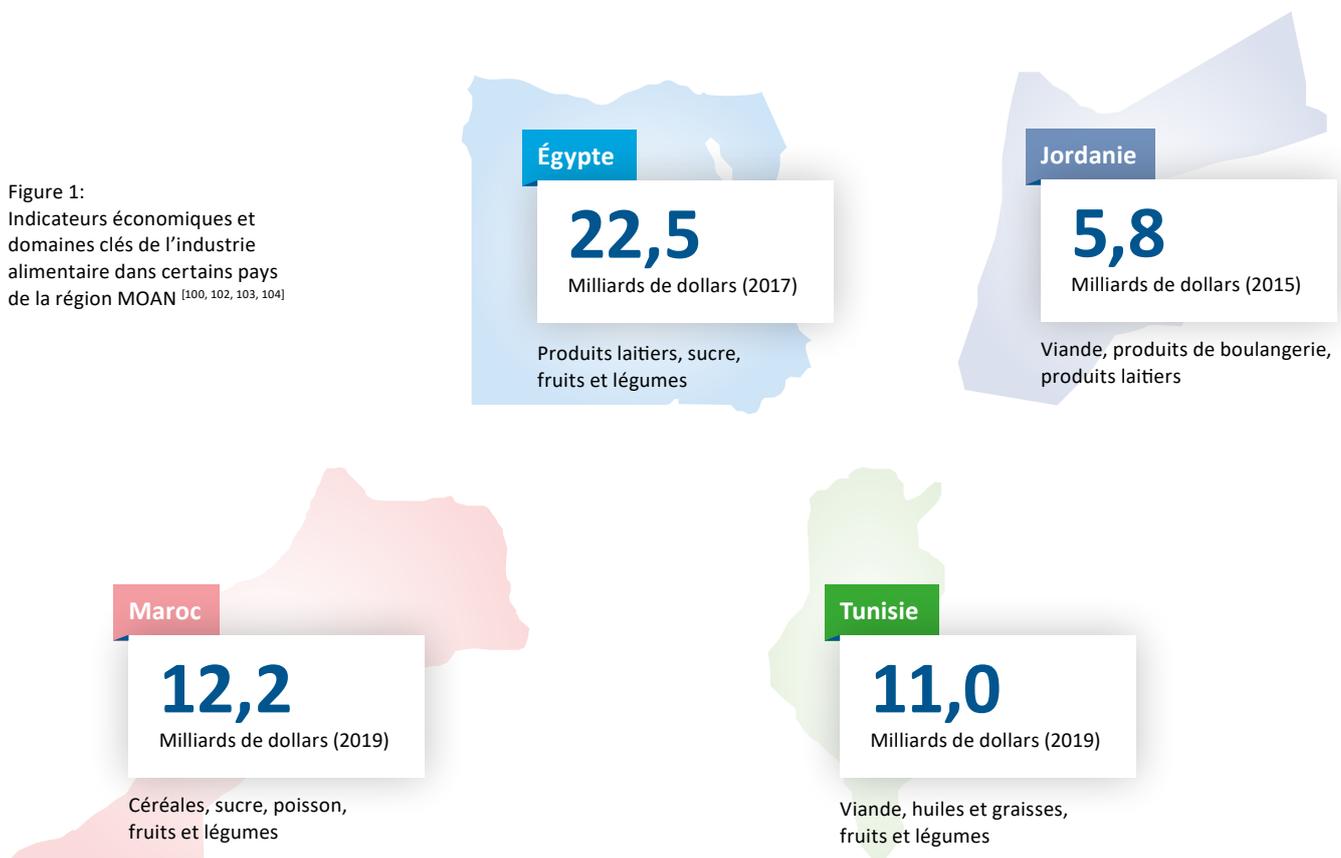


Produit	Production annuelle	Chiffre d'affaires annuel	Croissance annuelle	Principales régions
Fruits et légumes	282 millions de tonnes (2017–18)	42 milliards de dollars (2017–18)	4,2 % (2017–18)	Maharashtra, Andhra Pradesh, Uttar Pradesh, Bengale occidental, Bihar
Lait	176 millions de tonnes (2017–18)	72 milliards de dollars (2016)	15 % (2010–15)	Delhi, Pendjab, Gujarat, Surat, Lucknow, Bihar, Hyderabad
Riz	113 millions de tonnes (2017–18)	53 milliards de dollars (2020)	6,5 % (2020)	Pendjab, Haryana, Bengale occidental, Uttar Pradesh, Tamil Nadu, Orissa, Andhra Pradesh
Blé	107 millions de tonnes (2020)	61 milliards de dollars (export 2020)	3,5 % (2020)	Pendjab, Haryana, Uttar Pradesh, Madhya Pradesh
Poisson (intérieur)	9 millions de tonnes (2017–18)	3,5 milliards de dollars (2012–13)	6 % (2012–13)	Bengale occidental, Andhra Pradesh, Gujarat, Kerala
Viande	7,7 millions de tonnes (2017–18)	16,5 milliards de dollars (2020)	8 % (2020)	Uttar Pradesh, Bengale occidental, Andhra Pradesh, Haryana, Tamil Nadu

Tableau 1: Comparaison des secteurs les plus importants de l'industrie alimentaire indienne ^{[87, 89, 90, 91, 92, 93, 94] [95, 96, 97] [98]}

Domaines-clés de l'industrie alimentaire

Figure 1:
Indicateurs économiques et domaines clés de l'industrie alimentaire dans certains pays de la région MOAN ^[100, 102, 103, 104]



et de viande (sixième producteur mondial) joue également un rôle, même si les produits ne sont essentiellement vendus que conditionnés et congelés ou réfrigérés. ^[87]

L'industrie alimentaire indienne est actuellement confrontée à des pertes de produits élevées dans certains cas (en particulier en horticulture), à des conditions réglementaires peu claires et à des chaînes d'approvisionnement insuffisamment développées. À l'avenir, il sera de plus en plus important d'adhérer à des normes de qualité et d'hygiène strictes et de s'orienter technologiquement vers les meilleures pratiques internationales. Le ministère de l'Industrie agro-alimentaire encourage donc spécifiquement la modernisation et l'investissement (également 100 % d'investissements étrangers) dans l'industrie ^[86, 87].

Les développements technologiques (environnementaux) dans la transformation des produits alimentaires indiens sont principalement conduits par des sociétés internationales par l'adoption de références mondiales et d'objectifs de durabilité. Cela comprend l'épuration des eaux usées hautement polluées par des substances organiques, à l'aide de procédés biologiques et une récupération accrue de l'eau afin de compenser les fluctuations saisonnières de la disponibilité en eau brute ^[88].

MOAN

Les caractéristiques de l'industrie alimentaire sont souvent étroitement liées aux ressources agricoles du pays concerné. En raison du climat relativement chaud et sec, l'agriculture dans de nombreux pays de la région MOAN se concentre sur l'élevage

intensif pour la production de lait et de viande et sur la culture de types appropriés de fruits, légumes et céréales. Les secteurs les plus importants de l'industrie agroalimentaire sont donc les laiteries et la transformation de la viande, du poisson et des céréales (Figure 1). De manière générale, en raison de la diffusion des habitudes alimentaires « occidentales », on observe une demande croissante de produits de commodité tels que le lait en poudre, les nouilles instantanées et les produits surgelés, ce qui entraîne une augmentation de la transformation des produits alimentaires.

L'industrie laitière est traditionnellement ancrée dans de nombreux pays et connaît actuellement une forte croissance (par exemple, 32 % de croissance annuelle en Jordanie). Les produits les plus importants de la région MOAN sont le lait pasteurisé, les yaourts et divers types de fromages ^[99, 100]. En Tunisie et Jordanie la production de viande, dont en majeure partie de volailles, joue en outre un rôle important. Un acteur local important est le groupe d'entreprises très diversifié Poulina. La transformation se concentre sur la conservation et la production de divers produits de charcuterie ^[101, 100]. En horticulture, on cultive des tomates, des agrumes et des dattes, qui sont à peine transformés avant la vente ou l'exportation. En Tunisie, la production d'olives est également une branche importante de l'économie et constitue la base de la production industrielle et de l'affinage de l'huile d'olive (le producteur le plus important est la « Société de conditionnement des huiles d'olive » locale). Avec son littoral de 3 500 km, le Maroc est le plus grand producteur de poisson d'Afrique.

En raison du lien étroit avec les activités agricoles, la consommation d'eau de l'industrie agroalimentaire ne peut pas toujours être clairement définie – en Jordanie, elle est toutefois estimée à environ 10 % de la consommation totale d'eau industrielle ^[101], pour donner un exemple. Afin de protéger les ressources d'eau douce, des efforts pour le traitement des eaux usées industrielles et la réutilisation de l'eau sont encouragés dans de nombreux endroits. Les multinationales et les entreprises de transformation de la viande en particulier satisfont souvent déjà aux exigences de la norme ISO 14001 et d'autres normes volontaires. Cependant, la forte proportion de petites et moyennes entreprises

mal structurées dans le secteur alimentaire rend difficile dans de nombreux cas la mise en œuvre de mesures de protection de l'environnement à tous les niveaux ^[100, 101].

Industrie et volume d'eaux usées

Dans l'industrie alimentaire, les produits agricoles sont transformés pour la consommation humaine grâce à l'utilisation de matières premières, de main-d'œuvre et de technologie. Les secteurs de l'industrie sont classés selon les matières premières utilisées :

- Lait : Refroidissement et pasteurisation du lait, production de fromage, beurre, yaourt et autres produits laitiers, ainsi que de poudre de lait
- Fruits et légumes : Lavage et fragmentation, production et transformation de jus, concentrés et purées jusqu'aux produits finis (par exemple ketchup, confiture ou chips)
- Céréales : Mouture et transformation de la farine jusqu'au produit final (p. ex. pâtes, produits de boulangerie), ainsi qu'extraction d'amidon, de glucose et malt
- Viandes et poissons : Refroidissement et hachage, conservation (par exemple par surgélation ou fumage) ou préparation des produits finis (par exemple par pré-cuisson ou friture)

Le niveau de traitement peut fluctuer au sein de chaque secteur ; de la transformation légère (tri, lavage ou conditionnement) à la transformation intensive (produits de fermentation ou produits de boulangerie). La production de boissons et de plats cuisinés peut généralement être rattachée à un ou plusieurs des secteurs mentionnés, mais est parfois également répertoriée comme un secteur distinct.

Dans l'industrie alimentaire, l'eau douce est utilisée pour laver les matières premières, pour nettoyer les installations ou directement dans le processus de production. En raison du respect de règles d'hygiène strictes en production, les eaux de nettoyage représentent de loin la plus grande partie des eaux usées industrielles ^[105, 106].

Eaux usées de l'industrie de transformation des produits alimentaires

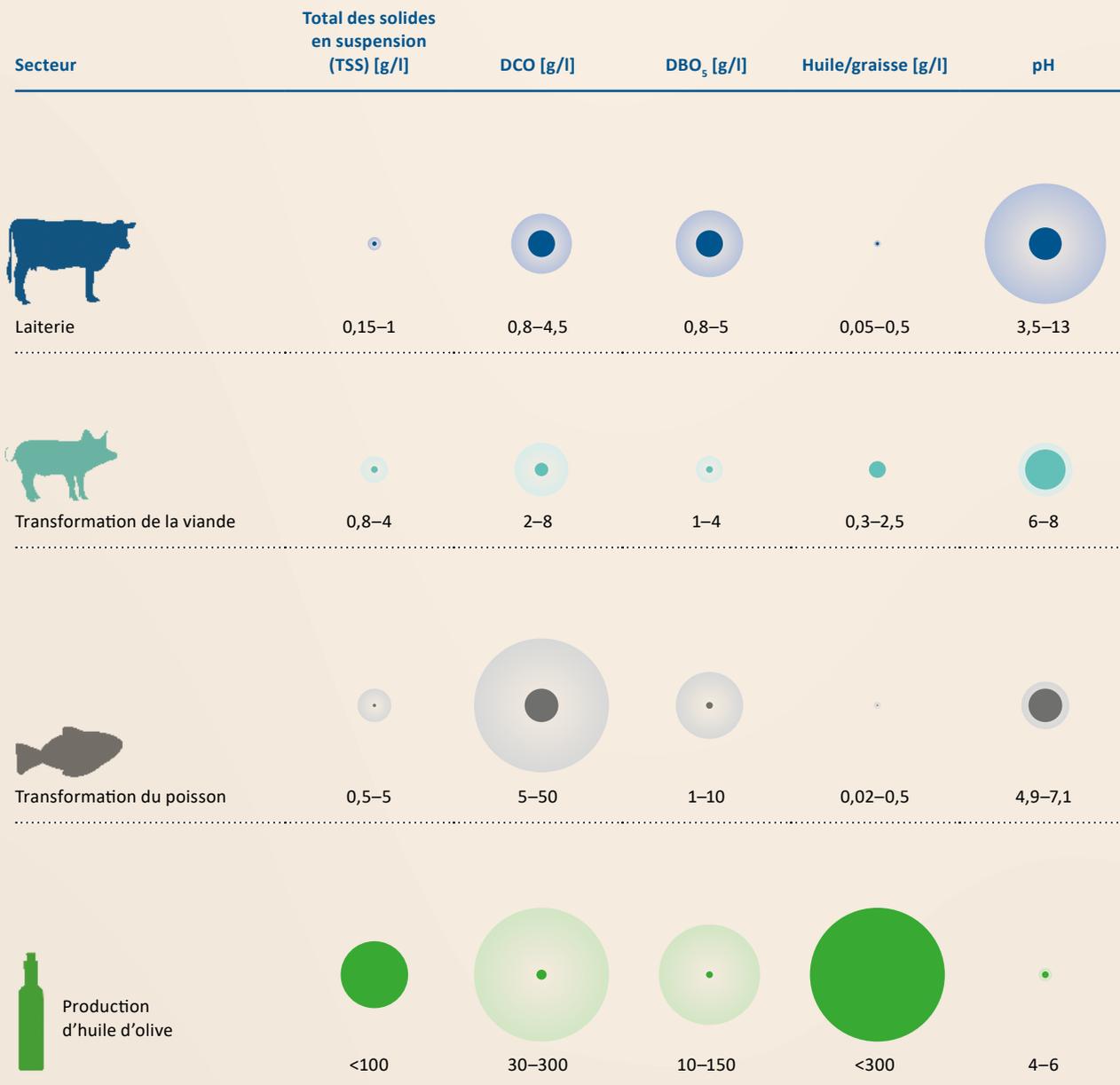


Figure 2: Caractéristiques types des eaux usées de certaines industries de transformation des produits alimentaires [22, 115, 108, 113, 110]

Débits et propriétés des eaux usées

Laiteries

Dans l'industrie de transformation du lait, des produits comestibles sont fabriqués à partir de lait cru. Les étapes de processus importantes dans la transformation du lait sont ^[107]:

- Élimination des particules de salissures et écrémage du lait, principalement par centrifugation ou filtration
- Homogénéisation sous haute pression
- Traitement thermique de stérilisation par pasteurisation, chauffage à haute ou ultra-haute température
- Production de fromage par caillage du lait avec de la présure, séparation de la phase solide et affinage
- Fabrication de produits à base de lait aigre par fermentation du lactose en acide lactique
- Conservation en éliminant l'eau, par exemple par évaporation ou filtration sur membrane

Dans les laiteries, une moyenne d'environ 1 m³ d'eaux usées est produite par tonne de lait transformé. Ces eaux usées proviennent, d'une part, directement de la production (par exemple les pertes au goutte-à-goutte, le lait de rinçage, les condensats) et, d'autre part, des processus de nettoyage (par exemple les solutions de nettoyage, la désinfection). Les eaux usées de production peuvent être en partie réutilisées ou éliminées sans traitement, selon le degré de pollution. Les eaux usées de nettoyage sont par contre produites en très grandes quantités (souvent de manière discontinue) et sont souvent très fortement polluées. ^[22]

La pollution la plus importante dans les eaux usées laitières est le lait lui-même, avec la composition organique correspondante (en particulier protéines, lactose, matières grasses) (Figure 2). Les caractéristiques sont des concentrations élevées d'azote et de phosphore, également en relation avec la DCO. À cela s'ajoutent des résidus de sous-produits (ex. : lactosérum), de cultures de fermentation, de produits de nettoyage et d'auxiliaires de production (ex. : sels de fromagerie) ^[108, 109].

Transformation de la viande et du poisson

La transformation de la viande comprend les étapes après l'abattage pour la fabrication de produits comestibles à partir de viande crue. De même, la transformation du poisson frais ou congelé jusqu'au produit final est ici considérée. Les étapes de traitement les plus importantes dans les deux cas comprennent :

- Nettoyage et découpage, comme l'enlèvement de la peau, des écailles, des os et d'autres parties du corps
- Ajout d'additifs tels que des épices, des conservateurs ou des enzymes
- Conservation, comme par fermentation, fumage ou séchage
- Préparation de produits alimentaires spéciaux, par exemple par émulsification, façonnage ou cuisson
- Remplissage et emballage, par exemple dans le cas des conserves

La transformation de la viande et du poisson produit de grandes quantités de déchets animaux qui doivent être collectés et éliminés – environ 30 à 70 % du poisson apparaissent sous forme de déchets dans la production de conserves de poisson. Dans de nombreux cas, ces déchets peuvent être recyclés sous forme de farine animale ou de poisson. Les eaux usées proviennent principalement du nettoyage fréquent des surfaces et des installations de processus, ce qui est nécessaire pour garantir les normes d'hygiène. Dans les étapes de transformation ultérieures, la pollution des eaux usées produites augmente, par exemple lors des processus de cuisson ou de l'ajout d'additifs.

Les résidus animaux – en particulier les protéines et les graisses – sont de loin la pollution la plus importante dans les eaux usées industrielles. Ils conduisent à des concentrations organiques élevées (DCO et DBO), des valeurs de phosphore comprises entre 30 et 100 mg/l et des valeurs d'azote majoritairement >100 mg/l (Figure 2). Le sang en particulier a une teneur en DCO très élevée et doit donc être collecté et éliminé séparément dans la mesure du possible. De nombreux résidus animaux, tels que les plumes, les écailles ou les tissus, sont sous forme de suspension et doivent être séparés sous forme de solides ^[22, 110, 111, 112].

Production d'huile d'olive

L'huile d'olive est traditionnellement produite par simple pressage et filtration, mais comme dans tous les secteurs industriels, on peut également observer ici une technologisation croissante. Aujourd'hui, l'extraction de l'huile à partir de la pâte d'olives est principalement réalisée par centrifugation en deux ou trois phases. Les décanteurs triphasés nécessitent jusqu'à 50 kg d'eau douce à ajouter pour traiter 100 kg de pâte d'olives. Dans la plupart des cas, l'huile obtenue est raffinée chimiquement ou physiquement afin d'éliminer les phospholipides interférents, les acides gras libres et les substances troubles. L'acide phosphorique, la soude et d'autres adjuvants peuvent être utilisés.

Dans la production d'huile d'olive, environ 1 m³ d'eaux usées est généralement produit par tonne de produit, en particulier lors de l'étape de raffinage, par exemple lors de la désacidification humide. Les eaux usées se caractérisent essentiellement par un niveau élevé de pollution organique, qui est composée de polyphénols, de sucres, de tanins, de lipides, etc. (Figure 2). Les phénols en particulier peuvent atteindre des concentrations supérieures à 10 g/l et sont connus pour leur forte toxicité environnementale [113, 114].

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Le défi du traitement des eaux usées dans les industries agroalimentaires est le niveau élevé de pollution par les substances organiques – solides, huiles et substances dissoutes. Les matières grossières et en suspension sont généralement éliminées lors d'une première étape de traitement afin d'éviter le colmatage lors des étapes de traitement ultérieures. La sédimentation par gravité par ailleurs fréquemment utilisée est rarement représentée dans l'industrie alimentaire, car les différences de densité entre phases solide et liquide sont relativement faibles. Au lieu de cela, les technologies suivantes sont préférées [22, 110]:

- Grilles de retenue et tamis fixes ou mobiles
- Centrifugation (parfois aussi centrifugation triphasée pour la séparation simultanée de l'huile)
- Flocculation et flottation

Les huiles et les graisses sont éliminées soit parallèlement aux solides, soit lors d'une étape de processus ultérieure. La matière organique dissoute et les nutriments peuvent alors généralement être très bien biodégradés. En raison de normes d'hygiène strictes, des exigences particulièrement élevées sont imposées à la réutilisation ou à l'utilisation ultérieure des eaux usées traitées dans l'industrie alimentaire. Dans des conditions favorables, les flux de processus peuvent être recyclés immédiatement ; en revanche, pour les eaux usées collectées et traitées, les domaines d'application liés à la production sont rares.

Séparation des huiles et des graisses

Les eaux usées industrielles provenant de la transformation des produits alimentaires contiennent souvent des graisses et des huiles insolubles d'origine animale ou végétale. L'approche la plus simple et la plus répandue pour la séparation d'une phase d'eaux usées huileuses est la séparation statique des graisses. Aux faibles vitesses d'écoulement, la différence de densité entre les phases aqueuse et grasse est utilisée pour écumer la couche de graisse flottant à la surface de l'eau. Une séparation plus rapide et plus complète est obtenue si la séparation de phases est provoquée par des forces centrifuges au lieu de la gravité ou par fixation à des bulles de gaz. Pour cela, il s'agit soit d'hydrocyclones statiques à flux rotatif, soit de centrifugeuses rotatives ou de systèmes de flottation à gaz.

Cependant, dans la transformation du lait, de la viande et du poisson, il apparaît principalement des graisses émulsionnées qui ne peuvent pas être éliminées par les séparateurs classiques par gravité ou centrifuges. L'approche la plus courante dans ces cas est une rupture de l'émulsion par l'utilisation d'acides, de sels métalliques ou d'hydroxyde de calcium. Par flocculation des graisses, leur séparation est facilitée, par exemple dans une étape ultérieure de flottation gazeuse. Les procédés de flottation ont fait leurs preuves pour la séparation des graisses et



des huiles, car les bulles de gaz dispersées se fixent de préférence sur les substances hydrophobes et facilitent ainsi la séparation des phases. La flottation par pression/détente est principalement utilisée dans l'industrie alimentaire. Pour des tâches de séparation plus complexes, l'élimination de l'huile par ultrafiltration peut également être une solution appropriée. Dans ce cas, les matières en suspension ou colorants tenaces peuvent également être séparés parallèlement au dégraissage ^[22, 110].

Épuration biologique

Le traitement biologique est très approprié pour le traitement des eaux usées dans l'industrie alimentaire. Il convient de noter que le système biologique doit être protégé contre une surcharge d'huiles et de graisses. Surtout dans les laiteries et dans la production d'huile d'olive, l'étape biologique doit généralement être soulagée par une séparation des graisses en amont.

Les procédés aérobies et anaérobies peuvent être utilisés pour le traitement biologique des eaux usées de l'industrie alimentaire. Les procédés anaérobies sont généralement très robustes et conviennent particulièrement aux eaux usées fortement polluées. Un autre avantage est la production relativement faible de boues en excès. La réalisation

a généralement lieu dans des bassins d'épuration ou dans des réacteurs à biogaz avec ou sans recyclage bactérien. Dans la plupart des cas, le système anaérobie est suivi d'une étape aérobie afin de respecter les valeurs limites ; aujourd'hui généralement sous la forme de procédés à boues activées ou lit bactérien.

Lors de la mise en œuvre des étapes de traitement biologique – en fonction de la composition des eaux usées – des difficultés peuvent parfois survenir. Quelques exemples types sont mentionnés ici ^[22, 113]:

- Formation de boues boursoufflées en raison de fortes teneurs du flux entrant en DCO très facilement dégradables
- Mauvaises propriétés de décantation des boues activées en raison d'un rapport sodium/calcium (Na/Ca) trop élevé dans les eaux usées, provenant par exemple du traitement du lait. Dans ce cas, la séparation des boues par flottation peut être supérieure à la sédimentation classique.
- Perturbation de la biodégradation due à la présence de substances inhibitrices, comme les phénols issus de la production d'huile d'olive
- Élimination inadéquate d'impuretés organiques peu dégradables, par exemple acides gras à longue chaîne ou certains composés phénoliques provenant de la production d'huile d'olive □

ÉTUDE DE CAS : Industrie de transformation des olives en Jordanie, en Syrie et au Liban

Traitement des eaux usées d'usines de transformation des olives

Contexte

La transformation des olives est un facteur économique majeur dans les pays de la région MOAN. Pour le compte du PNUD (Programme des Nations Unies pour le Développement) enviplan® a développé, construit et fabriqué un

prototype de système mobile permettant de traiter ces eaux usées.

En Syrie, au Liban et en Jordanie, il existe environ 2 500 petites entreprises qui transforment principalement des olives fraîches.

Environ 1 m³ d'eau douce est nécessaire pour le traitement de 1 t d'olives et est extrêmement contaminé.

Ces entreprises ne sont pas économiquement en mesure de mettre en place leur propre

système de traitement des eaux usées. Le PNUD souhaite proposer des systèmes mobiles lors de la campagne annuelle de traitement, qui vont vers les installations réparties dans les pays et traitent leurs eaux usées de manière décentralisée. Le système se trouve en Syrie depuis sa mise en service en 2009.

Défi particulier/Exposé du problème

De nombreuses entreprises décentralisées génèrent des eaux usées très critiques lors du traitement des olives, ce qui, dans de nombreux cas, a déjà conduit à la contamination d'eau potable. Des charges de DCO élevées, des concentrations élevées de polyphénols et un fonctionnement discontinu rendent impossible

l'épuration biologique. Les conditions-économiques et techniques rendent difficile pour les producteurs l'installation sur site de leur propre station d'épuration. Les eaux usées doivent donc être épurées avec des systèmes décentralisés et mobiles aux points de collecte pendant la campagne.



Figure 1 : Système mobile AQUATECTOR® Microfloat® pour le traitement saisonnier des eaux usées de la transformation d'olives en tant que projets pilotes au Liban, en Syrie et en Jordanie

Proposition de solution

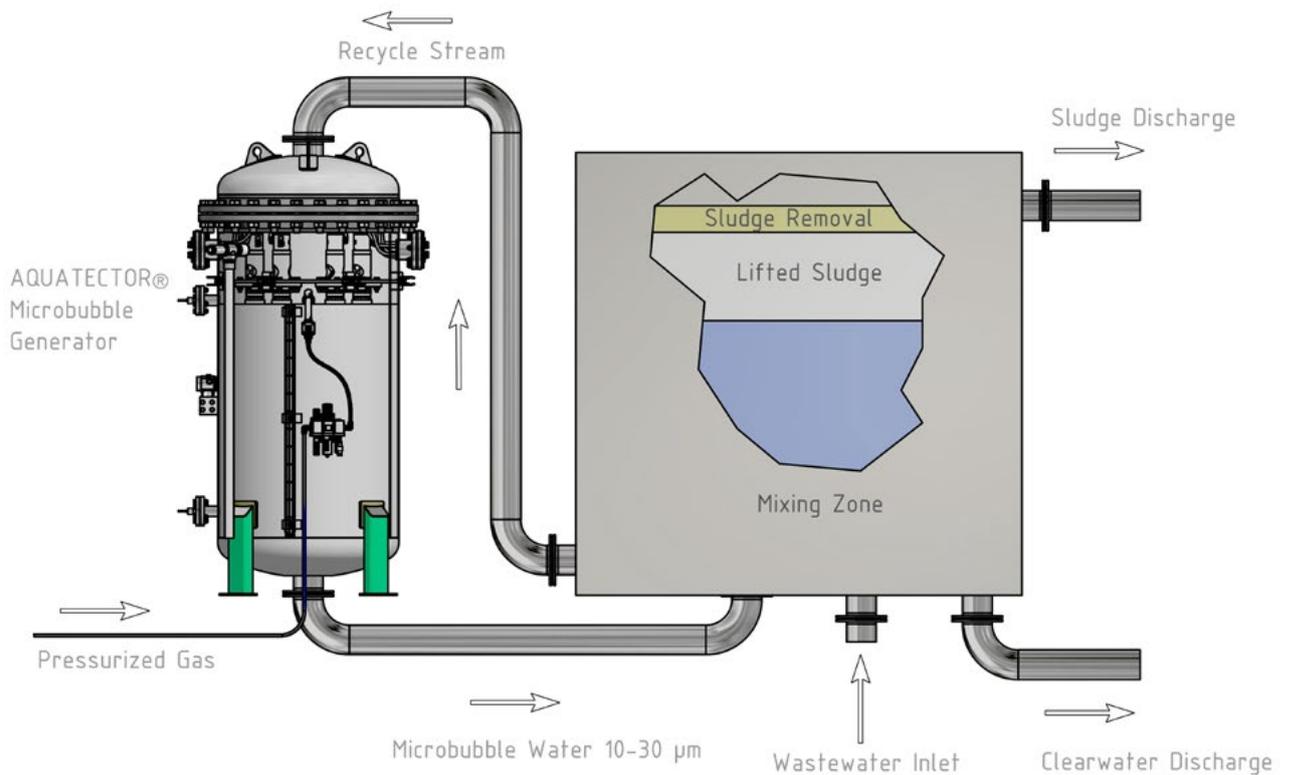
La microflottation AQUATECTOR® Microfloat® est le seul procédé au monde qui permet un prétraitement physico-chimique pour une épuration ultérieure par osmose inverse. Ce procédé combiné a le potentiel de traiter les eaux usées jusqu'au niveau de l'eau potable.

Le procédé développé

et breveté par enviplan® a été présenté comme un projet de démonstration technique en 2009 sous la forme d'un système mobile conteneurisé (Figures 1–3). Le système a un débit de 2 à 5 m³/h et peut être transporté en tant que variante de remorque sans grand déploiement de moyens. Des solutions de conteneurs peuvent également être mises en œuvre.

La combinaison de processus consiste en les composants suivants :

- Séparateur d'huile
- Microflottation AQUATECTOR® Microfloat® à deux étages comme étape d'épuration physico-chimique
- Système d'osmose inverse à canal ouvert



Résultats

Le système mobile atteint les qualités d'effluent indiquées dans le Tab. 1. C'est une technologie robuste avec laquelle une quantité de traitement de 2 à 5 m³/h peut être épurée en différents points de collecte lors de la campagne. Trois systèmes centraux ont été construits en Espagne, par exemple, avec des capacités de 35 m³/h. Les systèmes sont utilisés exclusivement avec la technologie AQUATECTOR® Microfloat® comme étapes de prétraitement des eaux usées, car un fonctionnement toute l'année était souhaité. La microflottation est surveillée par un système de caméra HD, qui permet une évaluation visuelle du plafond de flottation. La qualité en sortie du système est également contrôlée via la mesure de la turbidité, la mesure de la conductivité, la température et le contrôle du pH.

Apport de la technologie fournie

Le système AQUATECTOR® permet un traitement efficace des eaux usées eu égard aux huiles, solides et autres matières organiques. L'accent est mis sur le faible encombrement et la grande robustesse du processus. Intégré dans un processus combiné avec séparation d'huile et osmose inverse, les eaux usées peuvent être traitées de manière très compacte jusqu'à la qualité d'eau potable. □

Paramètre	Unité	Entrée dans le système	Sortie du système (réduction)
Huiles libres	g/l	Max. 20	95–99 %
DCO	mg/l	100 000	90–95 %
DBO	mg/l	50 000	90–95 %
Matières solides	mg/l	2 000–3 000	>99 %
Polyphénols	mg/l	500–5 000	>95–98 %

Tableau 1 : Valeurs entrantes et sortantes du système mis en œuvre (valeurs choisies comme exemples)

ÉTUDE DE CAS : Industrie de transformation du poisson au Maroc

Traitement biologique des eaux usées pour assurer la conformité aux exigences légales

Contexte

Pour une usine de production de conserves de poisson dans le sud du Maroc, qui traite principalement des sardines, du maquereau et du thon, une station d'épuration devait être installée, conforme de manière fiable à toutes les exigences légales en matière de rejet dans le système d'égout local. Les spécifications marocaines concernent essentiellement les paramètres température, pH, DCO, DBO₅, teneur en matières grasses et en solides.

Défi particulier/Exposé du problème

Lors du traitement du poisson, de grandes quantités d'écaillés, de restes de poisson, de graisses, d'huiles et d'autres déchets organiques se forment et entrent dans les eaux usées de production. Cette charge d'eaux usées peut entraîner des blocages dans le réseau d'égout communal et des odeurs désagréables.

Une station d'épuration devait être planifiée et construite, afin de réduire en toute sécurité la charge organique très élevée des eaux usées aux valeurs limites requises avec un espace d'installation très

limité. Les fluctuations quotidiennes des quantités et des charges d'eaux usées sont caractéristiques de la production. De plus, la solution du système doit éviter la formation d'odeurs et le traitement des boues doit atteindre une matière sèche (MS) de 30 %.

Proposition de solution

EnviroChemie a planifié, installé et mis en service une solution système à plusieurs étages pour cette tâche. Avant qu'environ une quantité quotidienne des eaux usées de production ne soit tamponnée dans un réservoir, ces eaux sont prétraitées à l'aide d'un filtre à bande haute performance et d'un séparateur de graisse. Les solides, en particulier les écaillés de poisson, et 50 % de la teneur en graisse et en huile sont éliminés des eaux usées. Ensuite, un système de flottation à détente de pression Flomar® élimine les constituants inorganiques et organiques des eaux usées, ce qui permet de réduire efficacement et économiquement la pollution des eaux usées. L'étape de flottation en fonctionnement continu est précédée d'un conditionnement physico-chimique. Cela élimine jusqu'à 98 % de solides et de graisses et jusqu'à 60 % de DCO. Les boues de flottation sont déshydratées et déversées avec les boues en excès avec une teneur en matière sèche de 30 % et les eaux usées produites de la déshydratation sont déversées dans un cours d'eau récepteur.

Les eaux usées sont ensuite envoyées dans un réacteur aérobie de type Biomar® OBRR (Oxidative moving Bed Biofilm Reactor), dans lequel la charge en DCO et en DBO est encore réduite. La technologie Biomar® OBRR utilise des corps en plastique spécialement développés qui offrent une surface de croissance idéale pour les micro-organismes dans un environnement protégé. Ces corps en plastique se déplacent librement dans l'eau et sont maintenus en mouvement de suspension dans le réacteur par



Figure 1 : Installé pour gagner de la place – Flomar® Flotation pour le prétraitement des eaux usées et extrudeuse pour la déshydratation des boues dans une usine de poisson au Maroc

l'aération. La structure unique des corps de croissance et la libre circulation de l'eau assurent la protection de la biomasse et permettent un contact optimal du biofilm avec les constituants des eaux usées et l'oxygène. L'aération du système biologique est assurée par l'utilisation de compresseurs.

Après un temps de rétention d'environ un jour, les eaux usées sont envoyées dans un système de sédimentation. Une partie des bio-boues est réutilisée dans le traitement biologique, le reste est stocké dans une cuve à boues avec les boues de flottation. Enfin, les boues sont déshydratées et déversées par une extrudeuse.

Le réservoir tampon, le réservoir à boues et la flottation sont couverts. Les gaz résultants sont aspirés et introduits dans le traitement biologique, afin de décomposer les molécules odorantes. Le système fonctionne de manière entièrement automatique et tous les moteurs sont équipés de convertisseurs de fréquence pour optimiser la consommation d'énergie.

Paramètre	Unité	Entrée dans le système	Sortie du système
Quantité d'eaux usées	m ³ /jour	800	800
.....
Graisses et huiles	mg/l	3 000–6 000	<50
.....
DCO	mg/l	13 000–25 000	<2 500
.....
DBO	mg/l	6 500–12 500	<1 000

Tableau 1 : Valeurs entrantes et sortantes du système mis en œuvre

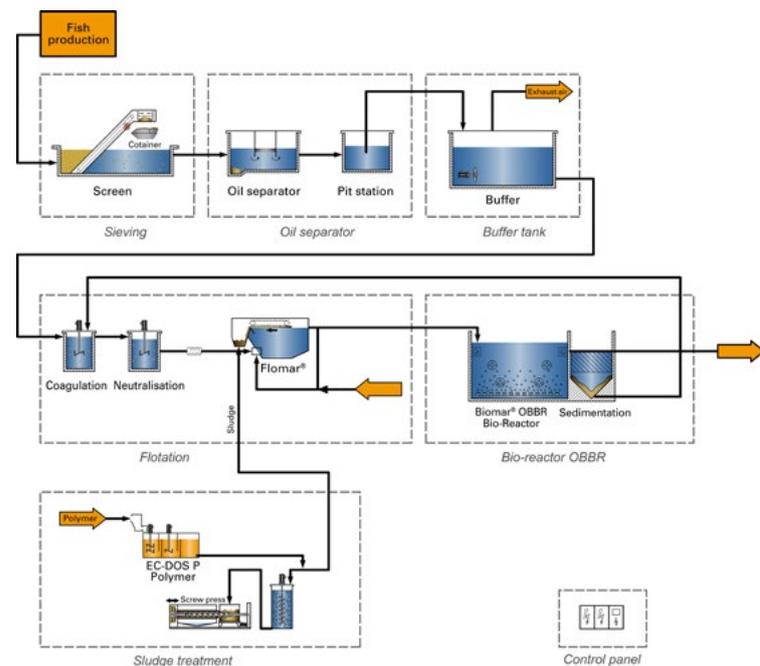


Figure 2 : Schéma de processus du système de traitement des eaux usées dans une usine de poisson au Maroc

Résultats

La nouvelle solution de système éco-énergétique pour le traitement des eaux usées atteint en toute sécurité tous les objectifs d'épuration requis (voir Tableau 1). Les odeurs sont efficacement évitées. Le traitement des boues atteint une matière sèche de 30 %. L'ensemble de la technologie du système a été automatisé et visualisé pour une manipulation facile par l'opérateur sur site.

Un avantage supplémentaire provient de l'élimination d'environ 95 % des écailles et des déchets de poisson des eaux usées. Ces déchets sont transformés en farine de poisson, qui peut être commercialisée. Les graisses et huiles séparées sont également transformées en farine de poisson.

Apport de la technologie fournie

Le système installé ici comprend un traitement complet et sur mesure des eaux usées comprenant des étapes de traitement mécanique et biologique. Le système très compact tolère les fluctuations du volume et de la charge de l'entrée des eaux usées et minimise la formation d'odeurs. Les huiles, graisses, écailles et restes de poisson séparés sont utilisés comme farine de poisson. □

ÉTUDE DE CAS : Transformation du lait en Inde

Traitement des eaux de process des eaux usées laitières

Contexte

Chitale Dairy, une entreprise leader dans l'industrie de transformation du lait en Inde, avait pour objectif d'équiper son site de production agrandi à Bhilwadi, Maharashtra, d'un nouveau système de traitement des eaux de process.

Défi particulier/Exposé du problème

Le défi dans le traitement des eaux résiduaires laitières réside généralement dans leurs teneurs élevées en matières grasses, DCO et DBO, qui doivent être éliminées. Dans ce cas, des étapes de processus appropriées doivent être identifiées pour traiter des volumes d'eaux usées hautement contaminées à des coûts d'investissement et d'exploitation raisonnables.

Proposition de solution

Lors de l'agrandissement de son site d'usine, l'entreprise a passé une commande pour la construction d'une installation de traitement des eaux de process à un débit de 1 800 m³/jour. A.T.E. HUBER Envirotech (AHET) a ensuite donné un aperçu complet des technologies disponibles sur le marché ainsi que de leurs avantages et inconvénients. Avec un fonctionnement stable de l'installation et une surveillance métrologique appropriée, les processus biologiques peuvent représenter une option efficace pour l'épuration des eaux résiduaires laitières. Après une discussion approfondie avec les exploitants, le choix s'est porté sur la technologie AVR-AF[®] d'AHET, adaptée à la dégradation efficace des graisses, protéines et huiles alimentaires.

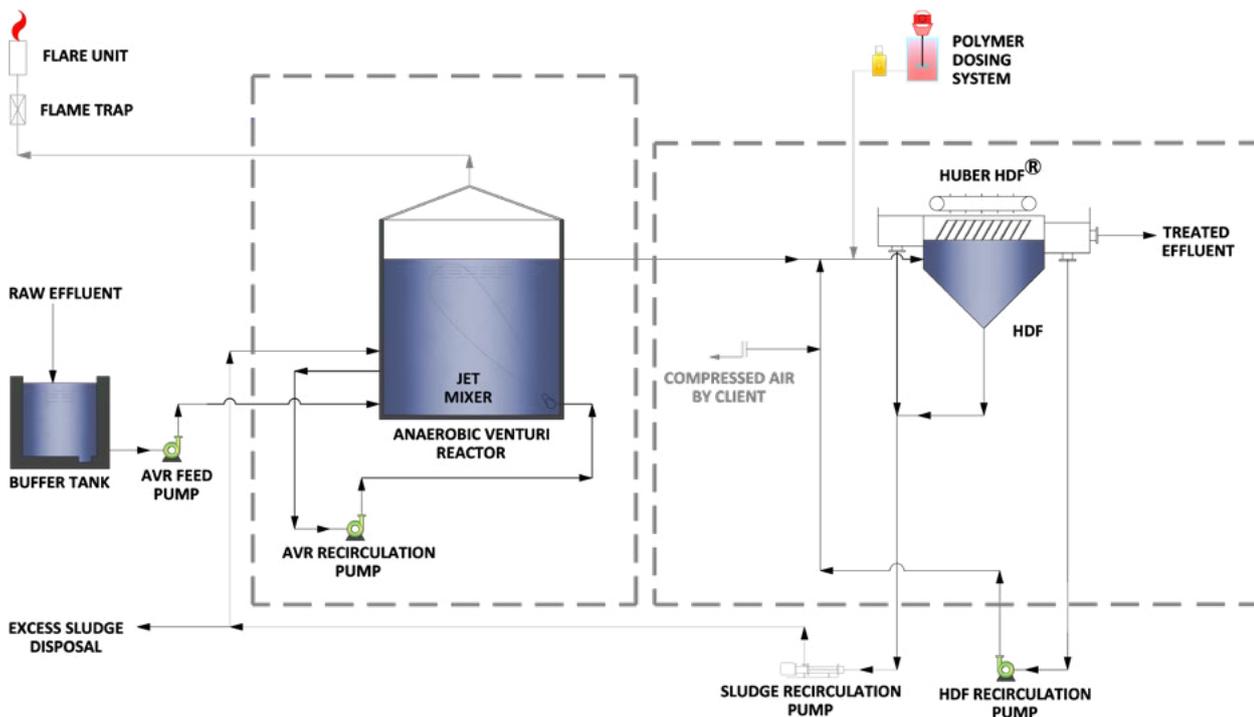


Figure 1 : Schéma de la structure du système basé sur la technologie AVR-AF[®] d'A.T.E. HUBER Envirotech de la laiterie Chitale à Bhilwadi, Maharashtra, Inde



Figure 2 : Installation pour l'usine laitière de Chitale à Bhilwadi, Maharashtra, Inde

La technologie AVR-AF® est un réacteur Venturi anaérobie suivi d'une flottation par décompression (HUBER HDF®) et d'un post-traitement aérobie (Fig. 1). C'est un réacteur avec une conception de boucle de zone de jet. Dans le réacteur, on utilise au lieu de mélangeurs mécaniques des mélangeurs à jet, économes en énergie, qui n'ont aucune pièce mobile et assurent un mélange uniforme. La méthode convient à des concentrations élevées de substances en suspension allant jusqu'à 15 000 mg/l.

Par rapport à d'autres technologies, la technologie AVR-AF® se caractérise par une production de boues moindre et des besoins de maintenance réduits. Les réacteurs à cuve agitée anaérobies existants peuvent être convertis à l'AVR-AF®. La flottation de décompression permet de maintenir une concentration élevée de matières en suspension. Cela contribue à son tour à augmenter l'efficacité du processus et à réduire le volume du réservoir anaérobie. Le biogaz généré en phase anaérobie est traité (élimination de l'H₂S) et converti en électricité dans une centrale thermique de type bloc. Compte tenu de l'efficacité des coûts d'exploitation, la production d'énergie était un autre critère décisif pour l'exploitant.

Résultats

Une station de traitement de 1 800 m³/jour d'eaux usées laitières a été conçue, installée et mise en service par AHET. La teneur moyenne en DCO en entrée était de 2 100 mg/l et en sortie inférieure à 50 mg/l, ce qui correspond à une élimination de DCO d'environ 96 %. La qualité du procédé répond à toutes les normes indiennes de protection de l'environnement, et près de 750 m³ de biogaz sont générés par jour, ce qui couvre 50 % des besoins énergétiques de l'installation.

Apport de la technologie fournie

La technologie AVR-AF® utilisée ici permet le traitement économe en énergie des eaux usées grâce à la technologie spéciale de mélange par buse et, en combinaison avec la flottation à détente de pression (HUBER HDF®), des concentrations très élevées de solides. Cela signifie que le système est compact et, par rapport à d'autres procédés, les coûts de maintenance et la production de boues sont faibles. De plus, du biogaz sera produit comme source d'énergie. Le post-traitement aérobie permet de très faibles concentrations s en sortie. □

ÉTUDE DE CAS : Transformation de produit alimentaire soja

Réutilisation d'eau épurée pour les systèmes de refroidissement avec osmose inverse

Contexte

La production et la transformation de graines de soja représentent un secteur économique important en Inde et dans de nombreuses autres régions tropicales et subtropicales. Une entreprise établie en Thaïlande, qui transforme le soja en tant que produit alimentaire, avait jusqu'ici utilisé l'eau de distribution pour ses appareils de refroidissement. Les coûts de l'eau de distribution ont toutefois considérablement augmenté dans cette région ces dernières années. Le client était à la recherche d'une solution de traitement permettant de réutiliser l'eau épurée provenant de la station d'épuration existante. Un courant partiel des eaux usées épurées est envoyé à l'osmose inverse qui renvoie ensuite l'eau dessalée au système de refroidissement.

Défi particulier/Exposé du problème

Les eaux épurées sont de très mauvaise qualité. De grandes quantités d'huile et de protéines non dégradées sont des contraintes quotidiennes qui peuvent conduire à un important colmatage des membranes. De plus, le stockage des eaux usées dans les bassins d'épuration favorise la prolifération des algues. Dans ces conditions l'utilisation de la technologie de membranes pour l'épuration des eaux usées est alors une option judicieuse, lorsque – comme dans cet exemple, en raison de critères économiques – l'eau épurée doit être réutilisée ou utilisée ultérieurement.

Proposition de solution

Les exigences pour qualité de l'eau sont satisfaites avec les membranes planes céramiques de

CERAFILTEC à fonction d'épuration sur membrane (CapClean) intégrée dans le processus. À chaque cycle d'épuration automatisé, les membranes d'ultrafiltration immergées sont entièrement régénérées à l'aide de chlore avec un temps de trempage de 3 minutes. Ce nouveau procédé d'épuration n'est possible qu'avec des membranes planes céramiques « out-in » et une conception modulaire avec système d'arrosage chimique. Le rétentat produit (8 %) est renvoyé à la station d'épuration. L'exploitant sur le site surveille régulièrement le débit, la pression, le trouble et le pH dans l'installation.

Résultats

La phase d'installation 1 a été mise en service en décembre 2019 avec 300 m³/jour. Après une évaluation des performances sur 6 mois, le client a commencé une augmentation de la capacité du système de 2 100 m³/jour supplémentaires. Un seuil de rentabilité de moins de 3 ans a été calculé grâce à la très faible consommation de courant de l'installation ainsi qu'aux économies de la consommation d'eau de distribution.

Apport de la technologie fournie

Le système de membrane installé possède une fonction d'épuration intégrée et permet, grâce à sa conception modulaire spéciale, une épuration sur membrane très efficace. Elle peut ainsi fonctionner de façon stable et avec une faible dépense d'énergie, même dans des conditions difficiles, par exemple lorsque les eaux usées présentent un haut potentiel de colmatage. □

Paramètre	Unité	Entrée	Sortie
Couleur	Pt-Co	117	39
DCO	mg/l	68	30
DBO ₅	mg/l	9	4
TSS	mg/l	18	<1
TDS	mg/l	946	967
Trouble	mg/l	11,2	0,18
Concentration d'huile	mg/l	7,2	0,2

Tableau 1 : Concentrations pertinentes en entrée et en sortie de l'installation Cerafiltec

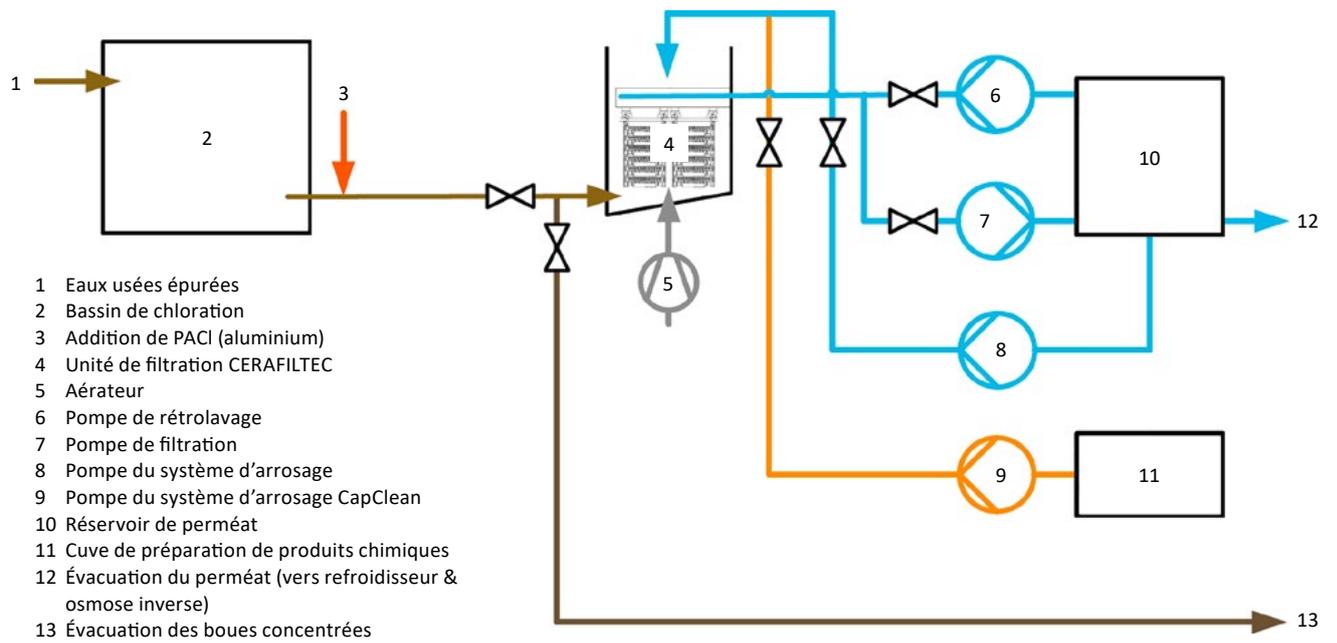


Figure 1 : Diagramme de processus de la filtration Cerafiltec pour la réutilisation de l'eau



Figure 2 : Photographie de l'installation Cerafiltec intégrée

6

MÉTALLURGIE ET

TRAVAIL DES MÉTAUX

Informations spécifiques aux pays

Inde

L'industrie métallurgique a toujours été un moteur important de l'économie indienne en raison des ressources en minerai existantes. L'industrie sidérurgique est devenue la deuxième plus grande production mondiale au cours des dix dernières années et, avec une production annuelle d'environ 110 millions

de tonnes, apporte une contribution considérable au produit intérieur brut national (Tableau 1). D'autres métaux comme le cuivre ou l'aluminium sont également extraits en quantités importantes. En plus de la valeur ajoutée dans la production de métal, l'acier constitue une base importante pour un grand nombre d'industries en aval. La part de loin la plus importante (plus de 60 %) de l'acier produit est utilisée dans l'industrie de la construction, par exemple dans la construction d'infrastructures et de bâtiments. Les autres consommateurs d'acier importants sont les biens de consommation et l'industrie automobile ^[9].



Du fait de leur proximité géographique avec les ressources naturelles de minerai de fer et de charbon de l'Inde, les centres de production d'acier sont les États d'Odisha, de Jharkhand, de Chhattisgarh et de Karnataka. Des aciers de différentes qualités y sont produits dans des aciéries modernes. 45 % de la production d'acier ont lieu directement dans des hauts fourneaux ventilés. Un produit intermédiaire important de l'industrie sidérurgique indienne est également le fer spongieux, généralement obtenu par réduction directe à l'aide de charbon et ensuite principalement fondu dans des fours à arc électrique.

L'industrie métallurgique indienne est en grande partie (environ 80 %) entre des mains privées, la société la plus dominante est Tata Steel, active au niveau international. Environ 50 % de l'acier sont produits par des sociétés de production intégrées qui couvrent l'ensemble de la chaîne de production, de la fusion de l'acier à la transformation ^[116, 9].

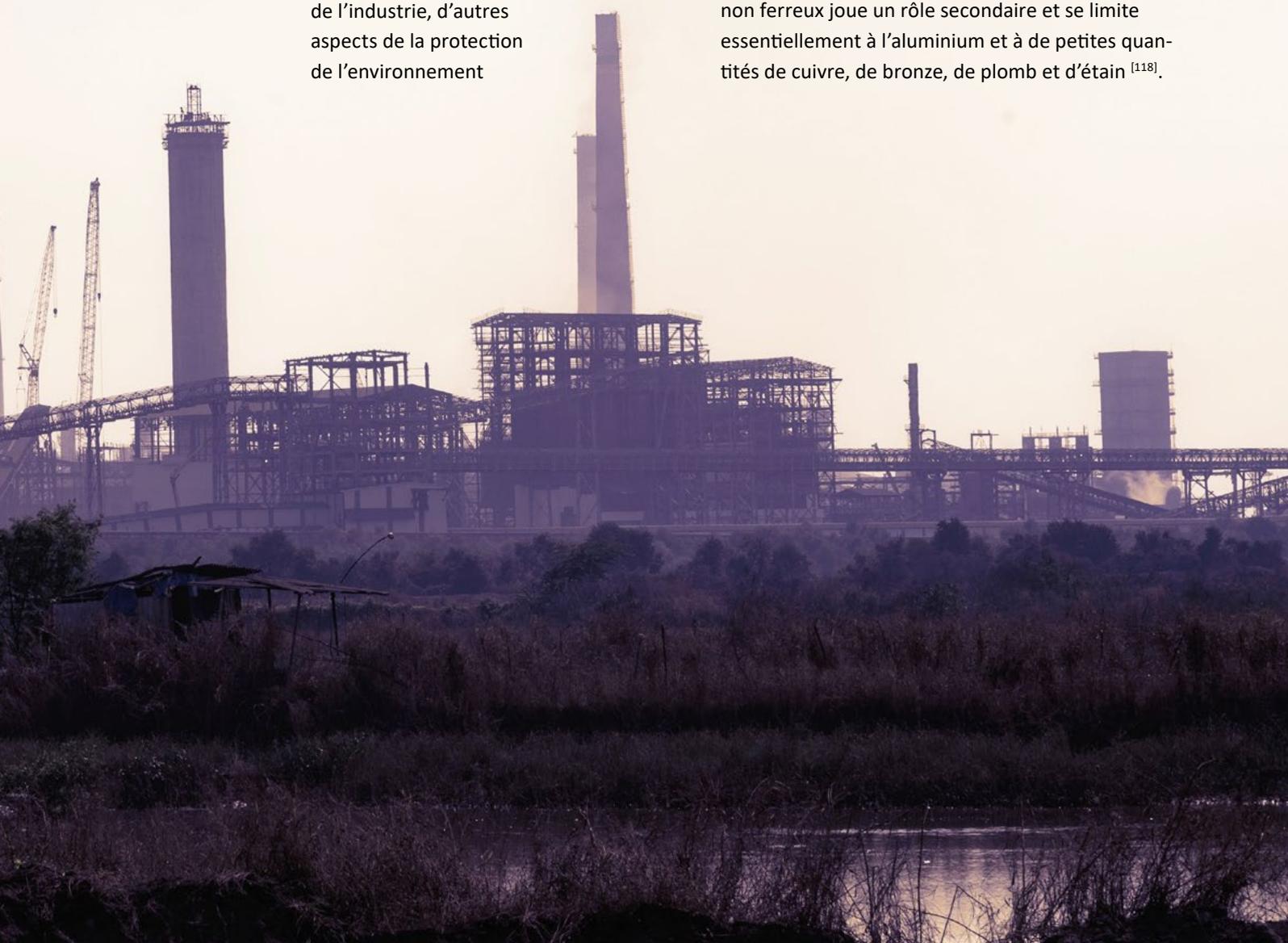
Outre la consommation d'énergie extrêmement élevée de l'industrie, d'autres aspects de la protection de l'environnement

sont également de plus en plus prioritaires.

Le gouvernement prépare actuellement des exigences plus strictes en matière de protection de l'environnement. Le respect des plans de gestion de l'énergie et de l'eau de l'entreprise est déjà considéré comme la norme – la mesure concrète la plus importante est souvent la réutilisation des flux d'eau liée à la production et la mise en circuit de l'eau de refroidissement ^[117].

MOAN

Dans la région MOAN, la demande de métaux et de composants métalliques est étroitement liée à la croissance économique générale. Cependant, la plupart des pays sont des importateurs nets et ne produisent de l'acier qu'en quantités pertinentes localement (Tableau 13). Dans certains pays, comme l'Égypte ou la Jordanie, les capacités de production existantes ne sont qu'insuffisamment utilisées depuis des années en raison de la pénurie de matières premières et de gaz naturel. La production de métaux non ferreux joue un rôle secondaire et se limite essentiellement à l'aluminium et à de petites quantités de cuivre, de bronze, de plomb et d'étain ^[118].



L'acier est généralement produit dans des fours à arc électrique, outre ceux-ci les hauts fourneaux ne fonctionnant qu'en Égypte ^[119]. Les produits sidérurgiques sont principalement de l'acier au carbone et en partie de l'acier inoxydable, tandis que les aciers spéciaux et alliés jouent un rôle beaucoup moins important. Un affinage de surface a généralement lieu – s'il existe – sous la forme d'une galvanisation à chaud. Le débouché le plus important pour l'acier dans la région MOAN est l'industrie de la construction, par exemple dans la construction de bâtiments et d'infrastructures. À moyen terme, on attend aussi une augmentation de la demande d'acier dans les secteurs automobile et énergétique locaux. En fonction de la demande, la sidérurgie produit nettement plus de produits longs (environ 70 à 80 %) que de produits plats (environ 20 à 30 %). Au Maroc, en Égypte et en Jordanie, les barres d'armature représentent de loin la plus grande part des ventes sur le marché de l'acier ^[120].

Industrie et volume d'eaux usées

Pour la fabrication de divers biens de consommation et d'équipement, la production et la transformation des métaux constituent une branche importante de l'industrie en amont. Cela englobe la production de fer, d'acier et d'autres métaux, leur traitement à l'aide de procédés primaires et de formage et d'affinage de surface ainsi que la fabrication de produits métalliques.

Production de métaux

Les métaux ferreux et non ferreux sont généralement produits par fusion des minerais correspondants. Le fer brut est traditionnellement obtenu dans des hauts fourneaux à des températures allant jusqu'à 2 000 °C, puis oxydé en acier, avec, comme flux de déchets du gaz de conversion et des scories d'aciérie fortement contaminés par des poussières. Au lieu de cela, l'acier fondu à partir de fonte spongieuse ou de fonte brute dans le four à arc électrique s'est imposé au niveau régional. Dans le traitement métallurgique ultérieur,

Quantités produites annuellement



Pays	Acier	Aluminium	Cuivre	Zinc
Inde	109 272	2 750	450	688
Égypte	7 807	317	4	n.a.
Maroc	600	n.a.	n.a.	n.a.
Jordanie	150	n.a.	n.a.	n.a.
Tunisie	50	n.a.	n.a.	n.a.

Tableau 1: Quantités annuelles de production pour des matériaux choisis en 2018 [1 000 t par an] ^[119, 118]

l'oxygène, le carbone, l'azote ou l'hydrogène sont éliminés et évacués avec les gaz rejetés pour l'ajustement de l'alliage et de la pureté de l'acier ^[121, 122].

Les métaux non ferreux sont extraits des minerais par hydrométallurgie ou pyrométallurgie et concentrés davantage à l'aide de procédés électrolytiques. Grâce à son excellente conductivité thermique et électrique, le cuivre est aujourd'hui un métal non ferreux industriel important. De plus, l'aluminium joue un rôle de plus en plus important en raison de son faible poids spécifique. L'aluminium est généralement extrait de la bauxite dans le procédé Bayer en dissolvant le minéral dans de la soude à des températures élevées, puis en le précipitant sous forme d'hydroxyde d'aluminium. ^[123] Compte tenu des grandes quantités de flux de gaz rejetés fortement pollués, les flux d'eaux résiduelles les plus importants dans la production de métal proviennent des eaux de lavage utilisées dans l'épuration des gaz rejetés.

Processus primaires et de transformation

Aujourd'hui, l'acier et d'autres métaux sont généralement coulés en continu à l'aide du processus de coulée continue, puis transformés en produits longs ou plats dans le laminage à chaud. Lors du versement dans des fours à cuve, il peut se former du gaz de four, qui a des similitudes avec le gaz de convertisseur et doit être épuré à sec ou par voie humide en conséquence. Dans le laminage à chaud, l'eau est utilisée non seulement pour le refroidissement indirect, mais aussi pour le décalaminage à haute pression et le refroidissement direct et entre ainsi en contact direct avec le produit métallique. Après un traitement de surface mécanique ou chimique, par exemple pour éliminer le tartre, les propriétés du produit métallique sont encore affinées par laminage à froid. Un traitement ultérieur par des procédés de découpe, de formage ou d'assemblage constitue la transition vers la fabrication de produits métalliques et généralement ne consomme pas de quantité notable d'eau ^[124, 125].

Finition de surface

Dans de nombreux cas, les composants métalliques sont soumis à une finition de surface afin d'améliorer leurs propriétés fonctionnelles ou décoratives, par exemple pour la protection contre la corrosion. Tout d'abord, un prétraitement de surface par nettoyage,

dégraissage ou décapage chimique et parfois assisté mécaniquement est nécessaire. Le cœur de la finition de surface est un revêtement métallique, qui peut typiquement être mis en œuvre par dépôt électrolytique, mais aussi par des procédés de réduction ou d'immersion. Les procédés de revêtement les plus répandus comprennent la galvanoplastie (par exemple le chromage) et le trempage à chaud (par exemple la galvanisation à chaud). Enfin, la surface du métal peut être encore modifiée par oxydation (par exemple, brunissage). La finition chimique et électrolytique de la surface se fait généralement dans des bains d'immersion ou de pulvérisation, qui sont régénérés en (semi)continu et, à quelques exceptions près, fonctionnent sans eaux usées. Les eaux usées sont principalement générées dans les processus de rinçage qui suivent chaque étape de traitement individuel ^[126, 127].

Débits et propriétés des eaux usées

Épuration des gaz

Des gaz rejetés fortement pollués apparaissent, entre autres, lors de la production de coke, dans les hauts fourneaux et autres procédés pyrométallurgiques. En plus de l'épuration à sec des gaz rejetés, l'épuration des gaz par voie humide est toujours à la pointe de la technologie dans de nombreux cas, lorsqu'il faut éliminer à la fois les impuretés gazeuses et particulaires. Les procédés de dépoussiérage à sec sont principalement utilisés en liaison avec les fours à arc électrique, tant et si bien qu'il n'y a pratiquement pas d'eau de lavage des gaz par rapport à la voie des hauts fourneaux. L'eau de lavage résultante est généralement exécutée dans un cycle semi-fermé. Les impuretés les plus courantes dans l'eau de lavage des gaz comprennent (Tableau 2) ^[122, 128, 129]:

- Des particules de poussière en suspension : Les eaux usées provenant du lavage des gaz dans les hauts fourneaux contiennent environ 1 à 10 kg de solides par tonne de métal produit. Il s'agit principalement d'oxydes de fer et de manganèse, ainsi que des composés phosphorés et azotés.

- Des gaz solubles dans l'eau : Surtout, le gaz de conversion et les gaz comparables provenant de la production de produits non métalliques peuvent transporter des charges élevées d'oxydes d'azote et de dioxyde de soufre dans les eaux usées. Une autre contamination courante est le cyanogène dissous.
- Des composés azotés dissous : Les eaux de lavage des gaz provenant de la production de coke contiennent souvent des composés azotés organiques et de l'azote inorganique (ammonium notamment, mais aussi thiocyanures).
- Des sels dissous : Lorsqu'ils sont en contact avec la matière première secondaire, les gaz rejetés contiennent généralement d'autres impuretés inorganiques dissoutes, telles que des composés soufrés, des fluorures et des chlorures. Des métaux lourds (par exemple l'arsenic) peuvent également jouer un rôle important, en particulier dans l'eau de lavage pour le gaz de convertisseur.
- Substances dissoutes organiques : De nombreuses eaux de lavage des gaz sont contaminées par des impuretés organiques, par exemple par du phénol, du naphthalène ou des hydrocarbures aromatiques polycycliques. Les gaz de gueulard des fours de fonderie peuvent également introduire dans les eaux usées des substances auxiliaires provenant des moules de coulée (par exemple, des agents de séparation et des liants tels que des amines)
- Cyanures : Des concentrations accrues de cyanures sont observées dans la plupart des eaux de lavage de gaz. Dans le gaz du convertisseur, la charge de cyanure est étroitement liée aux processus de décharge, de démarrage et d'arrêt.

Contact direct avec les produits

Dans certaines étapes de processus de l'industrie, l'eau de process entre en contact direct avec le métal ou les sous-produits. C'est le cas, par exemple, de l'eau de granulation pour le traitement des scories de haut fourneau, qui a une réaction alcaline et contient des sulfures. Néanmoins, le plus grand flux d'eaux usées contaminées par contact direct avec le produit

provient de l'eau de refroidissement du produit utilisée dans la coulée continue et le laminage à chaud. Ces eaux sont principalement contaminées par des solides – par exemple, environ 15 à 40 kg de calamine par tonne d'acier laminé sont emportés dans l'eau de process. De plus, il existe souvent des concentrations élevées d'huiles et d'émulsions, qui proviennent de la lubrification du produit et du système ou de fuites hydrauliques (Tableau 2) ^[22, 130].

Finition de surface

Les bains de traitement acides ou alcalins et les bains électrolytiques pour la finition de surface sont généralement régénérés en (semi)continu et, après une longue période, éliminés comme déchets nocifs, si nécessaire après une concentration appropriée. Les eaux de process apparaissant dans les rinçages intermédiaires du produit sont conduites selon l'état

Étape de processus	Impuretés types
Épuration des gaz (four à coke)	1–4 g/l phénol
	2–6 g/l NH ₄ ⁺
	0,2–1 g/l TSS
Épuration des gaz (gaz de convertisseur)	0,1–5 mg/l phénol
	2–200 mg/l NH ₄ ⁺
	0,1–50 mg/l cyanure
Refroidissement direct (laminage à chaud)	0,1–2 g/l TSS
	10–200 mg/l huile
Dégraissage	0,5–1 g/l TSS
	0,1–0,2 g/l huile
	0,3–0,5 g/l DCO
Revêtement de surface électrolytique	5–100 mg/l TSS
	0,1–1 g/l DCO
	0,1–10 mg/l P de phosphate
	0,1–0,5 mg/l VOX (halogènes organiques volatils)

Tableau2: Plages de concentration des impuretés les plus importantes dans les eaux usées provenant de différentes étapes de processus dans la production et le travail des métaux ^[130, 131, 133]

de la technique en circuit semi-fermé, le flux partiel évacué devant être traité comme eau usée.

Les eaux de rinçage issues du prétraitement sont majoritairement des solutions acides (notamment acide chlorhydrique, sulfurique ou nitrique) (Tableau 2). Bien que cela ne soit plus considéré comme état de la technique, ces eaux peuvent éventuellement contenir également des solvants organiques et des hydrocarbures chlorés. En plus des métaux dissous, les contaminants types dans cette eau de rinçage sont également des cyanures, des chlorures, des Sulfates et des phosphates. En plus des ions métalliques correspondants, les eaux usées provenant des procédés électrolytiques contiennent souvent une gamme de substances auxiliaires telles que des agents mouillants, des azurants, des tensioactifs, des agents complexants et des tampons de pH. Dans la galvanisation à chaud et d'autres procédés par immersion, l'eau est principalement utilisée pour le refroidissement indirect du four de fusion et peut donc être chargée en sels de durcissement, biocides et antitartres ^[131, 132].

Liquide de refroidissement

L'eau de refroidissement est utilisée dans presque tous les processus industriels et sert à dissiper l'excès d'énergie et à ramener l'eau du produit ou de processus à la température ambiante après le traitement. Dans le travail des métaux à haute température en particulier, de grandes quantités d'eau de refroidissement en résultent – plus on utilise d'énergie dans un processus, plus il faut dissiper de l'énergie. Les utilisations possibles de l'eau de refroidissement (selon ^[22]) énumérées ci-dessous à titre d'exemples s'appliquent également en partie à d'autres secteurs industriels.

Avec le refroidissement à passage unique, l'eau est utilisée une fois pour le refroidissement, par exemple puisée dans un puits ou de l'eau de surface, et quitte à nouveau l'exploitation après utilisation. Il en résulte une consommation d'eau très élevée, cependant, selon les conditions de rejet, il n'y a pas ou guère de besoin de traitement de l'eau.

Dans le circuit de refroidissement ouvert, l'eau est évaporée via une tour de refroidissement humide classique et partiellement mise en circuit. Cela se traduit par une consommation d'eau plus faible qu'avec un refroidissement continu, mais l'évaporation partielle

entraîne également une augmentation de la concentration de composants chimiques. Ceux-ci peuvent entraîner des dépôts et de la corrosion et doivent donc être éliminés de l'eau de refroidissement. De plus, l'environnement chaud et humide d'un circuit de refroidissement est un environnement idéal pour la prolifération des bactéries – il faut signaler en particulier ici le risque de légionelles.

Dans le circuit de refroidissement fermé, le refroidissement s'effectue via un échangeur de chaleur afin que l'eau de refroidissement n'entre pas en contact avec l'atmosphère environnante – les seules pertes d'eau résultent ici de fuites ou d'autres pertes dans le système. L'augmentation de la concentration de composants ne joue donc presque aucun rôle dans ce système, bien que des produits de corrosion puissent s'accumuler. Le principal inconvénient de ce procédé est le besoin relativement élevé en énergie.

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Les eaux usées produites dans la production et le travail des métaux peuvent différer considérablement en termes de débits volumiques et de composition, si bien que le choix des méthodes d'épuration appropriées dépend beaucoup de l'emplacement et de l'installation. Le traitement commun de toutes les eaux usées collectées dans une station d'épuration industrielle centrale utilisant des procédés physi-



co-chimiques (par exemple, sédimentation, précipitation, filtration) et/ou une épuration biologique est largement répandu. L'objectif est généralement le suivant ^[22]:

- Séparation des solides
- Séparation des huiles et des graisses, si nécessaire
- Élimination des contaminants organiques, métalliques et autres contaminants inorganiques dissous
- Neutralisation si nécessaire

Dans de nombreux cas, un prétraitement décentralisé des flux d'eaux usées individuels peut améliorer considérablement l'efficacité globale du traitement des eaux usées. Le schéma de traitement peut être spécifiquement adapté aux impuretés et objectifs d'épuration concernés.

Une épuration décentralisée des eaux usées de process est également une condition préalable à la réutilisation (partielle) de l'eau. Des circuits d'eau complètement fermés peuvent généralement être mis en œuvre dans des systèmes de refroidissement fermés, par exemple pour refroidir des moules de coulée via des échangeurs de chaleur. Dans de nombreux cas, les eaux usées traitées qui n'ont pas la pureté requise pour la réutilisation peuvent être utilisées pour d'autres applications ayant des exigences de qualité inférieures ^[22, 130, 134].

Lavage des gaz

Dans la plupart des cas, l'eau de lavage des gaz produite est d'abord neutralisée avant que les solides en suspension qu'elle contient ne soient éliminés. Les solides sont séparés par sédimentation dans des bassins de décantation circulaires, habituellement avec ajout de flocculants, afin d'améliorer les propriétés de décantation des particules très finement en suspension. Dans certains cas, une combinaison de procédés avec des hydrocyclones ou des filtres à sable peut être nécessaire afin d'obtenir un degré élevé d'absence de matières solides en sortie.

Une purification supplémentaire, par exemple au moyen d'un échange d'ions ou d'adsorption, peut être utile si les eaux usées doivent être débarrassées de substances dangereuses pour l'environnement (par exemple, des hydrocarbures aromatiques polycycliques) ou si elles contiennent des composés métalliques de valeur dont la récupération est

économiquement rentable. Les eaux usées contenant du cyanure peuvent être traitées par strippage, oxydation, biodégradation ou complexation. La réaction conduisant au glyconitrile avec addition de formaldéhyde, avec oxydation subséquente du glyconitrile (par exemple par du peroxyde d'hydrogène), est utilisée le plus fréquemment ^[128, 129, 134].

Contact direct avec le produit

Les eaux usées provenant du contact direct avec le produit contiennent souvent des concentrations élevées de solides, ce qui peut entraîner des dépôts et endommager les systèmes (pompes par exemple). Pour cette raison, au moins un bassin de dessablement est généralement installé le plus près possible du point d'arrivée afin d'éliminer la plupart des solides. Le traitement des eaux usées se concentre généralement sur la séparation des huiles et l'appauvrissement plus poussé en solides. Dans la première étape, la plupart des huiles et graisses flottantes sont éliminées par séparation gravitaire afin d'éviter le colmatage des systèmes en aval. Les solides sont généralement éliminés au cours d'un processus en deux étapes, consistant en une sédimentation et une filtration sur sable. Souvent, des résidus d'huiles et de graisses sont également retenus dans la filtration sur sable. Parfois, d'autres approches que la séparation simultanée de l'huile et des particules sont utilisées, comme la filtration sur filtres à lamelles ou la flottation. Si les eaux usées contiennent des concentrations importantes d'émulsions de lubrifiants réfrigérants, une rupture thermique ou chimique de l'émulsion, éventuellement en combinaison avec un post-traitement biologique ou oxydant, peut être nécessaire. Si les eaux usées sont traitées conformément à l'état de la technique, une réutilisation à 95 % (par exemple pour le refroidissement du produit dans le laminoir à chaud) est considérée comme faisable ^[22, 130, 135].

Finition de surface

La première étape du traitement des eaux usées provenant du prétraitement et de la finition de surface est principalement la neutralisation, par exemple avec de l'hydroxyde de calcium ou de la soude, en raison des pH souvent bas. Dans de nombreux cas, des réactions de précipitation se



produisent déjà, c'est-à-dire que des ions métalliques dissous se déposent sous forme d'hydroxydes et peuvent être séparés sous forme de solides dans l'étape suivante. Les solides sont généralement séparés par sédimentation (éventuellement avec l'ajout de flocculants), parfois aussi en combinaison avec des processus de filtration.

Un traitement supplémentaire est nécessaire si les eaux usées contiennent des substances dissoutes dangereuses pour l'environnement. Les cyanures sont généralement oxydés au moyen d'un rayonnement UV ou de peroxyde d'hydrogène, car l'utilisation d'hypochlorite peut conduire à la formation d'halogènes adsorbables en liaison organique. Si le chrome (VI) hautement toxique est utilisé pour le traitement de surface, les résidus correspondants dans les eaux usées doivent être réduits en chrome (III) moins problématique au moyen de bisulfite de sodium ou de Sulfate de fer (III). Dans certains cas, l'eau convenablement traitée peut être réutilisée ou utilisée ultérieurement pour le rinçage du produit – en particulier les processus de passivation et de chromatisation imposent toutefois des exigences si élevées sur la pureté de l'eau que la réutilisation n'est pas une option en ce cas ^[22, 131, 136].

Eau de refroidissement

Comme mentionné ci-dessus, le traitement de l'eau de refroidissement dans les circuits de refroidissement ouverts, largement répandus, est un processus important ^[22]. D'une part, des concentrations élevées de chlorure dans le système de refroidissement – en

particulier à des pH bas – provoquent souvent une corrosion des métaux, ce qui peut entraîner des fuites dans le système. Les dépôts sur les échangeurs de chaleur et autres éléments de refroidissement, par exemple par du carbonate de calcium, sont un autre phénomène courant. Le dépôt entraîne une perte de capacité de transfert de chaleur et favorise également la croissance de biofilms. La croissance bactérienne – en particulier les biofilms pouvant contenir des légionnelles pathogènes – est l'un des principaux problèmes des systèmes de refroidissement, et peut rapidement entraîner la fermeture d'usines en raison du risque élevé pour la santé. Généralement, ces problèmes sont résolus par l'utilisation de produits chimiques tels que des biocides, des adoucissants et des agents anticorrosion. Il faut les acheter à l'extérieur et ils sont souvent utilisés en grande quantité, ce qui est un inconvénient d'un point de vue économique. De plus, les substances utilisées sont souvent nocives pour l'environnement, c'est pourquoi l'eau de refroidissement sortant de l'usine doit également être épurée. Pour ces raisons, d'autres procédés sont de plus en plus développés et utilisés pour réduire la consommation de produits chimiques. Quelques exemples sont donnés ici (basés, entre autres, sur ^[137]) :

- Désinfection UV pour éliminer les bactéries
- Filtration (membranaire) pour séparer les solides
- Dessalement et conditionnement physique de l'eau
- Génération de biocides sur site
- Dépôt d'électrodes pour l'élimination ciblée des ions □

ÉTUDE DE CAS : Extraction du zinc/Lixiviation du zinc en Inde

Utilisation de sondes de pH et d'un appareil de mesure multicanal modulaire pour la régulation du pH

Contexte

Hindustan Zinc Ltd est un important producteur indien de produits miniers et de matières premières avec un chiffre d'affaires annuel d'environ 250 millions d'euros et environ 6 800 employés. Les principaux produits sont le zinc, le plomb, l'argent et le cadmium. Sur le site de Chittorgarh/Rajasthan, le processus d'extraction du zinc devait être encore optimisé et automatisé avec une technologie de mesure robuste.

Défi particulier/Exposé du problème

L'eau est utilisée comme solvant dans l'extraction du zinc à partir de zinc-calcite. Afin de dissoudre le zinc à partir de l'oxyde de zinc, l'eau de process a un pH neutre ou légèrement acide dans la première étape de traitement. Il faut donc l'ajuster avec l'ajout d'acide sulfurique et le maintenir pendant le processus. Dans une autre étape du procédé, l'eau de process est à nouveau enrichie en une solution fortement acide afin d'extraire le zinc restant de l'oxyde de zinc et du zinc-fer. Le résultat de ce processus est un solide et un liquide ; le liquide contient du zinc et est appelé produit de lixiviation ; le solide est connu sous le nom de résidu, mais il contient des métaux de valeur (généralement du plomb et de l'argent), qui sont vendus comme sous-produits. À la fin du processus, l'eau de process doit être épurée et neutralisée. En raison de sa composition chimique, l'eau de process a pollué les capteurs de pH électrochimiques utilisés jusqu'à présent, ce qui a réduit la durée de vie et la fiabilité des valeurs mesurées. Une combinaison d'une technologie de mesure robuste appropriée, d'un échantillonnage automatisé et d'un nettoyage des capteurs ainsi que d'une régulation intégrée du pH a donc été recherchée.



Figure 1 :
capteurs pH et
redox JUMO
tecLine HD



Figure 2 :
appareil de mesure
multicanal modulaire
avec régulateur intégré
et enregistreur sans
papier JUMO AQUIS
touch S

Proposition de solution

Lors de l'extraction du zinc, le client mesure et régule le pH de l'eau de process. Afin d'optimiser et d'automatiser ce processus, Jumo a suggéré d'installer une combinaison de deux produits, chacun en double : l'électrode combinée pH et redox JUMO tecLine HD avec électrodes HD et l'appareil de mesure multicanal modulaire pour l'analyse des liquides avec régulateur JUMO intégré et enregistreur sans papier AQUIS touch S.

Résultats

L'électrode combinée pH et redox JUMO tecLine HD a été installée dans une conduite de dérivation, où des échantillons d'eau de process sont mesurés. Le système combiné se compose d'un capteur de pH, d'un transmetteur, d'un capteur de niveau, d'un système de nettoyage et de vannes pour l'addition

dosée de l'acide et de l'eau et a été spécialement conçu pour le client. Avec cette combinaison, la mesure ainsi que l'ensemble de l'optimisation et de l'automatisation du processus peuvent être effectués dans une seule unité de commande. L'utilisation d'eau de process et d'acide sulfurique a pu être globalement considérablement réduite, avec des valeurs cibles comprises entre un minimum de 8 et un maximum de 15 % d'économies. Le client est entièrement satisfait de la solution installée par JUMO.

Apport de la technologie fournie

La technologie de mesure installée offre une flexibilité maximale grâce à la programmation indépendante du système, ce qui permet d'obtenir un fonctionnement optimisé des séquences de processus. La haute disponibilité des pièces de rechange sur site réduit également les coûts de service. □

7

INDUSTRIE

TEXTILE

ET CUIR



Informations spécifiques aux pays

Inde

L'industrie textile est une industrie majeure dans le pays, contribuant pour environ 61 milliards de dollars US au PIB national (2,3 %). Les centres de production textile les plus importants se trouvent au Tamil Nadu, au Gujarat, au Maharashtra et au Rajasthan. Le soutien du gouvernement indien sous la forme de mesures de promotion des exportations et l'autorisation d'investissements étrangers à 100 % ont entraîné une augmen-

tation des investissements dans l'industrie ces dernières années ^[138].

L'industrie textile indienne couvre une grande variété de tailles d'entreprises, des petites entreprises traditionnelles aux usines à forte intensité de capital des sociétés multinationales (par exemple, Arvind, Vardhman Textiles, Welspun India). Les micro- et petites entreprises sont majoritaires. Toute la chaîne de valeur, de la transformation des matières premières à la fabrication de vêtements, est représentée. Des fibres synthétiques, telles que le polyester, la viscose et le Nylon, mais aussi des fibres naturelles sont utilisées comme matières de départ. Avec une production annuelle de 33,7 millions de balles, l'Inde est le plus grand producteur de coton au monde et le deuxième plus grand fabricant de soie avec une part de 18 % de la production mondiale de soie. Les usines de filature, de tissage et de tricotage forment la branche la plus importante de l'industrie textile en Inde. Un grand nombre de petites et moyennes entreprises de teinture et d'impression sont actives dans le finissage textile. La chaîne de valeur est complétée par des ateliers de couture, principalement industriels. Les sous-secteurs du finissage textile, de la teinture et du blanchiment en particulier ont été classés par le Central Pollution Control Board comme étant extrêmement nocifs pour l'environnement et sont donc étroitement surveillés pour la pollution de l'eau. Une démarche ZLD est également requise pour les entreprises ayant un volume d'eaux usées supérieur à 25 m³/jour ^[139, 140]. Cela pose des défis majeurs pour de nombreuses entreprises, car les systèmes de traitement des eaux usées les plus simples (par exemple, les bassins de sédimentation, la neutralisation) ne sont souvent pas disponibles, sont mal dimensionnés ou sont mal entretenus et mal exploités.

En tant que deuxième producteur, l'industrie indienne du cuir représente environ 13 % de la production mondiale de cuir et d'articles en cuir. Base importante de cela, la disponibilité de la matière première correspondante – l'Inde possède 20 % des bovins mondiaux et 11 % du reste du bétail et produit 280 millions de m² de cuir par an dans ses tanneries. Une grande partie de la production de cuir est située dans les États du Tamil Nadu, du Bengale occidental et de l'Uttar Pradesh. Dans ces régions,

mais aussi dans d'autres régions prometteuses, le gouvernement encourage actuellement le développement de « Mega Leather Clusters ». Il s'agit de parcs industriels spécialisés conçus pour accroître l'efficacité du secteur et améliorer la protection de l'environnement grâce à des connexions optimales aux infrastructures. L'accent est également mis sur la création d'installations communes de traitement des eaux usées industrielles, car les tanneries font partie des plus grands pollueurs d'eau de l'Inde et les eaux usées des tanneries ont récemment été classées comme hautement polluantes ^[140, 141].

MOAN

L'industrie textile de la région MOAN est très axée vers l'exportation, les États-Unis et l'Europe étant les marchés de vente les plus importants. Alors que de nombreux pays se sont traditionnellement concentrés sur la production de matières premières et de produits de base, aujourd'hui des chaînes de valeur de plus en plus complètes se développent. Dans de nombreux cas, les gouvernements tentent de soutenir l'industrie par le biais de mesures de financement ciblées. Outre la conclusion d'accords commerciaux, cela inclut également un soutien financier à la mise en place de nouveaux sites de production (par exemple en Égypte) et à la formation de spécialistes (par exemple au Maroc) ^[142, 143].

L'industrie textile joue un rôle important en Égypte car elle contribue pour environ 3 % au PIB du pays. Base importante de cela, la disponibilité du coton comme matière première, tandis que les fibres synthétiques sont généralement importées. L'autre chaîne de valeur comprend les filatures, les usines de tissage et le finissage textile et est dominée par les entreprises du secteur public. 90 % des ateliers de couture sont privés, par exemple Oriental Weavers en tant que l'un des plus grands fabricants de tapis au monde et Yesim en tant que producteur pour des marques telles que Nike ^[142, 144]. L'industrie textile marocaine connaît un essor depuis l'ouverture des chaînes de valeur au-delà de l'approvisionnement en matières premières (coton, fil). Cette évolution doit encore être renforcée par des financements ciblés, dans le but d'augmenter encore la part du PIB national (actuellement 8 %) et de créer davantage d'emplois ^[143, 145]. En comparaison, l'industrie

textile en Tunisie et en Jordanie est moins robuste. Les entreprises étrangères fournissent l'essentiel des investissements dans cette industrie, mais les incertitudes économiques affaiblissent la compétitivité internationale des deux pays. Une perspective possible, en particulier en Tunisie, consiste à se concentrer sur des sous-secteurs à plus forte valeur ajoutée, tels que les textiles techniques ^[146, 147].

La production et la transformation du cuir sont traditionnellement ancrées dans de nombreux pays de la région MOAN, mais jouent le plus souvent un rôle secondaire dans l'économie actuelle. Comme dans l'industrie textile, les mesures gouvernementales sont utilisées dans de nombreux endroits pour accroître la compétitivité et l'attractivité pour les investisseurs étrangers.

Cela inclut également la promotion de nouveaux sites de production dotés d'infrastructures modernes afin de réduire la pollution de l'eau, causée notamment par les tanneries, et de satisfaire aux normes internationales ^[148, 149, 150].

Industries et production d'eaux usées

Industrie textile

Dans l'industrie textile, les articles tissés à plat sont fabriqués à partir de fibres brutes et transformés en textiles. L'industrie textile est l'étape préliminaire la plus importante de l'industrie du vêtement, mais des textiles techniques ou médicaux sont également produits. Dans l'industrie textile, l'eau est utilisée en grande quantité d'une part comme solvant pour les colorants et adjuvants chimiques, et d'autre part pour éliminer par lavage les produits chimiques en excès. Les étapes de processus les plus importantes dans l'industrie textile sont les suivantes ^[151]:

- Filature : Production de fils à partir de fibres brutes naturelles (par exemple laine animale, coton) ou de fibres synthétiques (par exemple polyester, polyamide, polypropylène)
- Fabrication de tissus : Fabrication de textiles, principalement par tissage, procédés de maillage ou tressage de fils

- **Finissage** : Les processus de finissage peuvent être effectués sur des fibres, des fils, des textiles ou sur des produits prêts à l'emploi. Ceux-ci comprennent le prétraitement (y compris le désencollage, le blanchiment, le mercerisage), la teinture, l'apprêt (par exemple, apprêt antifroissage, apprêt ignifuge), l'impression et le revêtement.

Industrie du cuir

L'industrie du cuir englobe la restructuration et la transformation des peaux animales en cuir polyvalent et durable. Les étapes de fabrication les plus importantes dans la production du cuir sont ^[152]:

- **Travail de rivière** : Préparation des peaux par trempage, pelanage (épilage) et écharnage
- **Tannage** avec toutes les étapes intermédiaires associées
- **Corroyage humide et teinture** : Neutralisation et graissage, ainsi que teinture et séchage du cuir

- **Pré-corroyage et corroyage-finissage** : Palisson, dérayage, grainage et foulonnage des cuirs
- **Fabrication d'articles en cuir** : Transformation ultérieure du matériau, comme en chaussures et autres articles en cuir

L'industrie du cuir est très gourmande en eau et en eaux usées, car l'eau est utilisée comme principal solvant et moyen de transport. Le traitement de 1 t de peaux animales produit environ 600 kg de déchets solides et 15 à 50 m³ d'eaux usées. Environ 500 kg de produits chimiques sont utilisés pour le traitement, dont 85 % sont rejetés avec les eaux usées. De loin la plus grande partie des eaux usées est produite dans le travail de rivière lors du trempage, du pelanage et du tannage. En revanche, le pré-corroyage et le corroyage final ainsi que la transformation ultérieure en articles en cuir sont nettement moins importants pour l'environnement ^[153, 154].

Eaux usées de l'industrie textile

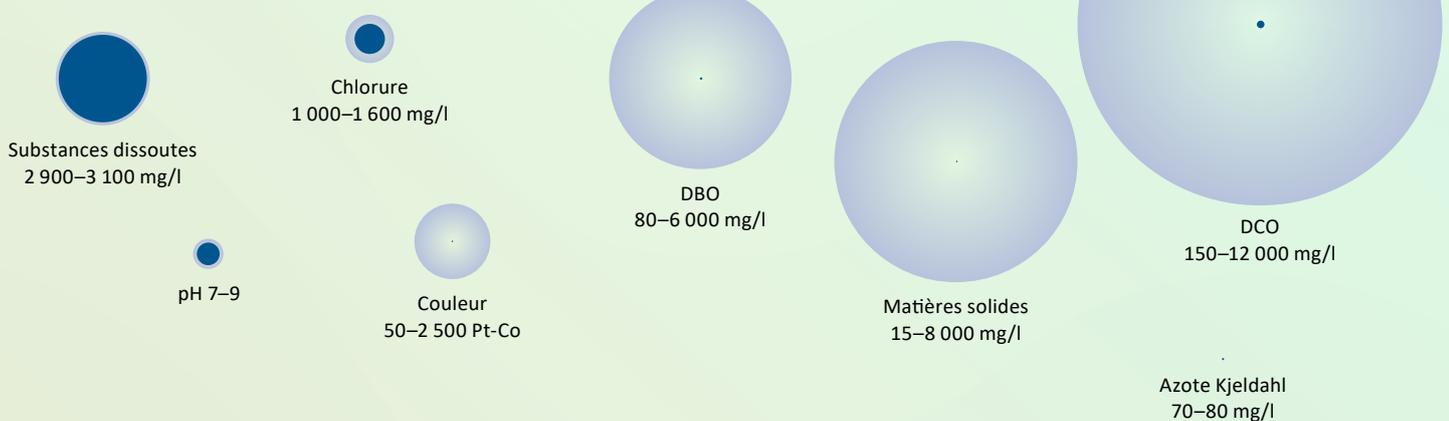


Figure 1: Concentrations types d'impuretés dans les eaux usées de l'industrie textile ^[155]

Débits et propriétés des eaux usées

Filature et tissage

Les eaux usées de l'industrie textile peuvent contenir toutes les substances chimiques présentes tout au long de la chaîne de fabrication. Lors du pré-lavage des filatures, les impuretés des fibres brutes, telles que les résidus de pesticides des fibres naturelles, sont souvent entraînés dans les eaux usées. Les fils sont ensimés (c'est-à-dire imprégnés) avant la fabrication du tissu puis désencollés à nouveau. Les eaux usées du désencollage contiennent donc à la fois les agents d'encollage (par exemple amidon, éthers d'amidon, alcools ou alcool polyvinylique) et les adjuvants du désencollage (par exemple acide ou oxydant) ^[22].

Finissage textile

Les flux d'eaux usées les plus importants dans les installations de traitement sont les eaux usées provenant du prétraitement, de la teinture et du finissage, qui, selon le type de traitement et le type de fibre, peuvent contenir les impuretés suivantes (Figure 1) :

- Colorants
- Produits chimiques de finissage (par exemple, assouplissants textiles, composés alkylés perfluorés et polyfluorés (PFAS), agents ignifuges)
- Adjuvants chimiques pour le prétraitement, la teinture et le finissage (par exemple tensioactifs, complexants, réducteurs et oxydants)
- Acides, bases et sels neutres

Étape de processus	Étapes de travail	Eaux usées
Trempage et écharnage	Trempage des peaux (éventuellement conservées) à l'aide d'adjuvants, suivi d'écharnage mécanique	- DBO, DCO et solides d'origine animale - Sels - Azote organique - Adjuvants
Pelannage et épilage	Gonflement et dégradation des peaux dans des conditions alcalines pour détacher les poils	- Chaux et alcalis - Sulfures - Azote organique (ammonium) - DBO, DCO et solides d'origine animale
Déchaulage et confitage	Élimination des résidus de pelannage, puis préparation de la peau pour l'absorption de l'agent de tannage par ajout d'enzymes et, si nécessaire, d'acide	- Ammonium - Sulfure - Sels de calcium - DBO, DCO et solides d'origine animale
Tannage et post-tannage	Transformation des fibres de collagène en fibres de cuir et conservation des peaux par incorporation d'agents de tannage, éventuellement post-tannage après neutralisation	- Tanins, par exemple chrome (III) - Acides - Complexants - Adjuvants
Coloration	Teinture du cuir et fixage de la teinture, suivie d'une pigmentation ou d'un revêtement supplémentaire si nécessaire	- Colorants - Solvants organiques - Halogènes en liaison organique (AOX)

Tableau 1: Étapes de travail et contamination type des eaux usées des étapes de processus les plus importantes pour l'environnement dans l'industrie du cuir ^[157]

En plus d'autres étapes de processus avec une charge DCO élevée, telles que le désencollage, non seulement les résidus d'oxydants mais aussi d'éventuels produits de réaction et adjuvants sont introduits dans les eaux usées pendant le blanchiment. Si de l'hypochlorite de sodium (NaClO) est utilisé, des composés organiques halogénés tels que le trichlorométhane se forment souvent. Lors du blanchiment au peroxyde d'hydrogène, les adjuvants, tels que les agents complexants utilisés pour la stabilisation, sont plus problématiques.

La composition des eaux usées de teinture dépend fortement des fibres et des nuances de couleurs en question. En raison des colorants complexes métalliques utilisés dans chaque cas, les impuretés types sont, par exemple, le cuivre dans la teinture des nuances foncées ou le chrome (III) dans la teinture du polyamide et de la laine. Une source importante d'azote dans les eaux usées peut être l'urée, utilisée pour imprimer la cellulose avec des colorants réactifs.

Des composés organofluorés de faible poids moléculaire et des agents ignifuges sont souvent utilisés dans l'apprêt ^[153, 22].

Travail de rivière

75 % de la DBO et de la DCO dans la production de cuir proviennent du travail de rivière (Tableau 1, Tableau 2). Le trempage et le pelanage conduisent principalement à des eaux usées contenant des résidus organiques, par exemple des résidus de sang et de tissus ou des protéines solubles. Les poils détachés et autres solides représentent ici une pollution très importante des eaux usées. La chaux, l'ammonium et les sulfures d'hydrogène dissous sont souvent utilisés comme adjuvants pour l'épilage, et sont également introduits dans les eaux usées et conduisent à des pH de 12 et plus. Les eaux usées peuvent également contenir des adjuvants tels que des conservateurs (principalement du chlorure de sodium), des tensioactifs, des enzymes ou des biocides ^[22, 156].

Étape de processus	pH [-]	DCO [mg/l]	Azote organique [mg/l]	Azote ammoniacal [mg/l]	Sulfure [mg/l]	Chrome [mg/l]
Trempage et écharnage	7–13	2 500–100 000	200–5 000	20–300	1 200–4 000	
Pelanage et épilage	12–13	17 000–100 000	2 000–5 000	100–300	1 200–4 000	
Déchausage et confitage	7–9	1 000–17 000	300–900	30–7 000	<300	
Tannage et post-tannage	3–4	3 000–12 000	env. 200	<300		300–4 000
Coloration	3,5–5	8 000–70 000	env. 200	100–900		10–500

Tableau 2: Concentrations types d'impuretés dans les eaux usées de l'industrie du cuir ^[154]

Tannerie

La fabrication du cuir est finalement achevée et le matériau est stabilisé par l'utilisation de tanins minéraux, synthétiques ou végétaux. 80 à 90 % des tanneries dans le monde utilisent des sels de chrome (III) pour le tannage car ils sont facilement disponibles et produisent des cuirs de haute qualité. Dans ces cas, les eaux usées de la tannerie, mais aussi de nombreuses étapes de processus en aval, sont souvent fortement contaminées par le chrome. Les glutaraldéhydes toxiques et dangereux pour l'environnement constituent un autre agent de tannage, en particulier dans la production de cuir d'ameublement et pour l'automobile. En plus des tanins, les effluents des tanneries contiennent souvent des fibres de cuir, des sels inorganiques et des graisses ^[157, 22].

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Les eaux usées de l'industrie du textile et du cuir ont des propriétés très différentes selon le secteur d'activité, l'étape du processus et le produit spécifique. Les principaux objectifs du traitement des eaux usées sont les suivants :

- Séparation des matières en suspension
- Réduction de la pollution organique (DBO et DCO) ainsi que de l'azote et du phosphore
- Élimination des produits chimiques auxiliaires hautement concentrés
- Décoloration
- Neutralisation

En particulier, les eaux usées provenant du travail de rivière dans le traitement du cuir, par exemple, nécessitent souvent un prétraitement distinct pour séparer les solides. Selon l'application, des technologies de sédimentation ainsi que de filtration ou de flottation sont utilisées. Cela garantit l'efficacité et le fonctionnement sans problème du traitement des eaux usées en aval. L'étape centrale du traitement des eaux usées dans les industries du textile et du cuir est généralement un traitement biolo-

gique, dans lequel les charges de DBO et de DCO ainsi que de nombreuses impuretés organiques et inorganiques sont bien décomposées. Dans l'industrie du cuir, des procédés aérobies sont notamment utilisés pour l'élimination biologique de l'azote, par exemple une dénitrification intermittente en amont ou en aval. Les substances (auxiliaires) persistantes sont éliminées dans le flux complet ou dans des flux partiels individuels à l'aide de processus physico-chimiques avancés tels que la précipitation, l'adsorption, l'oxydation ou la réduction ^[158, 159].

Exemple de décoloration

Les processus de teinture jouent un rôle important dans la production de textile et de cuir. Certains colorants dispersés ou de poids moléculaire élevé sont adsorbés sur les boues activées lors de l'étape d'épuration biologique, mais une dégradation biologique aérobie n'a pas lieu ou n'a lieu que très lentement. Cela rend nécessaire une décoloration ciblée des eaux usées. Les approches suivantes sont disponibles pour la décoloration ^[22, 160]:

Réduction

Clivage réducteur de colorants azoïques avec du sel de fer (II) en milieu alcalin (ajusté avec du lait de chaux), généralement avant le traitement biologique.

Adsorption

Une décoloration de 80 % et plus peut être obtenue par adsorption sur charbon actif granulé dans des filtres à lit fixe. L'utilisation de charbon actif en poudre augmente la flexibilité du processus.

Précipitation

Les colorants ou hydrolysats anioniques peuvent être éliminés en utilisant des polymères organiques cationiques. À un pH légèrement alcalin – selon le colorant – une décoloration d'environ 90 % peut être obtenue.

Filtration sur membrane

De nombreux colorants de poids moléculaire élevé peuvent être bien retenus par ultra- ou nanofiltration. Compte tenu des coûts élevés, cette approche n'a d'intérêt que si d'autres synergies sont utilisées, telles que la rétention des solides ou le recyclage de l'eau.



Élimination du chrome (III)

Si des sels de chrome (III) sont utilisés comme agents de tannage dans la production de cuir, des concentrations de chrome allant jusqu'à 4 g/l peuvent apparaître dans les eaux usées du processus.

Du côté du processus, il est possible de réduire les rejets de chrome par une substitution par d'autres agents de tannage ou une efficacité améliorée du processus. Du côté des eaux usées, une proportion importante de chrome est éliminée dans le traitement biologique. Le chrome est lié par adsorption dans les boues et finalement éliminé avec les boues d'épuration (éventuellement en tant que déchets dangereux).

Dans certains cas, un prétraitement ciblé peut également être nécessaire afin de réduire la charge de chrome dans les eaux usées. Cela se fait généralement dans les flux d'eaux usées les plus concentrés possibles par précipitation avec de l'oxyde de magnésium, de la chaux hydratée et/ou du chlorure d'aluminium. Dans des circonstances favorables, les boues peuvent ensuite être dissoutes à nouveau avec de l'acide sulfurique et, après l'ajout des adjuvants nécessaires, réutilisées pour le tannage au chrome ^[22, 161].

Sulfure d'hydrogène

Le sulfure d'hydrogène est un gaz incolore, corrosif, hautement inflammable et hautement toxique qui mérite une attention particulière dans le traitement des eaux usées contenant des sulfures. Les composés protéiques animaux, tels qu'ils apparaissent notamment dans les eaux usées du travail de rivière, se décomposent rapidement en H₂S dissous ou, en milieu acide, en hydrogène sulfuré gazeux.

La formation de sulfure d'hydrogène peut être évitée en minimisant l'apport de sulfures dans les eaux usées et en empêchant un mélange d'eaux acides (provenant par exemple du tannage) et contenant des sulfures (en particulier provenant du pelanage) dans le système de canalisations interne. La meilleure technologie disponible comprend également l'élimination des composés soufrés des flux d'eaux usées partiels avant le traitement biologique, par exemple par précipitation avec des sels de fer ou oxydation catalytique avec des sels de manganèse. Dans le traitement biologique, le sulfure d'hydrogène dissous est finalement complètement oxydé en Sulfate ou converti en soufre élémentaire. Dans tous les cas, une encapsulation fiable de toutes les sources d'émissions possibles et une extraction et un traitement fiable de l'air rejeté sont importants ^[157, 162]. □

ÉTUDE DE CAS : Industrie textile en Inde

Le plus grand séchoir solaire industriel au monde

Contexte

L'association textile indienne NTIEM avec environ 120 entreprises membres et une production annuelle de tissu d'environ 2 800 millions de mètres a décidé d'étendre la station d'épuration commune avec un permis de rejet antérieur de 40 m³/jour à une capacité nominale maximale de 450 m³/jour. Le volume total de boues d'épuration de l'usine pour les boues déshydratées était de 160 t/jour en 2017. En plus de réduire la masse des déchets et les coûts d'élimination, il était prévu de générer un combustible de substitution neutre en CO₂ à usage industriel.

Initialement, un séchoir à bande grillagée basse température était prévu pour le séchage des boues primaires et un hall de stockage pour les boues secondaires (boues excédentaires). À cet effet, les boues devaient être temporairement stockées dans un hall d'une surface au sol de 12 000 m², les eaux de drainage devaient être renvoyées au système pour traitement et les boues devaient être éliminées dans une décharge.

Défi particulier/Exposé du problème

Les travaux de construction en béton armé de l'entrepôt étaient déjà terminés lorsque la décision a été prise en faveur du système de séchage solaire de Zizmann. La section de drainage était sur le côté du hall, les boues étaient amenées par des chargeuses sur pneus et des ouvriers. La teneur en matière sèche souhaitée de 25 % n'a pas pu être atteinte de manière constante avec les unités de déshydratation. Les effets mécaniques du pelletage, du chargement des véhicules de transport avec des chargeuses sur pneus et du basculement sur la zone de séchage ont entraîné une détérioration de la qualité des boues. Il y avait également un risque accru de pollution du fait des odeurs causées par des composés chimiques et biologiques volatils. La dégradation des performances de séchage due à l'humidité élevée pendant la mousson était également un problème majeur qui devait être pris en compte.

Une technologie économique et éprouvée était nécessaire pour un projet d'une telle ampleur. La combinaison de la technologie de séchage solaire de Zizmann et de la production et de l'assemblage par un partenaire local a répondu à toutes les exigences du client. Sur la base de l'expérience précédente avec le développement de poussière pendant le processus de séchage jusqu'à une teneur en matière sèche de 90 % de résidus secs (DR), une technologie de séchage des boues d'épuration était nécessaire et devait répondre aux exigences de la protection de la santé.

Proposition de solution

En raison de la flexibilité mécanique, le système pouvait facilement être adapté aux conditions existantes (Figure 4). Avec des fondations en bandes comme surfaces de marche pour le système de séchage Zizmann, il a été possible de se passer du démantèlement de la structure en béton existante. La hauteur du bâtiment d'origine du hall de stockage des boues a été réduite de plus de cinq mètres, ce qui a considérablement réduit les coûts prévus pour la construction du hall et, d'autre part, cela a couvert une partie des coûts du système de séchage.

Les séchoirs Zizmann sont conçus comme des convoyeurs à chaîne sans fin, dans le présent projet entraînés par un motoréducteur Siemens de 4 kW, ou des décanteurs secondaires à chaîne. Comme le séchage n'a lieu que sur la surface en contact avec l'air frais, la génération récurrente de nouvelles surfaces d'évaporation par la technique du retournement est indispensable. Le système éprouvé garantit des intervalles de retournement jusqu'à 60 fois par heure pour un mouvement des boues sans poussière. L'échange d'air constant avec des vitesses d'écoulement adaptées assure un séchage sans ATEX dans la zone de décharge à 1 m/s, ainsi qu'un séchage superficiel rapide dans la zone d'entrée des boues humides à 5 m/s combiné à un refroidissement par évaporation à la surface des boues, ce qui réduit

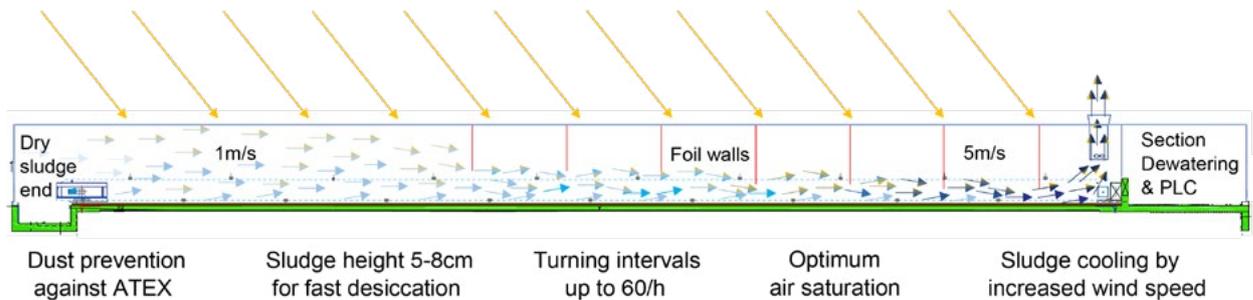


Figure 1: Représentation schématique du séchage solaire des boues

le risque de formation de nouvelles odeurs dans la zone des boues humides (effet wind-chill).

Afin de produire un carburant de substitution neutre en CO_2 de haute qualité avec un pouvoir calorifique de \varnothing 12MJ/kg par séchage à 90 % DR, des options de recyclage plus rentables dans l'industrie du ciment ont été envisagées au lieu de continuer à avoir recours aux décharges.

Pendant la saison de la mousson, les boues sont alors temporairement stockées et acheminées vers l'étape de séchage avec un retard. La possibilité d'une optimisation ultérieure a déjà été envisagée lors des travaux de gros œuvre, afin qu'un chauffage supplémentaire puisse désormais être installé ultérieurement si nécessaire. Cela rendrait obsolète le traitement saisonnier des boues.

Résultats

Malgré les fluctuations de la teneur en matière sèche lors de la déshydratation, le volume d'entrée des boues est de 35 000 t/an au lieu des 30 000 t/an prévus, soit + 15 % de plus que prévu. Dans certains cas, des teneurs en matière sèche allant jusqu'à 93,5 % ont été atteintes en été. L'évaporation de l'eau est en moyenne de 27 200 t/an, si bien que seulement 7 800 t/an de boues d'épuration sèches sont utilisées comme combustible de substitution dans l'industrie du ciment.

Conçu à l'origine uniquement pour le traitement des boues secondaires, le système de séchage est désormais alimenté avec un mélange de boues primaires et secondaires en raison de ses avantages opérationnels et de ses performances stables.

Onze lignes de séchage indépendantes ont été installées (Fig. 2). Au fond du hall, un système d'évacuation automatique avec tapis et convoyeur incliné assure le transport des boues dans un silo, où elles sont stockées jusqu'à leur évacuation. Lors de la mise

en service du système, le client a pris des dispositions pour déplacer les machines de déshydratation du côté de l'entrée du hall afin de réduire les étapes de travail et donc les effets mécaniques sur la qualité des boues, pour permettre un fonctionnement 24h/24 et 7j/7 et ainsi augmenter la performance de séchage.

Avec le système d'entrée et de déchargement automatique, la charge de travail pour les inspections visuelles et les travaux de maintenance est de 0,5 heure par ligne et par jour. Les entraînements pour la technologie de retournement et de ventilation sont situés aux extrémités de la salle de séchage, de sorte que la maintenance de la technologie est très facile et possible sans avoir à traverser toute la salle.

En réduisant la masse à éliminer à seulement 22 % environ de la quantité de boues d'épuration déshydratées à l'origine, la circulation des véhicules et les émissions associées ainsi que les besoins en carburant ont été minimisés en conséquence. Une coopération avec une cimenterie locale permet également de réduire considérablement les coûts d'élimination, de sorte que les économies de coûts grâce au recyclage des boues sèches sont estimées à environ 25–30 %.

Apport de la technologie fournie

Grâce à la flexibilité du système, ce séchage solaire des boues d'épuration impose des exigences relativement faibles aux conditions spatiales dans les halls de séchage. La technologie de retournement automatique permet un fonctionnement en grande partie sans poussière et sans odeur avec des coûts d'exploitation et de maintenance minimales. Des performances de séchage jusqu'à 15 à 20 % plus élevées sont obtenues, et dans ce cas sans qu'il soit nécessaire de traiter l'eau évaporée ou l'air. □

8

INDUSTRIE DU PAPIER

ET DE LA PÂTE À PAPIER



Informations spécifiques aux pays

Inde

Avec une production annuelle d'environ 15 millions de tonnes et un chiffre d'affaires annuel de 9,62 milliards USD, l'industrie papetière indienne joue un rôle plutôt secondaire à l'échelle mondiale. Les quelque 800 sites de production du pays produisent principalement des matériaux d'emballage (51 % de la production), du papier d'impression et d'écriture (31 %) et du papier journal (18 %) (Figure 1). La consommation de papier par habitant dans le pays est faible en comparaison à l'échelle internationale – accompagnée par des niveaux de revenu en hausse, des taux d'alphabétisation plus élevés et une diffusion croissante des journaux, une forte augmentation est néanmoins attendue dans les prochaines années ^[163, 164, 165].

Le poste de coût le plus important dans la production de papier (environ 50 % des coûts de production) est la matière première nécessaire. Sur les 3,3 millions de km² de l'Inde, seuls 0,7 million de km² environ sont boisés, et compte tenu des restrictions de déforestation de plus en plus strictes, le bois est une matière première qui n'est disponible que

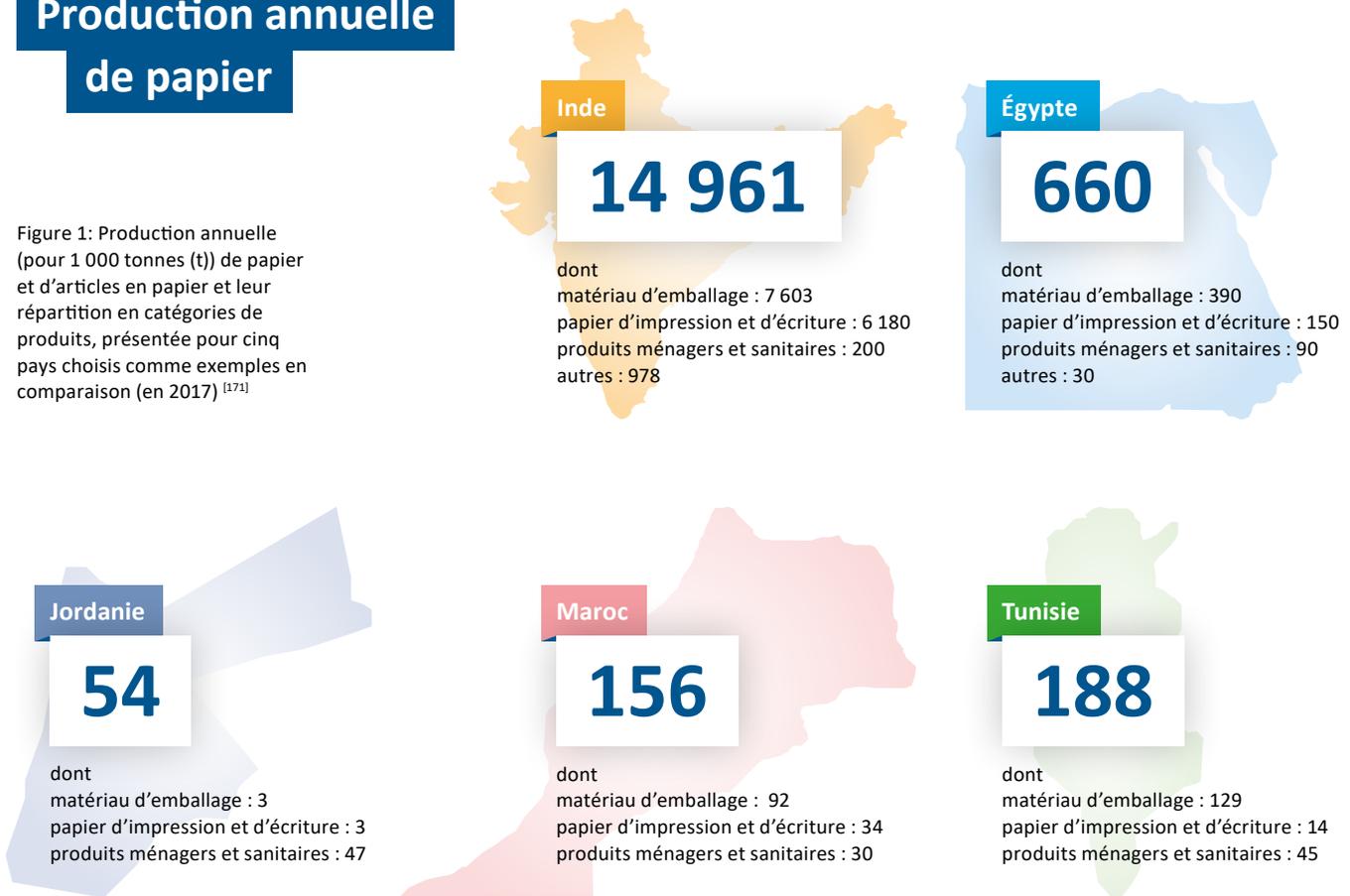
dans une mesure très limitée en Inde. Le manque de disponibilité de matières premières adaptées et bon marché et la concurrence des produits importés constituent par conséquent un défi majeur pour l'industrie papetière nationale. L'attention se porte donc de plus en plus sur des autres matières premières possibles : 30 à 40 % du papier sont encore aujourd'hui produits à partir de fibres de bois, 50 à 60 % à partir de vieux papiers recyclés et 15 à 25 % à partir de résidus agricoles ^[163, 166, 167].

L'industrie papetière indienne est dominée par des unités de petite taille et de taille moyenne, dont certaines requièrent une modernisation considérable afin de répondre aux normes actuelles de productivité, d'efficacité énergétique et de protection de l'environnement. Le Central Pollution Control Board de l'Inde a classé la production de papier comme un secteur industriel particulièrement polluant et a adopté un certain nombre de mesures visant à améliorer la protection des eaux industrielles depuis 2015. Par exemple, les papeteries doivent établir un plan de gestion environnementale et apporter la preuve d'un traitement approprié des eaux usées. Les réglementations ZLD pour l'élimination sans eaux usées s'appliquent en particulier à la liqueur noire ^[164, 165]. Cependant, il subsiste des incertitudes quant à la mise en œuvre technique et à la manipulation des concentrés résultants.



Production annuelle de papier

Figure 1: Production annuelle (pour 1 000 tonnes (t)) de papier et d'articles en papier et leur répartition en catégories de produits, présentée pour cinq pays choisis comme exemples en comparaison (en 2017) ^[171]



MOAN

La fabrication du papier est un marché de niche dans la région MOAN et presque tous les pays sont des importateurs nets de fibres et de produits en papier ^[168, 169, 170]. La principale raison en est la disponibilité limitée des matières premières : selon le pays et la région, le boisement est généralement inférieur à 5 %, si bien que les fibres de bois doivent être importées pour la production de papier. Certains pays se sont donc focalisés sur la transformation d'autres fibres, telles que la bagasse et la paille de riz en tant que ressource fibreuse très utilisée en Égypte. La matière première la plus importante pour la production de papier dans la région MOAN reste le vieux papier recyclé.

La plupart des produits en papier fabriqués sont utilisés à des fins d'emballage, comme le carton ou le papier d'emballage (Figure 1) ^[171]. Selon les pays, le reste de la production est constitué de papier

d'écriture et d'impression d'une part et de produits ménagers et sanitaires d'autre part. Cette règle souffre une exception : la Jordanie, où la fabrication de produits ménagers et sanitaires a constitué de loin la plus grande part de la production de papier ces dernières années.

L'industrie papetière régionale est généralement caractérisée par des sites de production vétustes et de faibles volumes de production. Tout particulièrement en Égypte, le secteur est clairement dominé par des entreprises publiques qui n'utilisent pas les capacités de production existantes. Pour promouvoir la filière, une amélioration du recyclage des vieux papiers serait nécessaire à moyen terme afin d'augmenter la disponibilité des matières premières sur site. Des perspectives découlent également de l'accent mis sur des activités à plus forte valeur ajoutée et des investissements dans les technologies de production modernes ^[170, 172].

Industrie et volume d'eaux usées

La pâte à papier est fabriquée à partir de matériaux contenant de la cellulose – généralement du bois ou d'autres matières premières végétales, telles que la bagasse, la paille ou les tiges de coton. Le traitement des vieux papiers comme matière première gagne également en importance dans l'industrie papetière. La production de pâte comprend le broyage mécanique et la décomposition chimique des substances accompagnant la cellulose, par exemple la lignine et l'hémicellulose. Dans 95 % de la production mondiale de pâte, la digestion est réalisée selon le procédé au Sulfatee par ébullition avec une solution alcaline de sulfure de sodium sous haute pression. La pâte est ensuite soumise à un lavage et, si nécessaire, à un blanchiment. Si des fibres de vieux papier sont utilisées, il n'y a pas de digestion chimique. Les vieux papiers sont désintégréés dans des tambours après élimination des composants non-papier, puis les fibres de vieux papiers sont

triées et fractionnées. Dans la production de papier graphique, les encres d'imprimerie doivent être éliminées par un procédé de flottation (« désencrage ») ou de lavage (lavage-« désencrage »). Dans les papeteries, la pâte est transformée en papier, carton mince et carton, si nécessaire avec adjonction de charges, de colle ou de pigments. Les bandes de papier sont produites par égouttage du papier dans des tamis de machines à papier, des presses et des séchoirs thermiques ^[173, 174].

L'eau est le solvant et le moyen de transport le plus important dans la production du papier et de la pâte à papier, et est également utilisée pour le refroidissement, le nettoyage et la production de vapeur. La technologie de pointe actuelle est la recirculation la plus étendue de l'eau de process – avec et sans système d'épuration d'eau en circuit interne – avant son élimination. La consommation d'eau effective de l'ensemble de la production de papier est de l'ordre de 0 à 100 m³ par tonne de papier et est fortement influencée par la qualité des matières premières, les exigences du produit et les conditions limites techniques (par exemple, corrosion, concentration et précipitation). En raison du recyclage fréquent, les

Processus	Intensité des eaux usées [m ³ /t]	DCO [kg/t]	Substances filtrables (AFS) [kg/t]	Phosphore [g/t]	Azote [g/t]	AOX [kg/t]
Production de pâte (procédé au Sulfatee)	20–90	5–30	0,2–5	10–40	50–500	50–200
Production de pâte (procédé au sulfite)	20–80	20–70	0,5–6	10–200	100–2 000	0–400
Production de pâte (mécaniquement)	10–20	1–15	0,1–1	2–10	40–200	0–5
Préparation du papier pour le recyclage	1–30	0,5–4	0,1–2	1–20	10–200	0,3–1
Fabrication du papier	3–20	0,2–2	0,02–1	0–10	0–100	n.a.
Fabrication de papiers spéciaux	10–50	0,5–7	0,1–2	0–60	0–500	n.a.

Tableau 1: Concentrations types d'impuretés dans les eaux usées de l'industrie du papier et de la pâte à papier ^[179], plus d'informations dans ^[22]

eaux usées de la production de papier sont polluées avec des charges de DCO >1 000–20 000 mg/l et des quantités élevées de substances filtrables (Tableau 1). Les eaux usées de la production de pâte en amont sont particulièrement problématiques, car elles transportent environ 50 % de résidus de la digestion de la pâte. Elles diffèrent donc fondamentalement en termes de quantité et de composition des eaux usées issues de la production de papier. La liqueur de cuisson issue de la digestion chimique est l'eau de traitement la plus polluée et est généralement évaporée et brûlée. De plus, des eaux usées contaminées sont produites lors du blanchiment et de la décoloration des fibres [175, 176, 177].

Débits et propriétés des eaux usées

Production de pâte

Liqueur et condensat de cuisson

L'eau de process résultant de la digestion chimique est connue sous le nom de liqueur de cuisson (dans le procédé au Sulfate largement répandu) ou d'acide de cuisson (dans le procédé au sulfite moins courant). Aujourd'hui, elle est généralement épaissie et incinérée dans des systèmes de récupération. Les condensats d'évaporation contiennent des composants végétaux solubles ainsi que des fines insolubles et des adjuvants chimiques utilisés. Les impuretés les plus problématiques sont les composés de lignine peu biodégradables, ainsi que d'autres composés organiques tels que des sucres, acides gras et acides résiniques [22, 174].

Eaux usées de blanchiment

Le blanchiment de la cellulose se fait traditionnellement par l'utilisation de chlore élémentaire ou de composés chlorés. Les produits d'oxydation qui en résultent, tels que les acides chlorés et les phénols, sont hautement toxiques et persistants, c'est pourquoi on évite le plus possible l'utilisation de chlore élémentaire aujourd'hui. Le problème principal des eaux usées de blanchiment – à savoir la toxicité et la faible biodégradabilité des composants – s'amé-

liore considérablement avec l'utilisation de procédés sans chlore élémentaire et totalement sans chlore. Conformément à l'état de la technique, le dioxyde de chlore, l'hydrosulfite, l'ozone et le peroxyde d'hydrogène sont aujourd'hui de préférence utilisés comme agents de blanchiment. Dans le processus de réduction avec l'hydrosulfite, aucune substance ne passe dans la solution, si bien que la solution est considérée comme exempte d'eaux usées. Le blanchiment par oxydation avec du peroxyde d'hydrogène, d'autre part, peut produire des produits d'oxydation solubles qui se retrouvent dans les eaux usées [173, 174].

Fabrication du papier

Les eaux usées de la fabrication du papier sont généralement peu concentrées et non toxiques. Le faible niveau de pollution est dû au fait que les matières premières utilisées sont insolubles dans l'eau et que seule une petite quantité d'adjuvants hydrosolubles est utilisée. Les impuretés les plus importantes sont les résidus de cellulose, de pâte de bois ou de vieux papiers qui ne sont pas retenus dans le tamis de la machine à papier, par exemple les substances qui peuvent être filtrées et la DCO (parfois difficilement dégradable). La matière organique des eaux usées se compose de 30 à 60 % de glucides, ainsi que de composés et produits de dégradation de la lignine. Le rapport DBO_5 : DCO dans les eaux usées non traitées des usines de papier est généralement de 0,3 à 0,6, et 0,5 est la valeur type. L'apparition d'adjuvants de production tensioactifs (par exemple, antimousse, désaérateurs de substances), qui peuvent influencer ou perturber le traitement des eaux usées, peut être problématique [22].

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Dans le traitement des eaux usées de l'industrie du papier et de la pâte à papier, l'objectif principal est d'éliminer les solides et les charges organiques. Le traitement type consiste en un prétraitement mécanique – principalement pour la séparation des

solides – et une étape biologique. Les procédés physico-chimiques sont utilisés lorsque les eaux usées contiennent des substances peu biodégradables, si une meilleure réduction de la DCO ou une rétention plus importante des solides doivent être garanties.

Épuration préliminaire

Si les flux d'eaux usées apparaissent à intervalles irréguliers, des réservoirs de compensation suffisamment dimensionnés sont raccordés en amont du traitement des eaux usées. L'épuration préliminaire mécanique est principalement utilisée pour séparer les solides, en particulier les fibres de cellulose, des flux d'eaux usées et de process. Les procédés suivants sont habituellement utilisés, souvent avec l'ajout de floculants :

- Sédimentation
- Flottation, habituellement flottation à détente de pression
- Filtration, habituellement sur des filtres à disque

Comme les substances en suspension sont des particules relativement petites et légères, une limite supérieure de 1 à 1,5 m³/m³/h est généralement fixée pour la charge de surface de la sédimentation. Il en résulte des temps de séjour longs et, en combinaison avec les températures élevées, le risque de décomposition anaérobie dans le bassin de sédimentation ^[22, 179]. Dans le cas de flux de matières individuels, par exemple les condensats de vapeur du procédé au sulfite, un traitement de flux partiel supplémentaire est nécessaire avant qu'ils ne soient introduits dans le traitement des eaux usées.

Épuration biologique

Les eaux usées des usines de papier et de la pâte à papier ont souvent une composition déséquilibrée en nutriments – les composés dégradables sont principalement des glucides, tandis que les concentrations d'azote (N) et de phosphore (P) sont faibles. Pour cette raison, il est souvent nécessaire d'ajouter des nutriments en conséquence, afin d'atteindre un rapport DBO₅ : N : P d'environ 100 : 5 : 1. En plus de l'insuffisance de nutriments, un problème majeur avec le traitement biologique peut être la dégradation microbiologique insuffisante de certains composants des eaux usées – la lignine, par exemple,

constitue environ 50 % des substances accompagnant la cellulose dans le bois et n'est métabolisée que très lentement par les micro-organismes.

Des procédés aérobies et anaérobies peuvent généralement être utilisés pour le traitement. Le procédé aérobie le plus fréquemment utilisé est le procédé à boues activées en une ou plusieurs étapes, qui est parfois conçu comme un bioréacteur à membrane pour une meilleure rétention des solides. Mais des systèmes de biofilms sont également utilisés, tels que des systèmes à lits bactériens ou biofiltres immergés ou. Les réacteurs anaérobies sont de plus en plus utilisés pour le traitement des eaux usées provenant de la production de papier sur la base de vieux papiers en raison des charges spécifiques de DCO élevées. L'épuration anaérobie est le plus souvent effectuée dans les réacteurs UASB (lit de boue anaérobie à flux ascendant) ou EGSB (lit de boue granulaire expansé) avec des charges de volume de DCO élevées ^[173, 180]. Le biogaz obtenu peut être utilisé pour produire de l'électricité.

Dispositions intégrées à la production

Aussi bien dans la production de la pâte à papier que dans la fabrication du papier, des dispositions internes s'offrent pour réduire considérablement la quantité d'eaux usées et d'émissions. Ces dispositions peuvent être considérées comme une condition préalable aux dispositions ultérieures visant à éliminer en grande partie la pollution résiduelle des eaux usées. Avec des dispositions intégrées à la production, la consommation d'eau dans la production de papier peut être considérablement réduite, par exemple de 100 m³ à <10 m³ par tonne de papier. En particulier dans les usines de traitement de vieux papiers avec des charges de DCO très élevées dans l'eau de process, les cycles de l'eau peuvent de cette manière être judicieusement réduits jusqu'à une exploitation sans eaux usées (ZLD). La concentration de polluants augmente certes nettement avec l'augmentation de la réutilisation de l'eau, mais la charge polluante globale peut être minimisée ^[22]. Dans la production de papier et de la pâte à papier, un grand nombre d'optimisations intégrées à la production sont considérées comme étant à la pointe de la technologie ^[22], et doivent toujours être testées avant de traiter toutes les eaux usées. □

9

DÉCHARGES



Informations spécifiques aux pays

Inde

La forte croissance démographique et l'urbanisation rapide ont posé des défis majeurs à l'industrie indienne de la gestion des déchets au cours des dernières décennies. 377 millions des 1,334 milliard d'habitants que compte le pays vivent en zone urbaine et génèrent chaque année 62 millions de t de déchets urbains ^[181]. La quantité de déchets augmente chaque année d'environ 5 %. Une quantité particulièrement importante de déchets urbains est générée dans les régions densément peuplées de l'Inde, telles que le Maharashtra, l'Uttar Pradesh, le Tamil Nadu et le Bengale occidental. On estime qu'environ 40 % des déchets sont constitués de matières biologiquement utilisables et 20 % de matériaux recyclables ^[182]. Les déchets organiques proviennent principalement des ménages, où également ici la consommation de produits emballés augmente et la proportion de déchets de plastique, papier, verre et métal s'accroît. Les quelque 5 millions de tonnes de déchets électroniques rejetés en Inde chaque année jouent également un rôle important, ainsi que les gravats de construction, qui, selon les estimations, représentent jusqu'à 30 % de la quantité totale de déchets générés ^[181, 182, 183].

L'organisation de la gestion des déchets en Inde est entre les mains des autorités locales. Les règles d'élimination et de traitement des déchets édictées par le ministère de l'Environnement et révisées pour la dernière fois en 2016 leur sont applicables. Cependant, de nombreuses communes ont des difficultés financières à maintenir un système de gestion des déchets fonctionnel. 90 % des coûts sont dévolus à la collecte et au transport des déchets, de sorte qu'il ne reste pratiquement plus de budget pour un traitement ou une mise en décharge convenable. Dans la pratique aujourd'hui, 70 % de tous les déchets communaux sont collectés et la plupart sont éliminés dans des décharges ou des décharges en tas (là encore plus de 70 %). 28 % des déchets collectés sont traités, tandis que l'incinération ou le compostage des déchets est peu répandu (Figure 1) ^[182, 184].

Les sociétés privées internationales de gestion des déchets telles que Veolia et SUEZ en Inde souhaitent également de plus en plus participer à l'exploitation de décharges et d'installations de recyclage ^[185, 186].

Les déchets sont le plus souvent déversés sur de simples décharges en tas, c'est-à-dire sans étanchéité, sans système d'évacuation d'air ou sans traitement des eaux usées. De grandes décharges en tas se trouvent à Chennai, Coimbatore et Surat, par exemple, les surfaces requises à cette fin augmentant très rapidement dans tout le pays (d'environ 1 240 hectares par an). Afin de limiter la quantité de déchets mis en décharge, les matériaux d'emballage recyclables et les déchets ménagers biologiquement utilisables doivent depuis 2016 être répertoriés et traités séparément. L'importation de déchets plastiques est en baisse en raison d'interdictions depuis 2017 afin de ne pas dépasser les capacités nationales de recyclage ^[187]. Pour des raisons environnementales et parce que de nombreuses décharges en tas existantes atteignent déjà leurs limites de capacité, la mise en place de décharges contrôlées gagne actuellement en importance. Depuis 2013, plus de 400 nouvelles décharges contrôlées ont été mises en place en Inde ^[182].

MOAN

La quantité de déchets générés dans la plupart des pays MOAN est d'environ 200–300 kg par habitant et par an, avec des différences significatives entre les régions métropolitaines densément peuplées (beaucoup de déchets) et les régions plus rurales (moins de déchets). La composition des déchets urbains présente également un tableau assez homogène : les déchets organiques de cuisine et agricoles représentent la part la plus importante (environ 50–70 %), suivis du plastique et du papier. En comparaison, la Tunisie et le Maroc produisent un peu plus de déchets biologiquement utilisables et moins de matériaux d'emballage que l'Égypte et la Jordanie. Selon le pays, d'autres flux de déchets industriels peuvent y être ajoutés. En Égypte, 6,5 millions de t de déchets industriels sont éliminés chaque année, en Tunisie 5,3 millions de t, dont la majeure partie consiste en phosphogypse. En Jordanie et dans d'autres pays de la région, l'élimination des pneus usagés (2,5 millions de t par an en Jordanie) joue également un rôle important ^[188, 189, 190, 191].

La gestion des déchets se voit attribuer des priorités politiques et financières différentes selon les pays de la région. Le Maroc peut être considéré comme un pionnier, où la mise en œuvre d'un certain nombre de programmes de protection de l'environnement et de gestion des déchets a fait augmenter la proportion de déchets collectés de 44 % à plus de 85 % depuis 2008. ^[189] En revanche, seulement 10 à 80 % des déchets sont collectés en Tunisie et seulement 30 à 65 % en Égypte, avec de fortes différences entre les régions rurales (taux faible) et les villes (pourcentage de déchets collectés plus élevé) ^[188, 190]. La majorité des déchets collectés sont mis en décharge, soit dans de simples tas d'ordures, soit dans des décharges organisées avec des mesures de protection de l'environnement appropriées (Figure 1). Le compostage ou le recyclage sont peu répandus en raison du manque de tri des déchets.

En Tunisie, l'élimination est effectuée par des entreprises privées qui déversent les déchets en accord avec les autorités environnementales responsables. 70 % des déchets collectés sont éliminés dans des décharges organisées d'une capacité annuelle d'environ 2 millions de t. ^[192] Les déchets jordaniens sont éliminés par des sociétés d'exploitation régionales dans environ 25 décharges du pays, dont la plupart sont de simples tas d'ordures. 50 % des déchets sont envoyés à la décharge contrôlée d'Algbawi dans l'agglomération d'Amman, qui est de loin la plus grande et la plus moderne du pays. ^[193] D'ici 2025, des mesures politiques devraient réduire drastiquement la quantité de déchets mis en décharge et, en particulier, la proportion de matériaux biologiquement recyclables ^[194]. Au Maroc en 2014, plus de 50 % des déchets collectés ont été rejetés dans de simples tas d'ordures. Cependant, on peut supposer que ce quota a depuis diminué grâce à la construction de plus de 60 décharges contrôlées, dont la plupart* sont exploitées dans le cadre de contrats BOT. La plus grande décharge du pays à Oum Azza est exploitée par Teodem, une filiale locale de la société française Pizzorno Environnement. Les grandes entreprises Veolia et SUEZ sont également actives au Maroc francophone et en Tunisie, en partie au travers de filiales. L'Égypte ne compte que quelques décharges contrôlées en activité et plus de 80 % des déchets collectés sont éliminés dans de simples tas d'ordures ^[188, 189, 190, 191].

Industrie et volume d'eaux usées

Avec le degré de l'industrialisation, le volume de déchets augmente lui aussi rapidement dans le monde – selon les estimations, un total de 7 à 10 milliards de tonnes de déchets ont été générés en 2015 ^[195]. Outre les déchets ménagers, cela comprend également les flux de déchets provenant de l'industrie, de l'agriculture et des hôpitaux. Selon les régions, les déchets ménagers sont constitués dans des proportions différentes, en particulier de matières biologiquement exploitables (déchets de cuisine et de jardin), de matériaux d'emballage (papier, verre, plastique), de déchets électroniques et de déchets encombrants. Les déchets industriels sont par exemple des déchets de production, des déchets de construction ou des déchets d'abattoirs. Aussi bien les déchets ménagers que les déchets industriels peuvent parfois contenir des matières nocives, tels que des matériaux contenant de l'amiante, du goudron ou du bitume, des produits chimiques biotoxiques ou des contaminants pathogènes.

Dans de nombreux pays industrialisés aujourd'hui, la récupération des matériaux recyclables (par exemple le papier, le verre, les plastiques, les métaux) et le compostage des déchets biologiquement utilisables est largement répandue. À l'échelle mondiale, la mise en décharge est toutefois comme auparavant de loin la voie d'élimination des déchets la plus importante. Une élimination inadéquate des déchets peut entraîner une pollution de l'environnement par des processus de décomposition biologiques et physico-chimiques incontrôlés – la formation de gaz de décharge (en particulier CO₂ et méthane) et la formation de lixiviat de décharge sont problématiques. Les impacts environnementaux peuvent être minimisés en créant des décharges contrôlées, dans lesquelles le contact entre les déchets et les milieux environnementaux est réduit autant que possible. En ce cas, par exemple, on prend soin de choisir un

* Construction-exploitation-transfert, c'est-à-dire transfert de propriété du système au client avant la fin de la période de concession

Production annuelle de déchets

Toutes les valeurs sont en %

- Part des déchets collectés
- dont éliminés dans de simples tas d'ordures
- dont éliminés dans des décharges contrôlées
- dont traités et recyclés
- dont compostés
- dont brûlés

↗ Augmentation annuelle de la production de déchets

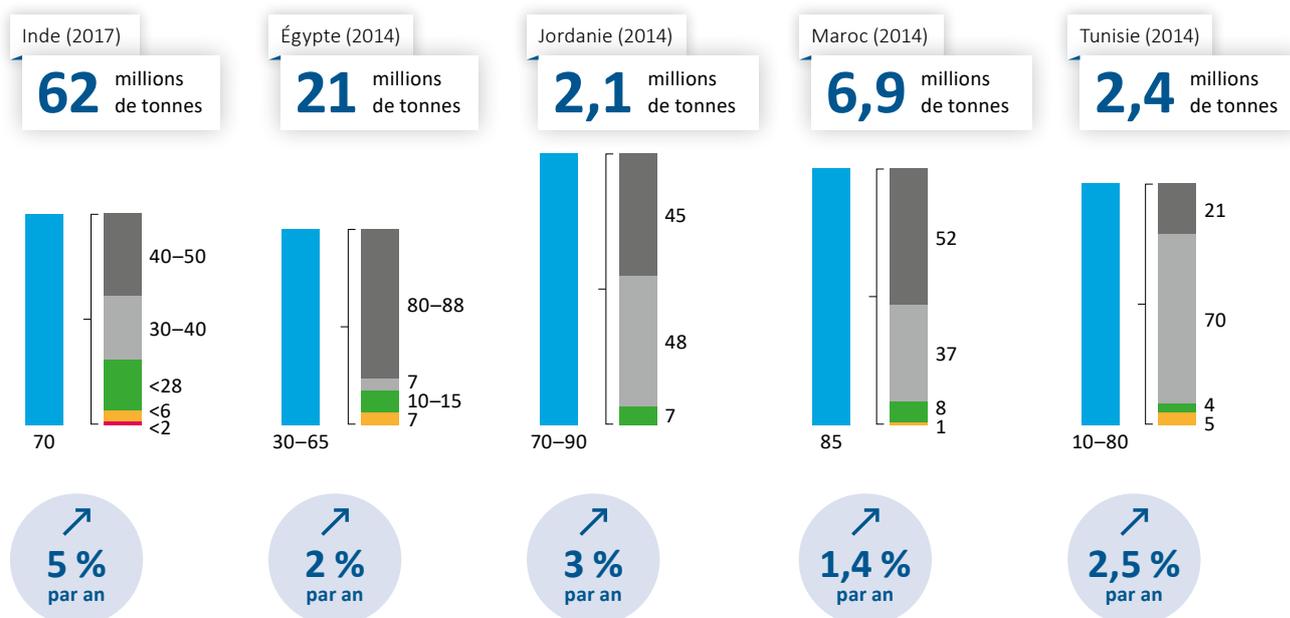


Figure 1: Production annuelle de déchets et voies types d'élimination des déchets collectés, présentées pour cinq pays choisis comme exemples en comparaison ^[181, 184, 188, 189, 190, 191]

site avec un sous-sol géologiquement imperméable et, en outre, d'éviter par des barrières artificielles les fuites d'eau d'infiltration. Des membranes ou des matières d'étanchéité sont utilisées pour sceller la décharge, et toute eau d'infiltration qui apparaît est collectée au fond de la décharge, évacuée et traitée ^[196].

Débits et propriétés des eaux usées

Eau d'infiltration de décharge

Les eaux usées nécessitant un traitement sont produites sur des décharges contrôlées sous forme

d'eaux d'infiltration de décharge. Il s'agit principalement d'eau de pluie qui pénètre dans la décharge, s'y infiltre et, lorsqu'elle entre en contact avec les déchets, s'accumule avec les impuretés. Néanmoins, de l'eau est également produite en tant que produit de réaction dans la décharge lorsque des matériaux contenant du carbone se décomposent en méthane, CO₂ et sous-produits organiques. L'eau d'infiltration elle-même peut alors entrer en réaction chimique avec des substances qui sinon ne seraient pas décomposées, par exemple des cendres et des matériaux contenant du ciment ou du gypse.

En plus des solides, l'eau d'infiltration des décharges contient normalement une gamme d'impuretés organiques et inorganiques dissoutes (Tableau 1). Les substances organiques présentes sont principalement des alcools, des acides, des

aldéhydes, des sucres et des substances humiques. À celles-ci s'ajoutent des composés inorganiques (par exemple, sulfates, chlorures, composés d'ammonium, de fer, d'aluminium, de zinc) et des métaux lourds (par exemple, plomb, nickel, cuivre, mercure). De plus, des substances biocides telles que des hydrocarbures aromatiques et halogénés, des phénols, des phtalates, des sulfonates aromatiques ou des phosphonates sont extraites de nombreux déchets ^[197, 198].

La composition spécifique de l'eau d'infiltration dépend non seulement du type de déchets déposés, mais aussi de l'âge de la décharge. Les processus de décomposition dans la décharge passent par plusieurs phases dans le temps s'écoulant depuis le début de la décharge jusqu'à la stabilisation, qui sont résumées comme suit ^[196, 199]:

- Oxydation : Phase courte immédiatement après le dépôt, dans laquelle la matière organique est décomposée avec l'oxygène disponible, s'accompagnant de formation de CO₂ et d'une légère élévation de la température de la décharge.
- Fermentation acide : Lorsque les réserves d'oxygène sont épuisées, la fermentation anaérobie commence avec la formation d'acide et une nouvelle élévation de la température de la décharge.
- Fermentation méthanique : Formation de méthane à partir d'acides organiques, ce qui conduit à une remontée du pH, jusqu'à la stabilisation de la décharge.

Paramètre	Concentration	Unité
pH	4,5–9	-
Conductivité	2 500–35 000	µS/cm
Matières solides	2 000–60 000	mg/l
DBO ₅	20–57 000	mg/l
DCO	140–152 000	mg/l
Azote total	14–2 500	mg/l
Azote ammoniacal	50–2 200	mg/l
Phosphore	0,1–23	mg/l
Chlorure	150–4 500	mg/l

Tableau 1: Concentrations types d'eau d'infiltration de décharge ^[200]

Eau d'infiltration de la fermentation acide

La fermentation acide dure plusieurs mois et se caractérise par des processus de fermentation en l'absence d'oxygène. Il se forme surtout des acides gras volatils, qui peuvent représenter jusqu'à 95 % de la matière organique dissoute. En comparaison, l'eau d'infiltration ne contient que de faibles quantités de composés de poids moléculaire élevé. Dans cette phase, les eaux usées ont une charge organique très élevée, c'est-à-dire des valeurs DBO₅ et DCO élevées, qui sont habituellement dans le rapport DBO₅ : DCO >0,5. La formation d'acide abaisse le pH de l'eau d'infiltration à 5,5–6,1. Dans ces conditions chimiques, les ions métalliques passent également de plus en plus en solution et peuvent contaminer additionally les eaux usées ^[198, 201].

Eau d'infiltration de la fermentation méthanique

Après un an maximum, la fermentation méthanique anaérobie commence, et peut durer plus de 20 ans. Cette phase est caractérisée par une activité accrue des bactéries méthanogènes, qui forment du méthane et du CO₂ à partir des acides organiques. La dégradation des acides élève le pH de l'eau d'infiltration à 8,0–8,5 et la concentration de métaux dissous dans l'eau diminue en conséquence. L'eau d'infiltration est moins polluée par des composants organiques facilement dégradables, tels que des alcools, des acides volatils ou des amines. Dans le même temps, la proportion de fractions de haut poids moléculaire et peu dégradables, comme les acides humiques ou fulviques, augmente. Ceci est également exprimé dans les ratios types DBO₅ : DCO <0,1, ce qui rend le traitement biologique des eaux usées plus difficile ^[199, 201].

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Le concept d'un traitement systématique des eaux usées dans la gestion des déchets est encore jeune par rapport à d'autres branches de l'industrie et en

est encore à ses balbutiements dans de nombreuses régions du monde. Un défi réside dans la composition hétérogène, variable et souvent inconnue des eaux d'infiltration qui sont produites, selon le type de déchets déposés et les processus de décomposition en cours. Comme les décharges doivent être gérées pendant au moins 30 à 50 ans, le fonctionnement fiable et robuste du traitement des eaux usées doit également être garanti sur des périodes de temps relativement longues. Avant que les eaux usées ne soient déversées dans le réseau d'égouts public ou dans les eaux de surface avoisinantes, les tâches de séparation suivantes doivent être effectuées au moins en partie :

- Rétention des solides
- Neutralisation si nécessaire
- Élimination des sels dissous, des nutriments et des métaux
- Séparation des substances biocides, en partie dans la plage de faibles concentrations

L'eau d'infiltration de décharge provenant de la fermentation acide est normalement facilement biodégradable en raison de son rapport DBO_5 : DCO élevé. Elle peut donc être largement épurée dans les procédés classiques à boues activées ou à lit fixe. Pendant la fermentation du méthane, la biodégradabilité de l'eau d'infiltration diminue considérablement. En outre, les eaux usées peuvent contenir des substances persistantes ou toxiques qui sont extraites directement des déchets mis en décharge. Dans les deux cas, une épuration biologique n'est pas suffisante et des procédés physico-chimiques doivent être utilisés (en complément). Les approches les plus courantes sont les suivantes ^[197, 201]:

- Précipitation
- Coagulation et floculation
- Adsorption
- Procédé d'oxydation
- Filtration sur membrane
- Autres procédés en combinaison

Afin de tenir compte de la composition parfois complexe de l'eau et de garantir un système multi-barrières fiable, les procédés de traitement physico-chimique connus sont souvent combinés pour le traitement des eaux d'infiltration.

Les procédés d'adsorption sur charbon actif, par exemple, sont robustes en fonctionnement et l'expérience a montré qu'ils peuvent être bien couplés avec des procédés d'épuration biologique. Ainsi, par exemple, du charbon actif en poudre peut être ajouté directement dans le traitement biologique, les eaux en sortie du traitement biologique peut être purifié à l'aide de charbon granulé, ou du charbon granulé peut lui-même être utilisé comme matériau de support pour une épuration biologique ^[202, 203].

Les procédés sur membrane sont également bien adaptés comme étape de post-traitement après une épuration biologique. Classiquement on utilise des membranes d'ultrafiltration dans les bioréacteurs à membrane (MBR) pour la rétention des solides. Les eaux en sortie du traitement biologique ou du MBR peut également être purifié davantage, par exemple au moyen d'osmose inverse, si des substances persistantes doivent être éliminées ^[204, 205]. Cependant, il convient de souligner que le flux de concentré est traité et non renvoyé directement dans la structure de la décharge. La combinaison des procédés de coagulation et de nanofiltration peut également être intéressante pour obtenir une haute qualité en sortie et en même temps réduire les problèmes d'encrassement dans l'étage membranaire ^[206, 207].

En plus de l'ozonation classique des eaux usées, des procédés d'oxydation plus poussés et leurs combinaisons gagnent également du terrain dans certaines applications. La biodégradabilité des constituants des eaux usées, souvent améliorée par l'oxydation, peut être exploitée en raccordant en amont des procédés d'oxydation à une étape d'épuration biologique. Souvent, une approche inverse peut cependant être également observée, à savoir le post-traitement des eaux usées traitées biologiquement, par exemple au moyen de procédés d'ozonation ou de Fenton pour décomposer les substances persistantes ^[208, 209]. En particulier à des pH bas, le couplage de processus de coagulation et d'oxydation (souvent Fenton) peut réaliser de bonnes synergies en ce qui concerne la puissance d'épuration ^[210, 211]. □

ÉTUDE DE CAS : Décharge au Maroc

Traitement biologique des eaux d'infiltration – centre de traitement des déchets Oum Azza

Contexte

TEODEM, une filiale du Groupe Pizzorno Environnement, exploite le plus grand centre de traitement des déchets d'Afrique du Nord à Oum Azza, au Maroc. L'installation collecte environ 850 000 t de déchets par an auprès de treize communes de la région de Rabat-Salé-Skhirat.

Défi particulier/Exposé du problème

Avec l'introduction d'un concept moderne de gestion des déchets, des mesures importantes ont été prises pour protéger les personnes et l'environnement dans cette région. Les déchets sont répertoriés et spécifiquement orientés vers la valorisation de matières et d'énergie. Le traitement de l'eau d'infiltration de la décharge est particulièrement important, car elle est produite lorsque les déchets sont stockés, principalement par l'infiltration d'eau de pluie et par

l'humidité propre des déchets. Si l'eau d'infiltration aboutit sans être traitée dans les cours d'eau, elle représente une menace pour l'environnement.

À Oum Azza, sont produits chaque jour environ 280 à 300 m³ d'eau d'infiltration, qui doivent être épurés de manière fiable. La station de traitement des eaux d'infiltration d'Oum Azza se compose d'une grille de retenue, d'un bassin aéré, d'un bassin de décantation anoxique et d'un système d'osmose inverse en aval.

Proposition de solution

Le traitement biologique de l'eau d'infiltration peut représenter une élimination technologique efficace et robuste, si le fonctionnement fiable de l'installation est assuré par une surveillance continue de la qualité de l'eau à l'entrée et à la sortie. Des aérateurs de surface (trois aérateurs de 75,0 kW chacun) étaient à



Figure 1 : Passage à des aérateurs OxyStar dans la station de traitement des eaux d'infiltration d'Oum Azza, Maroc

l'origine utilisés pour ventiler le bassin d'Oum Azza, qui n'ont pas fait leurs preuves en raison de leurs performances d'aération et de mélange insuffisantes, de leur coût élevé de maintenance et de leur grande consommation d'énergie. Avec ce système de ventilation, une réduction d'environ 40 % de la charge quotidienne de DBO_5 d'environ 3 000 kg de DBO_5 a été obtenue. En raison de la forte formation d'aérosols des aérateurs de surface, il y a eu de plus une forte nuisance olfactive. Ces problèmes de fonctionnement ont incité l'exploitant à remplacer le système de ventilation existant par des aérateurs FUCHS OxyStar. Quatre aérateurs flottants OxyStar d'une puissance nominale de 22,0 kW chacun ont été installés (Fig. 1).

Résultats

Les quatre aérateurs d'une puissance totale de seulement 88,0 kW sont suffisants pour apporter tout l'oxygène nécessaire sans formation d'aérosols et pour homogénéiser efficacement le volume du bassin. Les aérateurs ont été installés sur des flotteurs robustes afin de s'adapter aux fluctuations du niveau de l'eau (Figure. 2). Peu après la mise en service, l'exploitant de la station a confirmé une réduction d'environ 70 % de la charge de DBO_5 . La consommation électrique a pu être considérablement réduite (Tab. 1).

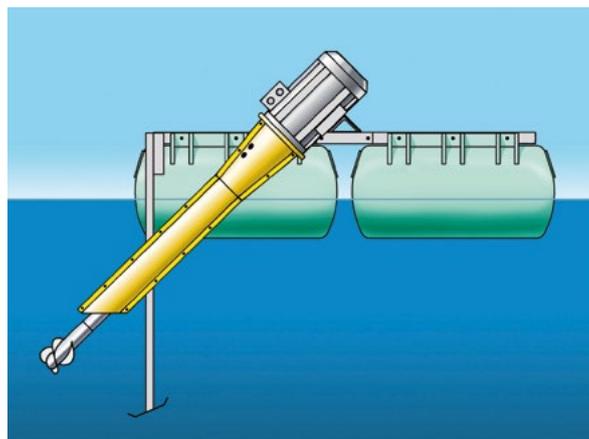


Figure 2 : Représentation schématique de l'aérateur OxyStar

Apport de la technologie fournie

Par rapport à la solution précédente, le dispositif d'aération fourni permet un brassage très économe en énergie du bassin de traitement, ce qui améliore la puissance d'épuration (Tab. 2). Grâce au principe fonctionnel de l'aérateur à amorçage automatique, il n'y a pas non plus de formation d'aérosols. Le réaménagement a pu être effectué sans interruption de service, et il n'a pas été nécessaire de vider le bassin. □

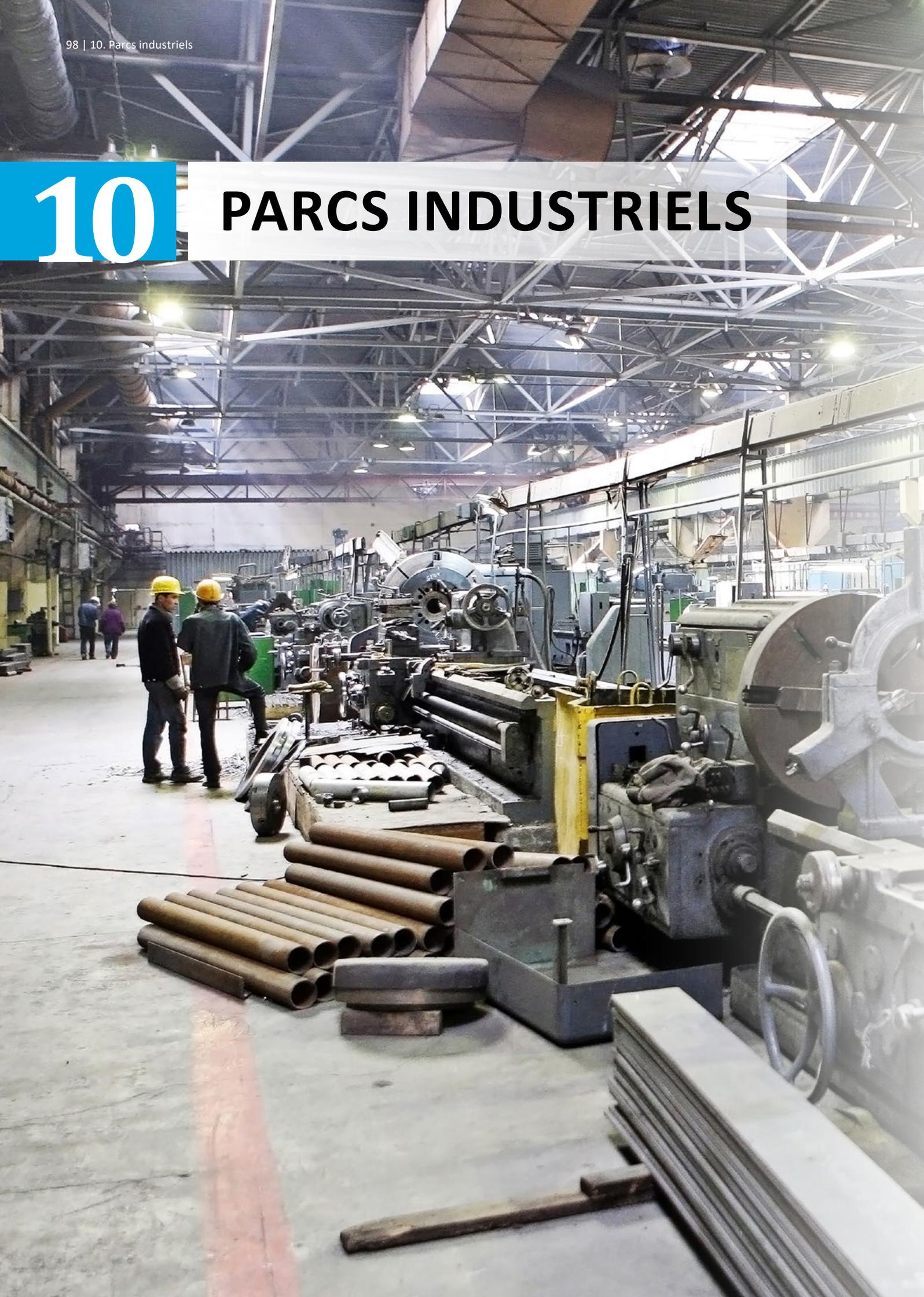


Structure de l'installation	- Grille de retenue - Bassin aéré - Bassin de décantation - Osmose inverse
Entrée d'eaux usées	280–300 m ³ /jour
Charge polluante DBO_5	3 000 kg/jour
Volume du bassin aéré de volume	environ 7 000 m ³
Charge volumique résultante	430 g $\text{DBO}_5/\text{m}^3/\text{jour}$
Dispositif de ventilation installé	4 aérateurs OxyStar sur flotteurs
Puissance nominale	22,0 kW chacun
Puissance totale installée	88,0 kW
Puissance volumique	environ 12,5 W/m ³
Niveau de dégradation de la DBO_5	environ 70 %
Économie d'énergie par rapport au concept précédent	environ 60 %

Tableau 1 : Synthèse du traitement des eaux d'infiltration à Oum Azza, Maroc

10

PARCS INDUSTRIELS



Informations spécifiques aux pays

Inde

En Inde, des parcs industriels sont de plus en plus implantés et achevés depuis les années 2000 afin de satisfaire aux capacités de production croissantes du pays. Cela s'explique notamment par une forte proportion de petites et moyennes entreprises dans les secteurs de la chimie, du textile, de l'automobile, de l'informatique et de l'électronique. Le nombre et la répartition de tous les parcs industriels ne sont pas répertoriés de manière centralisée au niveau national, mais selon les estimations actuelles, la plupart des parcs sont exploités dans les États du Maharashtra, du Karnataka, du Rajasthan et du Gujarat (Figure 1) ^[212]

On estime qu'environ 10 à 15 % des parcs industriels indiens disposent d'une station commune de traitement des eaux usées, dénommée normalement Common Effluent Treatment Plant (CETP) (Station commune de traitement des effluents) ^[213]. Dans les centres des industries de la tannerie, du textile, de la chimie et de la galvanoplastie, la couverture avec de tels systèmes est la plus élevée en comparaison. Les capacités types des installations vont de moins de 1 000 m³/jour à 30 000 m³/jour ^[3]. L'implantation et l'extension croissantes de parcs industriels dans les années à venir augmenteront également le nombre de stations de traitement des eaux usées industrielles.

Il s'agit d'un marché traditionnellement réservé aux entreprises indiennes et qui s'ouvre désormais aux fournisseurs de technologies internationaux. Le gouvernement indien fournit jusqu'à 50 % et le gouvernement respectif de l'État jusqu'à 25 % supplémentaires des fonds d'investissement pour ces installations. Le plan de financement du gouvernement était initialement conçu pour 5 ans et s'est achevé en 2018. Cependant, il existe de nouveaux plans pour maintenir le financement. L'autorisation des organismes de réglementation régionaux respectifs est requise pour l'établissement et l'exploitation de stations d'épuration communes. Un bon aperçu de l'utilisation des CETP, du contexte juridique et des technologies utilisées se trouve dans le rapport de l'Indo-German Environment Partnership (Partenariat

indo-allemand pour l'environnement) ^[214]. En outre, la mise en œuvre de réglementations pertinentes en matière d'environnement doit être poursuivie plus étroitement par l'introduction de tribunaux spéciaux (Green Tribunal Courts) ^[215]. En raison de changements dans la législation et la responsabilité indiennes, les exigences en matière de protection industrielle de l'environnement qui sont imposées aux stations d'épuration industrielles sont devenues plus strictes. Les contrats de maintenance des sites sont en outre passés d'un an après la mise en service à 15 ans, ce qui entraîne un intérêt accru, notamment pour les technologies pérennes.

MOAN

Dans tous les pays de la région MOAN, l'implantation et l'extension de parcs industriels sont actuellement spécifiquement encouragées afin d'accroître la compétitivité économique nationale, de créer des emplois et d'améliorer l'efficacité de la production et de la protection de l'environnement. Ceci est mis en œuvre à travers des programmes politiques ciblés – tels que le « Plan d'accélération industrielle » au Maroc – qui prévoient une planification nationale et un soutien financier pour la création de parcs industriels. En Égypte, par exemple, 13 nouveaux parcs industriels sont en construction et au Maroc, trois autres parcs industriels ont fait l'objet d'un appel d'offres pour la planification et la réalisation début 2020. La plupart des projets sont aujourd'hui attribués dans le cadre de contrats de « partenariat public-privé » ^[216].

En Égypte et au Maroc, de plus en plus de « parcs éco-industriels » sont en projet. Par l'utilisation ciblée de synergies, ils devraient offrir une valeur ajoutée non seulement économique mais aussi écologique. Dans ces parcs, l'approvisionnement en énergie et en eau ainsi que l'évacuation des déchets et des eaux usées sont organisés de manière centralisée et ainsi optimisés. Les parcs industriels existants sont également modernisés avec l'infrastructure appropriée afin de répondre à des exigences plus strictes en matière de protection de l'environnement ^[217, 218]. En Tunisie, la nécessité de moderniser les systèmes de traitement des eaux usées semble être particulièrement urgente – en 2014, seulement environ 25 % des parcs industriels y étaient raccordés à un système d'égout ^[219].

Infrastructures et gestion des eaux usées

Les parcs industriels sont des sites industriels délimités sur lesquels interviennent plusieurs entreprises manufacturières indépendantes. Alors que le concept est utilisé dans l'industrie chimique depuis de nombreuses décennies, les entreprises de diverses branches de l'industrie sont aujourd'hui souvent organisées en parcs industriels. L'avantage des parcs industriels réside dans le fait que les entreprises qui s'y trouvent peuvent être reliées par des chaînes de valeur communes et peuvent accéder à une infrastructure de site commune. Ceci est le plus souvent fourni par une société d'exploitation qui est souvent également propriétaire du parc industriel. Les services de la société d'exploitation comprennent normalement les éléments suivants :

- Mobilité et infrastructures
- Liaison routière et ferroviaire et/ou port de commerce, ainsi que la mobilité sur le site
- Énergie et milieux
- L'énergie primaire (par exemple le gaz naturel), mais aussi d'autres milieux tels que les gaz techniques, l'eau de différents niveaux de qualité, la vapeur ou les fluides frigorigènes
- Élimination des déchets
- Élimination appropriée des déchets industriels et des déchets industriels toxiques, ainsi que l'élimination et le traitement des eaux usées
- Gestion des installations centrales
- Technologies de l'information et des télécommunications, ainsi que, selon la taille du parc industriel, les pompiers de l'usine et la sécurité de l'usine
- Logistique
- Gestion des transports de marchandises dangereuses, entreposage des matières premières, consommables et fournitures, produits finis, etc.

Le traitement centralisé des eaux usées de toutes les eaux usées collectées dans le parc industriel dans une station d'épuration communale peut augmenter l'efficacité de l'épuration et réduire nettement les coûts d'investissement et d'exploitation pour les

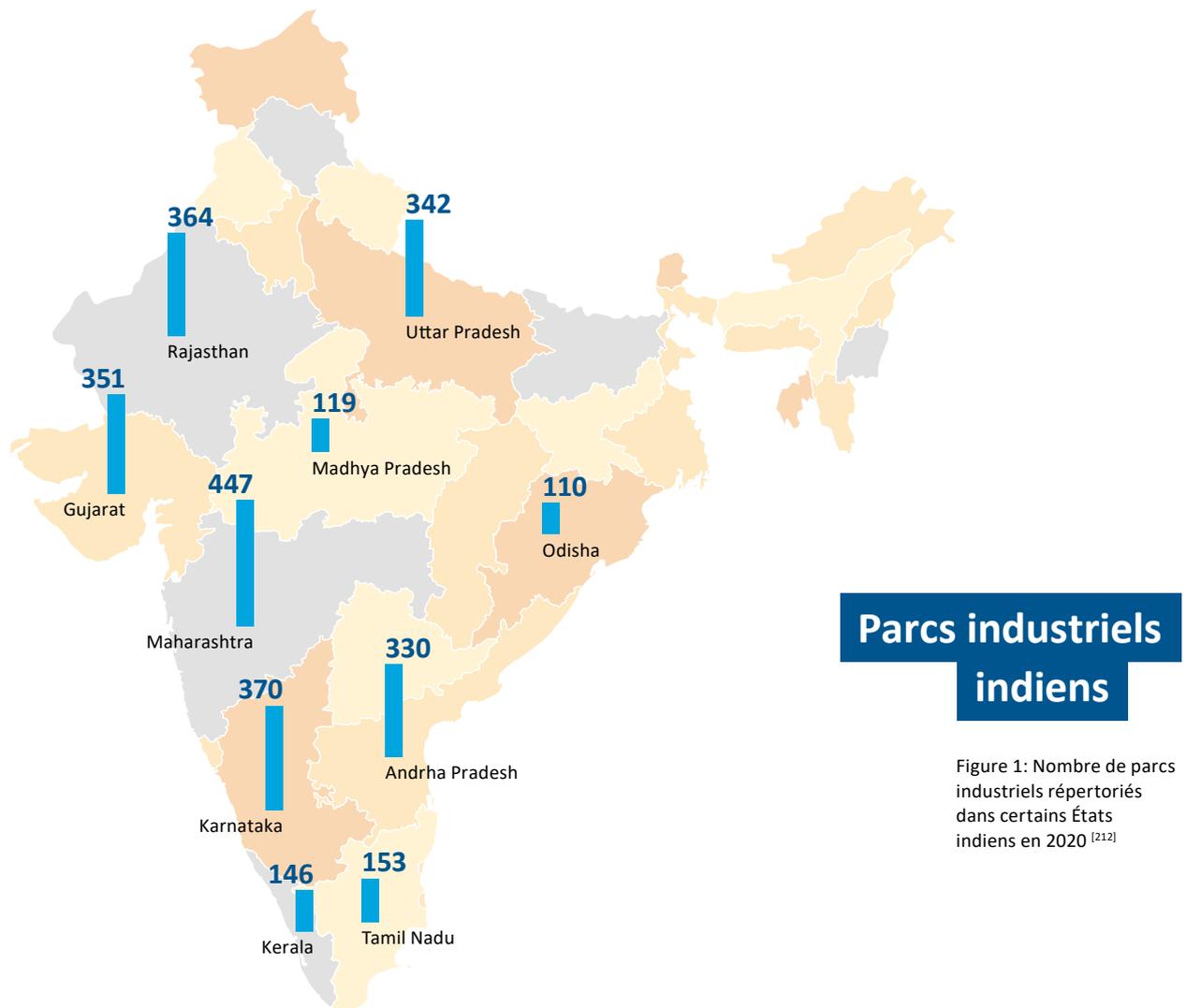
entreprises individuelles. Dans le même temps, dans des conditions favorables, il existe des possibilités de réutiliser ou d'utiliser ultérieurement l'eau ou de recycler et d'utiliser des ressources (par exemple nutriments, matières de valeur) sur le site. Pour les organismes de réglementation compétents, le rejet centralisé des eaux usées industrielles augmente la transparence et simplifie la mise en œuvre des contrôles de qualité.

Défi particulier

Flux d'eaux usées hétérogènes

Les flux d'eaux usées produites dans les entreprises individuelles respectives peuvent différer considérablement, et la complexité de la composition des eaux usées augmente avec l'hétérogénéité des branches d'activité implantées et des utilisations. Alors que certaines industries génèrent principalement des eaux usées polluées avec des substances organiques, dans d'autres cas, la pollution inorganique est au premier plan. La biodégradabilité ou la tolérance à l'égard de la charge en substances toxiques introduite est particulièrement importante afin de ne pas mettre en danger le fonctionnement d'une étape centrale d'épuration biologique. Les eaux usées ayant une action potentiellement toxique sur le système biologique doivent être retenues et prétraitées de manière décentralisée.

Afin de garantir un fonctionnement durablement stable de la station d'épuration, les débits d'eaux usées introduits doivent répondre à certaines conditions, pour la plupart convenues contractuellement. Les eaux usées de chaque déchargeur individuel doivent donc être surveillées en temps réel avant qu'elles ne se mélangent dans le réseau central d'eaux usées. En plus du débit, les valeurs mesurées à enregistrer comprennent le plus souvent également des paramètres de qualité tels que le, la DCO, le DOC (carbone organique dissous) ou la conductivité et d'autres paramètres spécifiques (par exemple, métaux lourds, composés organochlorés, phénols, autres substances toxiques). S'il y a des écarts à court terme par rapport à la qualité admissible des eaux usées, le rejet des eaux usées peut être arrêté



Parcs industriels indiens

Figure 1: Nombre de parcs industriels répertoriés dans certains États indiens en 2020 ^[212]

à temps et les eaux usées problématiques peuvent être stockées temporairement dans des réservoirs de compensation afin de pouvoir être traitées séparément. Ainsi, par exemple, l'étage central d'épuration biologique peut être protégé contre les chocs toxiques.

Traitement conjoint ou séparé

En principe, il faut préférer un traitement séparé des flux d'eaux usées, car les impuretés individuelles peuvent être traitées de manière ciblée et on évite un mélange et une dilution. Dans la pratique, différents flux d'eaux usées sont cependant partiellement mélangés afin, entre autres, d'envoyer au traitement biologique des eaux usées peu dégradables, sans autre prétraitement, par le mélange avec des charges

facilement disponibles organiquement. Des eaux usées à propriétés opposées peuvent également se compenser mutuellement lorsqu'elles sont mélangées, par exemple en cas de pH différents ou de température différentes.

En revanche, il est judicieux de détourner et éventuellement traiter séparément des flux d'eaux usées peu polluées. Ceci s'applique entre autres à des eaux très faiblement polluées comme les eaux de pluie ou les eaux de refroidissement, qui peuvent normalement être détournées ou utilisées sans traitement complexe. Les eaux usées sanitaires du parc industriel doivent toujours être collectées et traitées séparément des eaux usées industrielles. Le rejet des eaux usées communales dans les stations d'épuration des parcs industriels peut également être indiqué si

la zone est suffisamment proche. Si les flux d'eau individuels sont excessivement chargés, il est considéré comme l'état de l'art de les prétraiter séparément avant le mélange. Le traitement, qui est de toute façon nécessaire, peut être considérablement réduit en capacité par rapport à une exécution centrale et en même temps s'effectue avec une plus grande efficacité. Tel est notamment le cas dans les situations suivantes ^[221]:

- Les eaux usées contiennent des impuretés qui ont un impact négatif sur le traitement ultérieur, par exemple des substances qui ont un effet toxique ou inhibiteur dans le traitement biologique
- Les eaux usées contiennent des substances difficiles à éliminer lors du traitement ultérieur, par exemple des composants non biodégradables ou des métaux lourds
- La qualité des eaux usées est si élevée qu'elles peuvent être réutilisées par un traitement peu coûteux, par exemple à des fins de refroidissement, pour l'arrosage des espaces verts ou comme eau d'extinction
- Les eaux usées contiennent des composants qui doivent être spécifiquement récupérés afin de les réutiliser, par exemple des nutriments, des substances de valeur ou une charge élevée de substances facilement dégradables, pour produire du biogaz.
- Pour le rejet dans une station d'épuration industrielle centrale, des paramètres de rejet appropriés doivent être définis et surveillés. Le traitement conjoint de flux d'eaux usées difficiles à traiter – par exemple les eaux usées de l'industrie chimique avec les eaux usées de l'industrie papetière – n'a pas de sens sans un prétraitement approprié.

Procédé de traitement

Choix et étapes du procédé

Dans la plupart des cas, la station d'épuration centrale d'un parc industriel prévoit de grands réservoirs de compensation afin d'amortir les fluctuations de concentration et de quantité dans le flux entrant dans le système. Avant que les eaux usées industrielles ne soient déversées dans la station d'épuration, les paramètres pertinents doivent être contrôlés régulièrement. Il s'agit, par exemple, des éléments suivants ^[22] :

- Paramètres généraux, par exemple la température, le pH et les solides
- Substances inorganiques, telles que l'azote, le phosphore et le Sulfate
- Métaux, tels que le plomb, le cadmium, le chrome, le nickel, le cuivre et le mercure
- Paramètres des matières organiques, par exemple substances lipophiles non volatiles ou indice d'hydrocarbures
- AOX, comme mesure des composés organiques halogénés
- Toxicité effective, par exemple pour les œufs de poissons

La station d'épuration industrielle communautaire prévoit un processus de traitement composé d'au moins une étape biologique, mais le plus souvent de plusieurs étapes ^[22] :

- Prétraitement mécanique des eaux usées
- Séparation de solides et d'huiles non miscibles par séparation de phases, par exemple sous forme de

Destination prévue	Matières solides	Substances dissoutes	Turbidité	pH	DBO ₅	Chlore
Irrigation	5–35 mg/l	500–1 000 mg/l		6–9	5–45 mg/l	0,5–5 mg/l
Services de voirie		1 500 mg/l	30 NTU	6–9	15	0,2 mg/l
Eau de refroidissement	30 mg/l				30 mg/l	1 mg/l
Chasse d'eau		1 500 mg/l	30 NTU	6–9	10	0,2 mg/l
Eau d'alimentation de chaudière	10–500 mg/l	1 000 mg/l				

Tableau 1 : Valeurs guides des qualités d'eau requises pour certaines fins de réutilisation ^[222, 223]

- filtration grossière, sédimentation ou flottation
- Épuration chimique
- Élimination de substances dissoutes, par exemple de sels ou de métaux, par des procédés de précipitation et de floculation, éventuellement accompagnés d'une neutralisation des eaux usées
- Épuration biologique
- Décomposition des nutriments et des contaminants organiques par des processus biologiques anaérobies et/ou aérobies
- Traitement plus poussé
- Élimination des impuretés dissoutes difficiles à éliminer, à l'aide de procédés avancés, tels que l'oxydation, l'adsorption, l'échange d'ions ou la filtration sur membrane

Le choix concret des procédés de traitement plus poussé dépend beaucoup des opérations initiales et de la qualité des eaux usées qui en résulte. La qualité souhaitée en sortie du traitement est en outre importante – en fonction des conditions de rejet dans les eaux de surface ou de l'utilisation ultérieure prévue des eaux usées traitées.

Réutilisation et utilisation ultérieure

La base pour la réutilisation ou l'utilisation ultérieure efficace des eaux usées traitées est la collecte ciblée et le traitement séparé des différents flux d'eau ainsi que la connaissance de leur composition. Cela peut nécessiter un réseau de distribution d'eau et d'eaux usées convenablement conçu sur le terrain du parc industriel, ce qui est beaucoup plus facile à mettre en œuvre dans de nouvelles implantations que dans la conversion ou l'extension de parcs existants. Le traitement ciblé de flux séparés concerne non seulement l'origine des eaux usées, mais également l'utilisation prévue de l'eau traitée.

Les eaux usées traitées sont souvent utilisées pour des applications d'infrastructure telles que l'irrigation, le nettoyage des rues ou la chasse d'eau des toilettes. Les options liées à la production sont l'utilisation comme eau de refroidissement ou d'alimentation de chaudière ou comme eau de process. L'utilisation prévue de l'eau et les exigences de qualité qui l'accompagnent ont une incidence directe sur le schéma de traitement nécessaire (Tableau 1). Les eaux usées qui contiennent des rejets

d'établissements de santé ainsi que des eaux usées industrielles à forte charge en substances nocives (par exemple provenant de la galvanoplastie ou du traitement des textiles) ne peuvent pas être réutilisées sans traitement ciblé.

Les exigences de qualité spécifiques au site doivent être basées sur une approche préventive basée sur les risques qui analyse les dangers possibles dans le projet de réutilisation de l'eau prévu et identifie des mesures efficaces, de la source à l'exposition. Il est important de réaliser une évaluation des risques en tenant compte de toutes les voies d'exposition pertinentes, en plus des polluants provenant des eaux usées, afin d'identifier quels groupes de personnes et quels biens (sols, eaux souterraines, plantes) sont susceptibles d'entrer en contact avec les eaux traitées.

Une approche systématique peut s'orienter sur la stratégie des Plans de Sécurité de l'Eau ou des Plans de Sécurité Sanitaire de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). En utilisant cette méthodologie, il est possible d'analyser les dangers potentiels dans le système, d'évaluer ses risques, d'identifier des mesures pour leur maîtrise et de déduire des critères de surveillance, afin aussi de vérifier ainsi régulièrement le succès des mesures de minimisation des risques. Pour une réduction efficace et fiable des risques, plusieurs barrières sont nécessaires à différents points de départ du système global, y compris le bassin versant, le traitement de l'eau, le stockage et la distribution de l'eau et la mise en pratique. Une évaluation individuelle régionale du côté des émissions et des immissions doit donc être effectuée à de nombreux endroits. Les eaux usées traitées ne peuvent être réutilisées que lorsqu'il est garanti qu'aucun dommage pour l'homme, les animaux et l'environnement n'est à craindre.

S'il n'y a pas de réglementation nationale/régionale pour la réutilisation de l'eau, les normes internationales de l'Organisation internationale de normalisation (ISO) peuvent servir de guide. Dans le cadre de l'ISO/TC 282, des normes de réutilisation de l'eau pour l'irrigation agricole, les applications urbaines et les eaux usées industrielles ont été élaborées. La brochure « Non-potable Water Reuse » mise à jour par la DWA 2019 contient des recommandations détaillées pour les processus de préparation et leur combinaison ^[8]. □

ÉTUDE DE CAS : Industrie textile en Inde

Augmentation de la capacité du traitement basé sur l'épuration biologique séquentielle (SBR) sur une station centrale de traitement des eaux usées

Contexte

Actuellement, 100 000 m³/jour d'eaux usées sont traités dans la station centrale de traitement des eaux usées (Common Effluent Treatment Plant – CETP) à Surat (Inde). À mesure que les industries membres augmentent leurs capacités de production, la demande en eau et la quantité d'eaux usées augmentent. La station d'épuration est donc agrandie en deux phases afin de pouvoir couvrir un besoin en eau de 200 000 m³/jour.

Afin de préserver les ressources naturelles en eau, les entreprises membres se sont engagées à réutiliser 100 000 m³/jour de la station d'épuration. L'extension de l'installation SBR de 50 000 m³/jour à 80 000 m³/jour est présentée, planifiée et mise en œuvre par la société Jäger Umwelt Technik GmbH.

Défi particulier/Exposé du problème

Le système SBR existant est basé sur le procédé C-Tech (Cyclic Activated Sludge, développé par SFC Umwelttechnik), qui dispose d'un sélecteur biologique dans chacun des six bassins. Le procédé a été conçu pour la réduction de la DBO₅, la nitrification, la dénitrification et l'élimination biologique du phosphore. Pour moderniser l'installation, les bassins existants devaient être modifiés et de nouvelles constructions devaient être évitées.

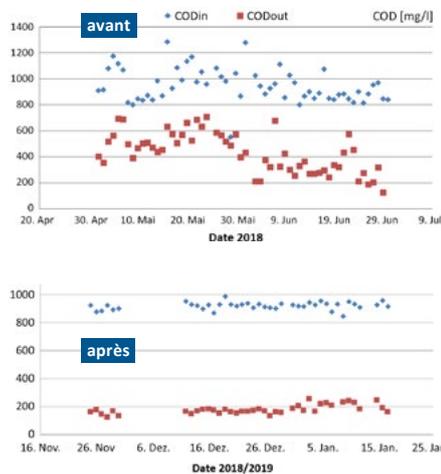


Figure 2 : Données de flux entrant et sortant du bassin avant et après le démarrage du système SBR avec le matériau de support Biocurlz

Proposition de solution

Un concept pour étendre le système sans changer sa surface au sol consiste à remplir les bassins existants avec un matériau de support afin d'augmenter la densité de la biomasse par l'extension de la surface spécifique. Avec des conditions appropriées du flux entrant et une surveillance fiable du fonctionnement stable de l'installation, un tel processus de biofilm représente une option peu encombrante et robuste pour le traitement biologique des eaux usées. La masse de

boues supplémentaire requise, appelée biomasse fixée, est fournie par la croissance de biofilm sur un matériau textile de support. Cette biomasse supplémentaire assure la stabilité des performances de l'installation. En outre le nombre de bactéries spécialisées augmente en raison de l'âge élevé de la biomasse fixée dans les boues. Cela permet d'éliminer les substances peu dégradables caractéristiques des eaux usées industrielles. La concentration en oxygène et le pH sont régulièrement surveillés dans la station et le volume des boues est mesuré quotidiennement.

Le support textile Cleartec Biocurlz, composé de poly(chlorure de vinylidène) (PVDC), a été sélectionné et installé de manière permanente dans des cages en acier inoxydable. Il s'est avéré résistant aux eaux usées et sans entretien dans de nombreux systèmes à travers le monde.



Figure 1 : Un des six bassins SBR avec cages Biocurlz et aérateurs à tubes à fines bulles

Résultats

La composition des eaux usées ne contenant ni azote organique ni phosphore, le sélecteur biologique du bassin C-Tech est superflu. La zone de sélection, qui occupait environ un cinquième de chaque bassin, a été au lieu de cela utilisée dans le cadre du processus SBR traditionnel, a augmenté d'autant le volume global de l'installation.

Enfin, 360 cages en acier inoxydable comportant une longueur totale de plus de deux millions de m de Biocurlz ont été réparties sur six bassins. 8 640 diffuseurs tubulaires JetFlex® à fines bulles ont été installés pour assurer une ventilation efficace (Fig. 1).

L'indice de volume de boue (IVB) de ce procédé <120 ml/g indique une excellente capacité de décantation des boues, dont bénéficie le système d'ultrafiltration en aval. Globalement, le post-traitement consiste en une flottation, une filtration sur disques, une ultrafiltration et une osmose inverse.

La fig. 2a) montre les données de mesure entre mai et juillet 2018, peu de temps avant le début des dispositions d'extension. En moyenne, la concentration de DCO dans le flux entrant du SBR est de 950 mg/l, et en sortie de 430 mg/l. Cela correspond à un taux de dégradation de l'ordre de 55 %. La fig. 2b) montre les données de mesure entre novembre 2018 et janvier 2019 après l'achèvement des dispositions d'extension. En plus du système SBR, le prétraitement des eaux usées a également été amélioré, si bien que les fluctuations de la DCO dans le flux entrant du système

SBR ont été considérablement réduites. En moyenne, la concentration de DCO à l'entrée du système SBR est de 920 mg/l, tandis que le traitement combiné Cleartec-SBR permet une réduction de la DCO en moyenne à 180 mg/l (Tab. 1). Cela correspond à un taux de dégradation de plus de 80 %.

Apport de la technologie fournie

Le système modernisé permet une décomposition très bonne et stable des eaux usées organiques avec un encombrement minimal. Le nombre de bactéries spécialisées a été augmenté par l'incorporation de matériel de support. Ces bactéries éliminent les substances qui sont sinon difficiles à décomposer et conduisent à une réduction significative des concentrations de l'effluent. Les étapes d'épuration en aval bénéficient également de la capacité de décantation améliorée des boues biologiques. □

Paramètre	Flux entrant	Flux sortant
pH	6,5–8,5	7,5–7,8
DCO [mg/l]	950–1 400	140–230
DBO ₅ [mg/l]	300–500	-
Matières solides [mg/l]	300	40–60

Tableau 1 : Aperçu des valeurs de flux entrant et sortant du traitement des eaux usées

ÉTUDE DE CAS : Traitement des eaux usées dans des zones industrielles au maroc

Construction clés en main de la station d'épuration « Zone Industrielle de Nouaceur » à Casablanca

Contexte

Le gouvernement du Royaume du Maroc a décidé de moderniser les zones industrielles marocaines en matière de traitement des eaux usées afin de se conformer à la nouvelle réglementation sur les rejets. Ici, la tendance nationale et régionale à mettre en place des stations indépendantes d'épuration des eaux industrielles afin d'envoyer les eaux usées traitées à la réutilisation et/ou à un rejet respectueux de l'environnement dans un cours d'eau récepteur est prise en compte. La politique poursuivie par le gouvernement vise à équiper les zones industrielles existantes de stations d'épuration spécifiques adaptées au parc industriel respectif, qui contribuent à un traitement des eaux usées respectueux de l'environnement et en même temps à soulager l'infrastructure de drainage communal.

La localisation du projet de station d'épuration « Zone Industrielle Nouaceur » se situe dans la région de Casablanca, dans le parc industriel SAPINO de 285 hectares. Plus de 400 entreprises des secteurs les plus divers sont implantées ici, notamment la fabrication de tuyaux en plastique renforcés avec des fibres de verre, la fabrication d'emballages, l'industrie alimentaire, la fabrication de boîtes en aluminium, la fabrication de batteries, les blanchisseries industrielles, le travail des métaux, la fabrication de détergents ainsi que les prestataires de services et les sociétés commerciales.

Le porteur du projet est le Ministère marocain de l'Industrie, du Commerce et de l'Économie Verte et Numérique (MICEVN). Ce dernier a confié le projet à la société LYDEC, qui est chargée de l'approvisionnement en eau potable, de l'assainissement, de la distribution d'électricité et de l'éclairage public dans la région de Casablanca. Le prestataire est un consortium dirigé par PWT Wasser- und Abwassertechnik GmbH.

Défi particulier/Exposé du problème

Les industries sont obligées de prétraiter localement les eaux usées, ce prétraitement pouvant être mécanique ou chimique. Le client LYDEC a dans un premier temps réalisé une campagne de mesures. Les paramètres examinés étaient les paramètres indiqués dans le tableau 1 plus la conductivité électrique. Les paramètres de conception de l'installation de traitement ont été déterminés en tenant compte d'une éventuelle expansion et/ou variation de la population de la zone. Il a également été pris en compte que des pics de flux entrants peuvent être gérés. Le concept développé et mis en œuvre par le PWT comporte un bassin tampon nécessaire

Paramètre	Unité	Flux entrant dans la station	Sortie de la station
Flux entrant moyen	m ³ /jour	2 000	-
Flux entrant max. dans le prétraitement	m ³ /h	400	-
Flux entrant max. dans le traitement biologique max.	m ³ /h	200	-
DBO ₅	mg/l	400	≤ 25
DCO	mg/l	1 200	≤ 120
TS	mg/l	600	≤ 20
N total	mg/l	200	≤ 15
N-Kjeldahl	mg/l	150	≤ 8
N-Kjeldahl	mg/l	30	≤ 2

Tableau 1 : Paramètres de conception et valeurs à atteindre pour les eaux usées traitées de la station d'épuration « Zone industrielle de Nouaceur », Maroc

à l'égalisation des débits entrants de pointe et au stockage intermédiaire des eaux usées contaminées et offre des options pour de futures extensions.

Proposition de solution

La station d'épuration de Nouaceur est une station à boues activées avec stabilisation aérobie et simultanée des boues dans les bassins de circulation. Le traitement des eaux usées consiste en un prétraitement mécanique (tamis grossier avant l'élévateur, tamis fin et bac à sable et graisses aéré), un bassin tampon pour absorber les pics de flux entrants ou les eaux usées contaminées, un traitement biologique avec dénitrification et clarification secondaire simultanées, une élimination chimique du phosphore, et une désinfection à l'hypochlorite de sodium avant rejet dans l'Oued Merikane. L'extension du système par un étage d'épuration supplémentaire avec filtration sur sable et désinfection UV pour une réutilisation pour l'irrigation d'espaces verts est actuellement à l'étude.

Le traitement des boues comprend la déshydratation mécanique des boues avec des centrifugeuses et le conditionnement et la désinfection par ajout de chaux avant leur élimination dans la décharge urbaine. Compte tenu de l'emplacement de la station d'épuration dans une zone densément peuplée, les corps de métier concernés sont équipés d'équipements modernes pour le traitement des odeurs et la réduction du bruit. Le tableau 1 montre les paramètres de conception et les valeurs de rejet à atteindre pour les eaux usées traitées.

Dispositions techniques pour faire face aux fluctuations imprévisibles

À ce titre, il convient de noter :

- Le mode de traitement choisi avec un bassin tampon pour les pointes de débit ou pour les eaux usées contaminées offre une certaine flexibilité dans les cas où la quantité/qualité des eaux usées est difficilement prévisible.
- La solution prévoit l'installation de matériaux résistants à la corrosion, car la proximité de l'emplacement du projet avec la mer peut entraîner une salinité plus élevée dans les eaux usées.
- Dans la zone d'entrée de la station d'épuration, une mesure des hydrocarbures ainsi que des mesures de pH et de conductivité sont installées afin que des eaux usées inhabituelles puissent être identifiées et envoyées dans le réservoir tampon. Selon le résultat de l'analyse de l'eau stockée, ces eaux peuvent alors être envoyées en traitement ou être éliminées conformément à la réglementation environnementale.

Résultats

Les travaux de construction de la station d'épuration de la zone industrielle de Nouaceur sont actuellement en cours. La fig. 1 montre les bassins d'aération activés.

Apport de la technologie fournie

L'installation fournie ici comprend le traitement mécanique, biologique et chimique complet des eaux usées. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux exigences particulières d'une station d'épuration industrielle de divers rejets, par exemple une flexibilité et une sécurité élevées de l'installation, ainsi que la surveillance météorologique correspondante du fonctionnement de l'installation. □

Figure 1 : Bassin d'aération de la station d'épuration industrielle de Nouaceur, Maroc, en construction



11

PERSPECTIVES

SUR LES TENDANCES INTERNATIONALES

DANS LE TRAITEMENT

DES EAUX USÉES INDUSTRIELLES





Gas flare

Digester

Digestion container

Flow	Flow rate (m³/h)	Flow rate (m³/d)
Flow 1	0.00	0.00
Flow 2	0.00	0.00
Flow 3	0.00	0.00

La raréfaction des ressources et l'importance croissante de la protection de l'environnement posent des défis particuliers pour le traitement des eaux usées industrielles au 21e siècle. Malgré des situations politiques, géographiques et socio-économiques différentes selon les régions, des évolutions globales peuvent être identifiées dans le traitement des eaux usées industrielles. Les meilleures techniques disponibles (MTD), qui documentent l'état de la technique pour le fonctionnement respectueux de l'environnement et économe en ressources des installations, pour tous les secteurs industriels concernés, peuvent également servir de base à la formulation de recommandations innovantes ^[224].

Traitement des eaux usées industrielles

En fonction des situations et des impuretés contenues, les flux d'eaux usées industrielles peuvent être détournés vers les eaux de surface sans prétraitement, injectés dans le réseau communal d'eaux usées ou (pré)traités dans des stations d'épuration industrielles. Grâce au traitement conjoint des eaux usées industrielles et communales, des synergies peuvent être utilisées sous certaines conditions (par exemple, disponibilité des nutriments). Dans la plupart des cas, un traitement séparé des eaux usées est toutefois préférable, notamment si des exigences minimales (propres au secteur) imposées à la qualité des eaux usées doivent être respectées. Dans les entreprises industrielles, des flux d'eaux usées de qualité variable, qui souvent varient dans le temps, sont produites, et peuvent contenir des substances persistantes ou dangereuses pour l'environnement – les défis associés ne peuvent être relevés que par un traitement des eaux usées industrielles ciblé et spécifique au site ^[22].

On observe de plus en plus l'implantation de CETP, qui permettent un traitement efficace et robuste des eaux usées avec un déploiement minimum de moyens pour les entreprises industrielles responsables des rejets. Ces systèmes sont souvent confrontés à un mélange complexe et variable de différents flux d'eaux usées, si bien qu'en plus d'un fonctionnement flexible du système, une collaboration étroite avec les entreprises industrielles responsables des rejets est indispensable. Dans la plupart des cas, il est utile et nécessaire de prétraiter de

manière ciblée les flux d'eaux usées individuels avant leur introduction dans la station d'épuration industrielle centrale, en tenant compte de la composition respective, et de surveiller ce traitement par l'exploitant de la station ^[221].

Efficacité hydrique au niveau de l'exploitation

Augmenter leur efficacité hydrique est une priorité pour de nombreux sites de production, notamment dans les régions où l'eau est rare – mais de plus en plus aussi au-delà. En plus de réduire les coûts de l'eau douce, de l'énergie et de l'élimination des eaux usées, un facteur important est souvent une motivation socio-écologique. La définition de « l'état de l'art » prend également en compte l'utilisation économique de l'eau dans l'industrie.

La base la plus importante pour améliorer l'efficacité hydrique est la réutilisation et l'utilisation ultérieure de l'eau (usée) de process produite. En fonction de la qualité de l'eau disponible et requise, des flux d'eau peuvent être recyclés dans le processus, avec ou sans prétraitement interne, réutilisés à proximité de la production ou réutilisés dans d'autres applications (par exemple, l'irrigation des espaces verts ou comme eau d'extinction). La récupération de l'eau est habituellement associée à un traitement relativement coûteux et constitue une option judicieuse, en particulier dans les conditions suivantes ^[22]:

- si cela peut réduire les besoins en eau douce ou en énergie
- si les substances séparées peuvent être réutilisées ou utilisées ultérieurement d'une manière écologiquement, économiquement et techniquement valable
- si la production réduite d'eaux usées soulage le traitement des eaux usées en aval ou directement le milieu aquatique

Un fonctionnement totalement sans eaux usées (« Zero Liquid Discharge ») peut être obtenu grâce à la combinaison de processus de production sans eaux usées (par exemple, la peinture à sec) et d'une récupération interne optimisée de l'eau. Les processus sans eaux usées fonctionnent normalement selon le principe de la concentration maximale (par exemple, l'osmose inverse, l'évaporation ou la cristallisation). Ce sont des technologies sophistiquées qui



sont généralement associées à une consommation d'énergie accrue et à des coûts de traitement élevés en conséquence ^[225]. Ces dépenses sont d'autant plus réduites si les eaux usées ont déjà été amplement traitées au préalable.

Cependant, une efficacité hydrique élevée ne peut pas être atteinte uniquement avec des procédures en aval pour l'épuration – et la récupération – des eaux usées. Au lieu de cela, des approches intégrées au processus, avec prise en compte de divers flux de ressources (par exemple, eau douce, eaux usées, matières premières et énergie) et des aspects inter-médias, gagnent en importance. Par exemple des processus d'épuration optimisés (épuration locale ou *cleaning in place*, installations dites CIP) pour minimiser les pertes de produits, les besoins en eau douce et l'utilisation de produits chimiques, ainsi qu'une séparation judicieuse des flux d'eaux usées et des niveaux de pollution, sont considérés comme à la pointe de la technologie aujourd'hui. Au niveau organisationnel, la planification optimisée des séquences de produits et d'épuration, l'équilibrage et le contrôle quantitatifs des processus et la formation régulière du personnel peuvent contribuer à réduire la pollution des eaux usées ^[226, 227].

La gestion de l'eau du futur

En plus d'un système de gestion de la qualité et de l'énergie, la plupart des entreprises ont désormais mis en place un système de gestion environnementale pour soutenir la mise en œuvre systématique de mesures de protection de l'environnement. Outre la construction et l'exploitation des stations d'épuration nécessaires, la gestion environnementale de l'entreprise couvre également le contrôle qualité correspondant, tel que le respect des valeurs limites de rejet, et l'évaluation

des risques, par exemple en cas d'émissions accidentelles. L'enregistrement des débits volumiques et des paramètres de tous les flux d'eau pertinents sur le site (p. ex. pH, température, DCO) est une condition préalable fondamentale à une gestion efficace des eaux (usées). Aujourd'hui, cela se fait habituellement via des capteurs en ligne qui permettent déjà une certaine automatisation des processus ^[224, 228].

Les avancées dans le domaine des capteurs, des interfaces informatiques et du traitement des données permettront à l'avenir de poursuivre une mise en réseau plus étendue et une amélioration de l'efficacité des processus. À moyen terme, la numérisation contribuera à l'optimisation des systèmes d'eaux usées industrielles à travers les aspects suivants, entre autres :

- Disponibilité de données de processus à haute résolution grâce aux capteurs en ligne
- Gestion intelligente des réseaux et automatisation des centres de commande
- Extension des compétences d'analyse grâce au Big Data et au Smart Data
- Couplage avec des données environnementales telles que le climat, la disponibilité en eau, les charges thermiques
- Stratégies prédictives pour l'exploitation de l'installation et la surveillance des états
- Automatisation des processus d'alerte rapide et de prise de décision

La mise en œuvre complète des approches numériques dépendra de la manière dont les exigences élevées en matière de sécurité informatique et de protection des données peuvent être satisfaites et des interfaces normalisées établies pour la transmission des données ^[229, 230]. □

Bibliographie

- [1] United Nations, « Transforming our world : the 2030 Agenda for Sustainable Development », 2016 Januar 01. [Online].
Available : <https://sdgs.un.org/2030agenda>. [Accessed 2020 November 02].
- [2] World Bank, « World Bank Data », 2020. [Online].
Available : <https://data.worldbank.org/country/india>. [Accessed 1 Oktober 2020].
- [3] Global Water Intelligence, « GWI Water Data », 26 August 2020. [Online].
Available : <https://www.gwiwaterdata.com/>.
- [4] T. Desai, Interviewee, Founder and Chairman, Geostone group of companies – Industrial Water Treatment in India. [Interview]. 20 Juni 2020.
- [5] World Bank, « The World Bank Data », 2020. [Online].
Available : <https://data.worldbank.org>. [Accessed 01 Oktober 2020].
- [6] M. Ayaserah, Interviewee, Director of Energy and Environmental Sustainability, Jordanian Chamber of Industries – Environmental Technologies for Industrial Wastewater Treatment in the MOAN region. [Interview]. 01 September 2020.
- [7] M. Khashashneh, Interviewee, Secretary General, Ministry of Environment Jordan – Industrial Wastewater Treatment in Jordan. [Interview]. 01 September 2020.
- [8] Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, « DWA Topics – Non-potable Water Reuse », DWA, 2019.
- [9] India Brand Equity Foundation, « Indian Oil and Gas Industry Report », 2019.
- [10] India Brand Equity Foundation, « IBEF », IBEF, 01 März 2020. [Online].
Available : <https://www.ibef.org/industry/oil-gas-india/showcase>. [Accessed 22 September 2020].
- [11] U.S. Energy Information Administration, « Analysis India », [Online].
Available : <https://www.eia.gov/international/overview/country/IND>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [12] U.S. Energy Information Administration, « Analysis Egypt », [Online].
Available : <https://www.eia.gov/international/overview/country/EGY>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [13] Universal Solutions, « Gulf Oil and Gas », [Online].
Available : <https://www.gulfoilandgas.com/webpro1/prod1/suplista.asp?id=327&yx1=EG>. [Accessed 22 September 2020].
- [14] Mbendi, « Tunisia : Oil and gas industry », [Online].
Available : <https://mbendi.co.za/cytuoi.htm>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [15] U.S. Energy Information Administration, « Analysis Tunisia », [Online].
Available : <https://www.eia.gov/international/overview/country/TUN>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [16] Office National Des Hydrocarbon et des Mines, [Online].
Available : <http://www.onhym.com/en/partnership-and-cooperation/list-of-partners.html>. [Accessed 22 September 2020].
- [17] Y. Abul-Failat, « The oil and gas sector in Jordan – an overview », vol. 11, no. 3, 2013.

- [18] U.S. Energy Information Administration, « Analysis Morocco », [Online]. Available : <https://www.eia.gov/international/overview/country/MAR>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [19] U.S. Energy Information Administration, « International Energy Statistics », [Online]. Available : <https://www.eia.gov/international/data/world>. [Accessed 04 Mai 2020].
- [20] Central Intelligence Agency, « Library – The World Factbook – Africa : Morocco », 2018 Januar 01. [Online]. Available : <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/mo.html>. [Accessed 02 November 2020].
- [21] Central Intelligence Agency, « Library – The World Factbook – Middle East : Jordan », Central Intelligence Agency, 2018 Januar 01. [Online]. Available : <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/geos/jo.html>. [Accessed 02 November 2020].
- [22] K.-H. Rosenwinkel, U. Austermann-Haun, S. Köster and M. Beier, Taschenbuch der Industrieabwasserreinigung, Essen : Vulkan-Verlag GmbH, 2020.
- [23] IPIECA, « Identifying and assessing water sources », IPIECA, 2014.
- [24] A. Fakhru'l-Razi, A. Pendashtesh, A. Luqman Chuah, D. Radiah, S. Siavash Madaeni and Z. Zainal Abidin, « Review of technologies for oil and gas produced water treatment », Journal of hazardous materials, vol. 170, no. 2–3, 2009.
- [25] European Commission, « Best Available Techniques Guidance Document on upstream hydrocarbon exploration and production », European Commission, Luxembourg, 2019.
- [26] J. Pichtel, « Oil and gas production wastewater : Soil contamination and pollution prevention », Applied and Environmental Soil Science, no. 8, 2016.
- [27] IFC, World Bank, « Environmental, Health, and Safety Guidelines for Onshore Oil and Gas Development, Draft Revised Version », World Bank Group, 2017.
- [28] IFC, World Bank, « Environmental, Health, and Safety Guidelines for Onshore Oil and Gas, April 2007 », World Bank Group, 2007.
- [29] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas », European Commission, Luxembourg, 2015.
- [30] B. Alireza, « Wastewater treatment in the unconventional oil and gas industries », in Waste Management in the Chemical and Petroleum Industries, John Wiley & Sons Ltd, 2019.
- [31] X. Wei, S. Zhang, Y. Han and F. A. Wolfe, « Treatment of petrochemical wastewater and produced water from oil and gas », Water Environment Research, vol. 91, no. 10, 2019.
- [32] M. Nasiri, I. Jafari and B. Parniankhoy, « Oil and gas produced water management : A review of treatment technologies, challenges, and opportunities », Chemical Engineering Communications, vol. 204, no. 8, 2017.
- [33] IPIECA, « Efficiency in water use. Guidance document for the upstream onshore oil and gas industry », IPIECA, London, 2014.
- [34] T. Dadhania, « Indian Chemical Industry : Accelerating Growth », 2020. [Online]. Available : <https://www.maiervidorno.com/indian-chemical-industry-accelerating-growth>. [Accessed 21 April 2020].

- [35] Statista, « Chemical industry in India – Statistics & Facts », [Online]. Available : <https://www.statista.com/topics/5601/chemical-industry-in-india/>. [Accessed 22 September 2020].
- [36] global markets international, [Online]. Available : <https://www.globalmarketsinternational.com/latestmarketpost/egypt-chemical-industry-companies-projects-petrochemical-agrochemical-pharmaceutical/>. [Accessed 22 September 2020].
- [37] D. Farid, « Egypt's chemicals sector to boom on more projects underway », 2017. [Online]. Available : <https://www.egypttoday.com/Article/3/34268/Egypt-s-chemicals-sector-to-boom-on-more-projects-underway>. [Accessed 05 Mai 2020].
- [38] OECD, « OECD Economic Survey Tunisia », OECD, 2018.
- [39] K. El Mokri, « Morocco's 2014-2020 industrial strategy and its potential implications for the structural transformation process », 2016.
- [40] S. El Ouahabi and A. Bouselhami, « The productivity of the Moroccan industrial sector analysis. Econometric modeling », International Journal of Scientific Research and Innovative Technology, vol. 4, no. 1, 2017.
- [41] World Bank, « Manufacturing, value added (% of GDP) », 2018. [Online]. Available : <https://data.worldbank.org/indicator/NV.IND.MANF.ZS?view=map>. [Accessed 06 Mai 2020].
- [42] World Bank, « Chemicals (% of value added in manufacturing) », 2018. [Online]. Available : <https://data.worldbank.org/indicator/NV.MNF.CHEM.ZS.UN>. [Accessed 06 Mai 2020].
- [43] TechnoFunc, « Sectors of Chemical Industry », 2020. [Online]. Available : <https://www.technofunc.com/index.php/domain-knowledge/item/sectors-of-chemical-industry>. [Accessed 06 Mai 2020].
- [44] I. Muralikrishna and V. Manickam, « Industrial wastewater treatment technologies, recycling and reuse », in Environmental Management, Elsevier Inc., 2017.
- [45] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the Refining of Mineral Oil and Gas », European Commission, Luxembourg, 2015.
- [46] European Commission, « Reference Document on Best Available Techniques in the Production of Polymers », European Commission, Luxembourg, 2007.
- [47] Y. Mikhak, M. M. Torabi and A. Fouladitajar, « Refinery and petrochemical wastewater treatment », in Sustainable Water and Wastewater Processing, Elsevier Inc., 2019.
- [48] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the production of large volume organic chemicals », European Commission, Luxembourg, 2017.
- [49] M. Gouider, M. Feki and S. Sayadi, « Treatment of wastewaters from phosphate fertilizer industry », Environmental Progress & Sustainable Energy, vol. 33, no. 2, 2013.
- [50] European Commission, « Reference Document on Best Available Techniques for the manufacture of large volume inorganic chemicals – Ammonia, acids and fertilisers », European Commission, Luxembourg, 2007.
- [51] H. A. Aziz, M. F. Ghazali and M. S. Yusoff, « Waste treatment and management in chlor-alkali industries », in Waste treatment in the service and utility industries, CRC Press, 2017.

- [52] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the production of chlor-alkali », European Commission, Luxembourg, 2014.
- [53] European Commission, « Reference Document on Best Available Techniques for the manufacture of large volume inorganic chemicals – Solids and others industry », European Commission, Luxembourg, 2007.
- [54] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for common waste water and waste gas treatment/management systems in the chemical sector », European Commission, Luxembourg, 2016.
- [55] M. Awaleh and Y. Soubaneh, « Wastewater treatment in chemical industries : The concept and current technologies », *Hydrology Current Research*, vol. 5, no. 1, 2014.
- [56] India Brand Equity Foundation, « Indian Pharmaceuticals Industry Analysis », [Online]. Available : www.ibef.org/industry/pharmaceutical-india.aspx. [Accessed 25 Mai 2020].
- [57] e-Eighteen.com, « money control », [Online]. Available : <https://www.moneycontrol.com/stocks/marketinfo/marketcap/bse/pharmaceuticals-drugs.html>. [Accessed 22 September 2020].
- [58] R. Raghavan and J. Joshi, « India's Expanding Chemical Industry », [Online]. Available : www.aiche.org/resources/publications/cep/2018/december/indias-expanding-chemical-industry. [Accessed 25 Mai 2020].
- [59] V. Rees, « Limiting antibiotic manufacturing discharge in Indian wastewater », 12 März 2020. [Online]. Available : www.europeanpharmaceuticalreview.com/article/115074/limiting-antibiotic-manufacturing-discharge-in-indian-wastewater. [Accessed 25 Mai 2020].
- [60] CHEManager International, « MENA Pharmaceutical Market », 03 Dezember 2018. [Online]. Available : www.chemanager-online.com/en/topics/economy-business/mena-pharmaceutical-market. [Accessed 25 Mai 2020].
- [61] D. Moneim, « Egypt's pharmaceutical industry suffering, multinational companies have lion's share : SHUAA Securities report », 08 Januar 2020. [Online]. Available : <http://english.ahram.org.eg/News/359141.aspx>. [Accessed 25 Mai 2020].
- [62] The Middle East Observer, « The Pharmaceutical industry : A challenge worth the investment », 28 November 2017. [Online]. Available : www.meobserver.org/?p=14679. [Accessed 25 Mai 2020].
- [63] PharmaBoardroom, « Pharma Boardroom », [Online]. Available : <https://pharmaboardroom.com/facts/top-10-pharma-companies-in-morocco-ranking/>. [Accessed 22 September 2020].
- [64] G. Miglierini, « Morocco : The opportunities for the pharmaceutical industry », 20 April 2018. [Online]. Available : www.pharmaworldmagazine.com/from-morocco-the-opportunities-for-the-pharmaceutical-industry. [Accessed 25 Mai 2020].
- [65] Oxford Business Group, « Tunisian pharmaceutical industry is looking to export more », [Online]. Available : <https://oxfordbusinessgroup.com/analysis/good-shape-local-pharmaceutical-industry-looking-export-more>. [Accessed 25 Mai 2020].
- [66] M. Alomari and N. Saqfalhait, « Analyzing the structure of Jordanian pharmaceutical industry », *European Journal of Social Sciences*, vol. 49, no. 1, 2015.

- [67] C. Gadipelly, A. Pérez-González, G. Yadav, I. Ortiz, R. Ibáñez, V. Rathod and K. Marathe, « Pharmaceutical industry wastewater : Review of the technologies for water treatment and reuse », *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 29, 2014.
- [68] Environmental Protection Agency Ireland, « BAT Guidance Note on best available techniques for pharmaceutical and other specialty organic chemicals », Wexford, 2008.
- [69] P. Pal, « Treatment and disposal of pharmaceutical wastewater : Toward the sustainable strategy », *Separation & Purification Reviews*, vol. 47, no. 3, 2018.
- [70] K. Ikehata, N. Naghashkar and M. El-Din, « Degradation of aqueous pharmaceuticals by ozonation and advanced Oxidation processes : A review », *The Journal of the International Ozone Association*, vol. 28, no. 6, 2006.
- [71] R. Rana, P. Singh, V. Kandari, R. Singh, R. Dobhal and S. Gupta, « A review on characterization and bioremediation of pharmaceutical industries' wastewater : An Indian perspective », *Applied Water Science*, vol. 7, no. 1–12, 2017.
- [72] A. Deegan, S. Basha, K. Nolan and K. Urell, « Treatment options for wastewater effluents from pharmaceutical companies », *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 8, no. 3, 2011.
- [73] India Brand Equity Foundation, « Indian Metals and Mining Industry Analysis », 21 Oktober 2020. [Online]. Available : <https://www.ibef.org/industry/metals-and-mining-presentation>. [Accessed 02 November 2020].
- [74] M. Jaganmohan, « Volume of chromite production in India from 2010 to 2019 », Statista, 10 Oktober 2020. [Online]. Available : <https://www.statista.com/statistics/667460/india-chromite-production-volume/>. [Accessed 29 Oktober 2020].
- [75] Feedback Business Consulting Services, « Overview of the mining industry in India », Virginia Economic Development Partnership, 2014.
- [76] Indian Bureau of Mines, « Guidelines for preparation of Mine Closure Plan », 2020. [Online]. Available : <https://ibm.gov.in/index.php?c=pages&m=index&id=214>. [Accessed 11 Mai 2020].
- [77] MBendi, « Morocco : Mining industry », [Online]. Available : <https://mbendi.co.za/indy/ming/af/mo/p0005.htm>. [Accessed 07 Mai 2020].
- [78] K. Tarawneh, « A comprehensive outlook of mining industry in Jordan, opportunities and threats », *Open Journal of Geology*, vol. 6, 2016.
- [79] S. El Wardany, « Egypt Eyes Gold Rush With Fresh Exploration Tender by March », 17 Februar 2020. [Online]. Available : <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-02-17/egypt-to-hold-new-gold-exploration-tender-after-terms-eased>. [Accessed 11 Mai 2020].
- [80] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the management of waste from extractive industries », European Commission, Luxembourg, 2018.
- [81] D. Mohapatra and D. Kirpalani, « Process effluents and mine tailings : Sources, effects and management and role of nanotechnology », *Nanotechnology for Environmental Engineering*, vol. 2, 2017.
- [82] G. Reta, X. Dong, Z. Li, B. Su, X. Hu, H. Bo, D. Yu, H. Wan, J. Liu, Y. Li, G. Xu, K. Wang and S. Xu, « Environmental impact of phosphate mining and beneficiation : review », *International Journal of Hydrology*, vol. 2, no. 4, 2018.

- [83] H. Dharmappa and M. Sivakumar, « Wastewater characteristics, management and reuse in mining & mineral processing industries », in *Wastewater recycle, reuse, and reclamation, Encyclopedia of Life Support Systems*, 2002.
- [84] M. Acheampong, *Sustainable gold mining wastewater treatment by sorption using low-cost materials*, Wageningen, 2013.
- [85] Careerizma, « Food and Beverage Industry in India & Abroad », [Online]. Available : www.careerizma.com/industries/food-and-beverage. [Accessed 22 Juni 2020].
- [86] IBEF, « Indian Food Processing », November 2019. [Online]. Available : www.ibef.org/industry/indian-food-industry/showcase. [Accessed 22 Juni 2020].
- [87] Grant Thornton, « Indian Food & Beverage Sector », 2014.
- [88] A. Krishnamurthy, « Country Profile India », März 2019. [Online]. Available : www.gwiwaterdata.com/markets/countries/india#card-138738. [Accessed 22 Juni 2020].
- [89] Index Mundi, « India Wheat Production by Year », [Online]. Available : www.indexmundi.com/agriculture/?country=in&commodity=wheat&graph=production. [Accessed 22 Juni 2020].
- [90] Goldstein Research, « India Rice Industry Analysis », 2020.
- [91] FAO, « National Aquaculture Sector Overview India », [Online]. Available : www.fao.org/fishery/countrysector/naso_india/en. [Accessed 22 Juni 2020].
- [92] H. Ritchie and M. Roser, « Meat and Dairy Production », November 2019. [Online]. Available : <https://ourworldindata.org/meat-production>. [Accessed 22 Juni 2020].
- [93] Ministry of Agriculture and Farmers Welfare, Government of India, « Agricultural Statistics at a Glance 2019 », Directorate of Economics & Statistics, Government of India, India, 2020.
- [94] Statista, « Rice – India », 2020. [Online]. Available : <https://www.statista.com/outlook/40060200/119/rice/india>. [Accessed 03 November 2020].
- [95] Ministry of Agriculture & Farmers' Welfare, Government of India, « Horticultural Statistics at a Glance 2018 », Government of India, New Delhi, 2018.
- [96] Statista, « Meat – India », Statista, 2020. [Online]. Available : <https://www.statista.com/outlook/40140000/119/meat/india>. [Accessed 03 November 2020].
- [97] Statista, « Rice – India », Statista, 2020. [Online]. Available : <https://www.statista.com/outlook/40060200/119/rice/india>. [Accessed 03 November 2020].
- [98] Sandhya Keelery, « Value of wheat exported from India between financial year 2015 and 2020 », statista, 16 10 2020. [Online]. Available : <https://www.statista.com/statistics/652172/export-value-of-wheat-india/>. [Accessed 01 11 2020].
- [99] A. Abdallah, V. Donnalaj, C. Gregg, C. Hofmann and B. Tumurchudur Klok, « Skills for trade and economic diversification in Egypt – Food processing sector », International Labour Organization, Genf, 2015.
- [100] L. Hundaileh and F. Fayad, « Jordan's food processing sector analysis and strategy for sectoral improvement », Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2019.
- [101] T. Fileccia, V. Hovhera, I. Punda and S. Manzo, « Jordan Water along the food chain », Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rom, 2015.

- [102] M. Samir, « Egypt's food industry achieved \$22.5bn revenues in 2017 : USDA », 15 Januar 2018. [Online]. Available : www.dailynewssegypt.com/2018/01/15/egypts-food-industry-achieved-22-5bn-revenues-2017-usda/. [Accessed 23 Juli 2020].
- [103] Ecomnews, « The importance of Morocco's food industry », 27 März 2020. [Online]. Available : <http://ecomnewsmed.com/article/5347/the-importance-of-moroccos-food-industry---->. [Accessed 23 Juli 2020].
- [104] International Trade Administration, « Tunisia – Agricultural Sector », 14 7 2019. [Online]. Available : <https://www.export.gov/apex/article2?id=Tunisia-Agricultural-Sector>. [Accessed 09 03 2021].
- [105] R. McIlvaine, « Water & Wastewater treatment in the food industry », 07 Juli 2015. [Online]. Available : www.wwdmag.com/industrial-water-wastes-digest/water-wastewater-treatment-food-industry. [Accessed 25 Juni 2020].
- [106] Water Technology, « Wastewater treatment challenges in food processing and agriculture », 31 August 2018. [Online]. Available : www.watertechonline.com/wastewater/article/15550688/wastewater-treatment-challenges-in-food-processing-and-agriculture. [Accessed 25 Juni 2020].
- [107] A. u. A. e. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, « Merkblatt DWA-M 708 Abwasser aus der Milchverarbeitung », DWA, Hennef, 2011.
- [108] A. Slavov, « General characteristics and treatment possibilities of dairy wastewater – A review », *Food Technology and Biotechnology*, vol. 55, no. 1, 2017.
- [109] B. Sarkar, P. Chakrabarti, A. Vijaykumar and V. Kale, « Wastewater treatment in dairy industries – possibility of reuse », *Desalination*, vol. 195, no. 1–3, 2006.
- [110] J.-H. Tay, K.-Y. Show and Y.-T. Hung, « Seafood processing wastewater treatment », in *Waste treatment in the food processing industry*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [111] C. Bustillo-Lecompte and M. Mehrvar, « Slaughterhouse wastewater characteristics, treatment, and management in the meat processing industry : A review on trends and advances », *Journal of Environmental Management*, no. 161, 2015.
- [112] A. u. A. e. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, « Merkblatt DWA-M 767 Abwasser aus Schlacht- und Fleischverarbeitungsbetrieben », DWA, Hennef, 2020.
- [113] A. Awad, H. Salman and Y.-T. Hung, « Olive oil waste treatment », in *Waste treatment in the food processing industry*, Taylor & Francis Group, 2006.
- [114] N. Gholamzadeh, M. Peyravi and M. Jahanshahi, « Study on olive oil wastewater treatment : Nanotechnology impact », *Journal of Water and Environmental Nanotechnology*, vol. 1, no. 2, 2016.
- [115] R. Rajagopal, N. Saady, M. Torrijos, J. Thanikal and Y.-T. Hung, « Sustainable agro-food industrial wastewater treatment using high rate anaerobic process », *Water*, no. 5, 2013.
- [116] P. K. Biswas, P. Banerjee, R. Kumari, A. Choudhury and P. Kukreja, « Industry Structure and the Pattern of Innovation : Basic Metal Industry of India », *National Institute of Science Technology and Development Studies*, New Delhi, 2014.
- [117] P. Nidheesh and M. S. Kumar, « An overview of environmental sustainability in cement and steel production », *Journal of Cleaner Production*, pp. 856–871, 2019.
- [118] T. Brown, N. Idoine, E. Raycraft, R. Shaw, S. Hobbs, P. Everett, E. Deady and T. Bide, « World Mineral Production 2014-18 », *British Geological Survey*, Nottingham, 2020.

- [119] Worldsteel Association, « Steel Statistical Yearbook 2019 – Concise version », Worldsteel Association, 2020.
- [120] Maghreb Steel, « Some key insights on the Moroccan steel market », ASM, Dubai, 2017.
- [121] Stahlinstitut VDEh, « Stahlerzeugung », 2020. [Online].
Available : www.vdeh.de/stahltechnologie/stahlerzeugung/. [Accessed 29 Juli 2020].
- [122] S. Dutta and Y. Chokshi, Basic concepts of iron and steel making, Springer, 2020.
- [123] W. Weißbach, M. Dahms and C. Jaroschek, Werkstoffe und ihre Anwendungen, Wiesbaden : Springer, 2018.
- [124] H. Berns and W. Theisen, Eisenwerkstoffe – Stahl und Gusseisen, Springer, 2008.
- [125] R. Yin, Metallurgical Process Engineering, Springer, 2011.
- [126] D. Gabe, Principles of metal surface treatment and protection, Elsevier, 2014.
- [127] Umwelt-Bundesamt, « Galvanische Oberflächenbeschichtung », 29 Januar 2013. [Online].
Available : www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industrieverarbeitend/industrieverarbeitung-von-metallen/galvanische-oberflaechenbeschichtung#was-ist-galvanische-oberflaechenbeschichtung. [Accessed 29 Juli 2020].
- [128] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for iron and steel production », European Commission, Luxembourg, 2013.
- [129] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the non-ferrous metals industries », European Commission, Luxembourg, 2017.
- [130] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the ferrous metals processing industry », European Commission, Luxembourg, 2019.
- [131] European Commission, « Reference document on Best Available Techniques for the surface treatment of metals and plastics », European Commission, Luxembourg, 2006.
- [132] V. Kuklik and J. Kudlacek, Hot-dip galvanizing of steel structures, Butterworth-Heinemann, 2016.
- [133] Suez, « Metal Industries », [Online].
Available : <https://www.suezwaterhandbook.com/water-and-generalities/what-water-should-we-treat-and-why/industrial-effluent/metal-industries>. [Accessed 30 Juli 2020].
- [134] E. Alcamisi, I. Matino, G. Porzio and V. Colla, Wastewater treatment in iron and steel industry : Process integration for water re-use, Lulea, 2014.
- [135] P. Das, G. Mondal, S. Singh, A. Singh, B. Prasad and K. Singh, « Effluent treatment technologies in the iron and steel industry – A state of the art review », Water environment research, vol. 90, no. 5, 2018.
- [136] N. Makish and M. Yunchina, Methods and solutions for galvanic waste water treatment, 2017.
- [137] D. Cutler, J. Dean and D. Howett, « Alternative Water Treatment Technologies for Cooling Tower Applications », National Renewable Energy Laboratory, 2019.
- [138] India Brand Equity Foundation, « Textile Industry & Market Growth in India », 03 2020. [Online].
Available : www.ibef.org/industry/textiles.aspx. [Accessed 07 Juli 2020].
- [139] M. Dhanabhakya, « Indian textile industry – An overview », August 2007. [Online].
Available : www.fibre2fashion.com/industry-article/2363/indian-textile-industry-an-overview. [Accessed 07 Juli 2020].

- [140] A. Krishnamurthy, « Textiles and Leather tannery », März 2019. [Online]. Available : www.gwiwaterdata.com/markets/countries/india#card-140287. [Accessed 07 Juli 2020].
- [141] India Brand Equity Foundation, « Leather Industry and Exports », März 2020. [Online]. Available : www.ibef.org/exports/leather-industry-india.aspx. [Accessed 07 Juli 2020].
- [142] D. Moneim, « Egypt aims to be textile industry hub by 2025 », 19 September 2019. [Online]. Available : <http://english.ahram.org.eg/NewsContent/3/12/351172/Business/Economy/Egypt-aims-to-be-textile-industry-hub-by-.aspx>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [143] Invest in Morocco, « Investment opportunities Textile and leather », [Online]. Available : www.invest.gov.ma/?Id=23&lang=en&RefCat=1&Ref=143. [Accessed 08 Juli 2020].
- [144] Fibre2Fashion, « Egyptian textile industry comes under the global radar », März 2011. [Online]. Available : www.fibre2fashion.com/industry-article/5465/egyptian-textile-industry-comes-under-the-global-radar. [Accessed 08 Juli 2020].
- [145] Oxford Business Group, « Textiles sector growing in Morocco », 2015. [Online]. Available : <https://oxfordbusinessgroup.com/analysis/textiles-sector-growing-morocco>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [146] Oxford Business Group, « Tunisia textiles pursuing innovation to compete », 2017. [Online]. Available : <https://oxfordbusinessgroup.com/analysis/spirit-competition-textiles-industry-looking-innovate-while-capitalising-domestic-strengths>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [147] Kohan Textile Journal, « Jordan's textile & apparel industry », Juni 2020. [Online]. Available : <https://kohantextilejournal.com/jordans-textile-apparel-industry/>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [148] M. El-Khair, « Promoting international and intra-african », International Trade Center, 2010.
- [149] F. Khaled, « Egypt's leather industry : Is Robeki a solution for an industry threatened with collapse? », 02 Juni 2019. [Online]. Available : <http://businessforwardafrica.com/2019/06/02/egypts-leather-industry-is-robeki-a-solution-for-an-industry-threatened-with-collapse/>. [Accessed 08 Juli 2020].
- [150] INNOLEA, « D.1-2 : Leather industry status in Jordan. Focus group discussions report », Erasmus+ Programme, 2017.
- [151] T. Gries, D. Veit and B. Wulfhorst, Textile Fertigungsverfahren, 2020.
- [152] NIIR Board of Consultant Engineers, Leather processing & tanning technology, 2011.
- [153] European Commission, « Reference document on Best Available Techniques for the textiles industry », European Commission, 2003.
- [154] A. u. A. e. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, « Merkblatt DWA M 774 Abwasser aus lederherstellenden Betrieben », DWA, Hennef, 2019.
- [155] University of Sheffield, « Case study – Textile wastewater », [Online]. Available : <https://sites.google.com/site/textileindustryeffluent/introduction-to-wastewater/case-study---textile-wastewater>. [Accessed 09 03 2021].
- [156] M. Chowdhury, M. Mostafa, T. Biswas, A. Mandal and A. Saha, « Characterization of the effluent from leather processing industries », Environmental Processes, no. 2, 2015.
- [157] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the tanning of hides and skins », European Commission, Luxembourg, 2013.

- [158] R. Singh, P. Singh, R. Gupta and R. Singh, « Treatment and recycling of wastewater from textile industry », in *Advances in biological treatment of industrial wastewater and their recycling for a sustainable future*, Springer, 2019.
- [159] C. Swartz, R. Rowsell, C. Jackson-Moss, A. Mpofo and P. Welz, « Water and wastewater management in the tanning and leather finishing industry », Water Research Commission, 2017.
- [160] P. Kumar and A. Saravanan, « Sustainable wastewater treatments in textile sector », in *Sustainable Fibres and Textiles*, Woodhead Publishing, 2017.
- [161] B. Mella, A. Glanert and M. Gutterres, « Removal of chromium from tanning wastewater and its reuse », *Process Safety and Environmental Protection*, no. 95, 2015.
- [162] O. Habeeb, R. Kanthasamy, G. Ali, S. Sethupathi and R. Yunus, « Hydrogen sulfide emission sources, regulations, and removal techniques : a review », *Reviews in Chemical Engineering*, vol. 34, no. 6, 2017.
- [163] Indian Paper Manufacturers Association, « Paper industry overview », 2018. [Online]. Available : <http://ipma.co.in/overview/>. [Accessed 16 Juli 2020].
- [164] A. Krishnamurthy, « India Pulp and Paper », Juni 2020. [Online]. Available : <https://www.gwiwaterdata.com/markets/countries/india>. [Accessed 16 Juli 2020].
- [165] « Indian Paper & Pulp Market – industrial analysis and forecast », April 2019. [Online]. Available : <http://www.maximizemarketresearch.com/market-report/indian-paper-pulp-market/29044/#details>. [Accessed 16 Juli 2020].
- [166] Pulp & Paper technology, « Growth factors confronting Indian paper industries », [Online]. Available : <https://www.pulpandpaper-technology.com/articles/indianpulp>. [Accessed 16 Juli 2020].
- [167] Care Ratings, « Indian paper industry – moving out of the woods », 2018.
- [168] Chambre Francaise de commerce et d'industrie du Maroc, « L'industrie du papier et du carton au Maroc : un secteur en cours de structuration », 23 November 2014. [Online]. Available : <https://www.cfcim.org/magazine/21561>. [Accessed 17 Juli 2020].
- [169] Crowe Horwath, « Paper », [Online]. Available : <https://www.crowe.com/eg/industries/paper>. [Accessed 17 Juli 2020].
- [170] A.-S. Martin, « L'industrie du papier : L'activité bridée par la faiblesse des investissements », [Online]. Available : https://www.entreprendre.ma/Industrie-du-papier-l-activite-bridee-par-la-faiblesse-des-investissements_a6078.html. [Accessed 17 Juli 2020].
- [171] Food and Agriculture Organisation of the United Nations, « Forest Products », FAO, Rom, 2017.
- [172] Agence de promotion de l'industrie et de l'innovation, « Les industries diverses en Tunisie », Agence de promotion de l'industrie et de l'innovation, 2014.
- [173] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for the production of pulp, paper and board », European Commission, Luxembourg, 2015.
- [174] M. Hubbe, J. Metts, D. Hermosilla, M. Blanco, L. Yerushalmi, F. Haghghat, P. Lindholm-Lehto, Z. Khodaparast, M. Kamali and A. Elliott, « Wastewater treatment and reclamation : A review of pulp and paper industry practices and opportunities », *BioResources*, vol. 11, no. 3, 2016.
- [175] Umweltbundesamt, « Zellstoff- und Papierindustrie », 24 Februar 2014. [Online]. Available : <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/industriearbeiten/holz-zellstoff-papierindustrie/zellstoff-papierindustrie>. [Accessed 20 Juli 2020].

- [176] P. Bajpai, « Basic overview of pulp and paper manufacturing process », in *Green chemistry and sustainability in pulp and paper Industry*, Cham, Springer, 2015, pp. 11–39.
- [177] A. u. A. e. DWA Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, « Merkblatt DWA-M 731 Abwasser und Abfälle aus der Papierherstellung », DWA, Hennef, 2011.
- [178] P. Pal, « Industry-specific water treatment : Case studies », in *Technology*, Elsevier, 2017, pp. 243–511.
- [179] M. Kamali and Z. Khodaparast, « Review on recent developments on pulp and paper mill wastewater treatment », *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 114, pp. 326–342, 2015.
- [180] M. Cabrera, « Pulp mill wastewater : Characteristics and treatment », in *Biological wastewater treatment and resource recovery*, IntechOpen, 2017.
- [181] S. Lahiry, « India's challenges in waste management », 08 Mai 2019. [Online]. Available : www.downtoearth.org.in/blog/waste/india-s-challenges-in-waste-management-56753. [Accessed 02 Juni 2020].
- [182] S. Kumar, S. Smith, G. Fowler, C. Velis, J. Kumar, S. Arya, R. Kumar and C. Cheeseman, « Challenges and opportunities associated with waste management in India », *Royal Society Open Science*, vol. 4, no. 3, 2017.
- [183] S. Das and B. Bhattacharyya, *Classification and energy recovery from municipal solid waste, generated by greater metropolitan regions of Kolkata, India*, Bombay, 2013.
- [184] S. Wanwari, I. Thakur, V. Vijay and P. Ghosh, « Scenario of landfilling in India : Problems, challenges, and recommendations », in *Handbook of Environmental Materials Management*, Springer, 2018.
- [185] Veolia India, « Landfilling », [Online]. Available : <https://www.veolia.in/our-services/landfilling>. [Accessed 23 September 2020].
- [186] SUEZ India, « Ambition in India », [Online]. Available : <https://www.suez.in/en-in/who-we-are/suez-in-india/our-ambition-in-india>. [Accessed 23 September 2020].
- [187] The Wire, « India imposes complete ban on solid plastic waste imports », 07 März 2019. [Online]. Available : <https://thewire.in/environment/india-solid-plastic-import-banned>. [Accessed 02 Juni 2020].
- [188] SWEEP-Net, « Country report on the solid waste management in Egypt », Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2014.
- [189] SWEEP-Net, « Report on the solid waste management in Morocco », Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2014.
- [190] SWEEP-Net, « Report on the solid waste management in Tunisia », Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2014.
- [191] SWEEP-Net, « Country report on the solid waste management in Jordan », Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit GmbH, 2014.
- [192] A. Abdulrahman, « Solid waste management in Tunisia », 02 Juni 2018. [Online]. Available : www.ecomena.org/solid-waste-management-tunisia/. [Accessed 02 Juni 2020].
- [193] M. Aljaradin, « Solid waste management in Jordan », *International Journal of Academic Research in Business and Social Sciences*, vol. 4, no. 11, 2014.
- [194] Global Recycling, « Morocco : « Huge potential for investment » », [Online]. Available : <https://global-recycling.info/archives/2574>. [Accessed 02 Juni 2020].

- [195] D. Wilson, « Global waste management outlook », United Nations Environment Programme, 2015.
- [196] W. Dachroth, « Deponietechnik », in *Handbuch der Baugeologie und Geotechnik*, Springer, 2017.
- [197] J. Wiszniowski, D. Robert, J. Sumacz-Górska and K. Miksch, « Landfill leachate treatment methods : A review », *Environmental Chemistry Letters*, vol. 4, no. 1, 2006.
- [198] P. Kjeldsen, M. Barlaz, A. Rooker, A. Baun, A. Ledin and T. Christensen, « Present and long-term composition of MSW landfill leachate : A review », *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 32, no. 4, 2002.
- [199] G. Rettenberger, « Deponie », in *Einführung in die Kreislaufwirtschaft*, Springer, 2017.
- [200] P. Kjeldsen, M. Barlaz, A. Rooker, A. Baun, A. Ledin and T. Christensen, « Present and long-term composition of MSW landfill leachate : A review », *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, no. 32 (4), 2002.
- [201] M. Kamaruddin, M. Yusoff, H. Aziz and Y.-T. Hung, « Sustainable treatment of landfill leachate », *Applied Water Science*, vol. 5, 2015.
- [202] S. Aziz, H. Aziz, M. Yusoff and M. Bashir, « Landfill leachate treatment using powdered activated carbon augmented sequencing batch reactor process : Optimization by response surface methodology », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 189, no. 1–2, 2011.
- [203] A. Imai, K. Onuma, Y. Inamori and R. Sudo, « Biodegradation and adsorption in refractory leachate treatment by the biological activated carbon fluidized bed process », *Water Research*, vol. 29, no. 2, 1995.
- [204] J. Bohdziewicz and A. Kwarciak, « The application of hybrid system UASB reactor-RO in landfill leachate treatment », *Desalination*, vol. 222, no. 1-3, 2008.
- [205] W.-Y. Ahn, M.-S. Kang, S.-K. Yim and K.-H. Choi, « Advanced landfill leachate treatment using an integrated membrane process », *Desalination*, vol. 159, no. 1–3, 2002.
- [206] D. Trebouet, J. Schlumpf, P. Jaouen and F. Quemeneur, « Stabilized landfill leachate treatment by combined physicochemical-nanofiltration processes », *Water Research*, vol. 35, no. 12, 2001.
- [207] T. Mariam and L. Nghiem, « Landfill leachate treatment using hybrid coagulation-nanofiltration processes », *Desalination*, vol. 250, no. 2, 2010.
- [208] M. Zolfaghari, K. Jardak, P. Drogui, S. Brar, G. Buelna and R. Dubé, « Landfill leachate treatment by sequential membrane bioreactor and electro-Oxydation processes », *Journal of Environmental Management*, vol. 184, no. 2, 2016.
- [209] C. Di Iaconi, R. Ramadori and A. Lopez, « Combined biological and chemical degradation for treating a mature municipal landfill leachate », *Biochemical Engineering Journal*, vol. 31, no. 2, 2006.
- [210] Z.-p. Wang, Z. Zhang, Y.-j. Lin, N.-s. Deng, T. Tao and K. Zhuo, « Landfill leachate treatment by a coagulation-photoOxydation process », *Journal of Hazardous Materials*, vol. 95, no. 1–2, 2002.
- [211] H.-C. Yoo, S.-H. Cho and S.-O. Ko, « Modification of coagulation and fenton Oxydation processes for cost-effective leachate treatment », *Journal of Environmental Science and Health*, vol. 36, no. 1, 2001.
- [212] P. Goyal, « Press Information Bureau », 05 Februar 2020. [Online]. Available : <https://pib.gov.in/PressReleaseDetail.aspx?PRID=1602006>.
- [213] Centre for Science and Environment, « India Environmental Portal », 25 August 2020. [Online]. Available : <http://www.indiaenvironmentportal.org.in>.

- [214] IGEP, « Common Effluent Treatment Plants : Overview, Technologies and Case Examples », GIZ, New Delhi, 2015.
- [215] Government of India, « National Green Tribunal », 2019. [Online]. Available : <https://greentribunal.gov.in/>.
- [216] R. Arezki and F. Belhaj, « Developing Public-Private Partnership Initiatives in the Middle East and North Africa », World Bank Group, Washington D.C., 2019.
- [217] UNIDO, « Industrial Development Report 2018 », United Nations, Vienna, 2017.
- [218] S. ElMassah, « Industrial symbiosis within eco-industrial parks : Sustainable development for Borg El-Arab in Egypt », *Business strategy and the environment*, pp. 884–892, 2018.
- [219] M. Ben Hamida, « Global Recycling », 25 August 2020. [Online]. Available : <https://global-recycling.info/archives/1465>.
- [220] T. Zheng, J. Wang, Q. Wang, C. Nie, N. Smale, Z. Shi and W. Xiaona, « A bibliometric analysis of industrial wastewater research : current trends and future prospects », *Scientometrics*, pp. 863–882, 2015.
- [221] European Commission, « Best Available Techniques Reference Document for common wastewater and waste gas treatment/management systems in the chemical sector », European Commission, Luxembourg, 2016.
- [222] S. Sa'ad, R. Zailan, S. Wan Alwi, J. Lim and Z. Manan, « Towards water integration in eco-industrial park : An overview of water recovery from industries », *Materials Science and Engineering*, no. 702, 2019.
- [223] S. Bauer, A. Dell, J. Behnisch, H. Chen, X. Bi, C. Nguyen, H. Linke and M. Wagner, « Water-reuse concepts for industrial parks in water-stressed regions in South East Asia », *Water Supply*, vol. 20, no. 1, 2020.
- [224] European Commission, « Reference Documents », [Online]. Available : <https://eippcb.jrc.ec.europa.eu/reference>. [Accessed 03 August 2020].
- [225] T. Tong and M. Elimelech, « The global rise of zero liquid discharge for wastewater management : Drivers, technologies, and future directions », *Environmental Science & Technology*, vol. 50, no. 13, 2016.
- [226] M. Weber, « Leitfaden Ressourceneffizienz », VDI Zentrum für Ressourceneffizienz, 2019.
- [227] A. Ante, J. Behrendt, H. Bennemann, C. Blöcher, P. Bolduan, S.-U. Geißen, H. Horn, R. Krull, P. Kunz, J. Marzinkowski, S. Neumann, V. Oles, W. Rösler, E. Rother, K.-W. Schramm, M. Sievers, U. Szewzyk, T. Track, I. Voigt and H. Wienands, « Trends and Perspectives in Industrial Water Treatment », DECHEMA e. V., Frankfurt am Main, 2017.
- [228] M. Onischka, M. Ritthoff and C. Liedtke, « Instrumentenwegweiser zur Steigerung der Ressourceneffizienz », Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, 2008.
- [229] German Water Partnership, « Wasser 4.0 – Made in Germany », German Water Partnership e. V., Berlin, 2019.
- [230] A. Ante, H. Bennemann, C. Blöcher, M. Engelhart, B. Fitzke, S.-U. Geißen, M. Hauswirth, M. Kozariszczuk, J. Leonhäuser, E. Rother, G. Sagawe, U. Schließmann, T. Track, A. Willner and C. Ziemer, « Positionspapier Industriewasser 4.0 », Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e. V., Frankfurt am Main, 2018.

Mentions légales

Éditeur et rédaction :

German Water Partnership e. V.
Reinhardtstraße 32
10117 Berlin, Allemagne
+49 (0)30 300199-1220
info@germanwaterpartnership.de
www.germanwaterpartnership.de

Auteurs (facultatif)

Lena Heinrich, Dr Bastian Piltz et Dr Thérèse Krahnstöver
Isle Utilities GmbH pour German Water Partnership e. V.
Le contenu de cette publication n'engage que la responsabilité des auteur(e)s.

Conception

www.corporate-new.de

Mise à jour

Novembre 2021

Sources des images

ANDRITZ: p. 46, 47 · A.T.E. HUBER Envirotech Private Limited: p. 38, 39, 60, 61
BMU/photothek/Thomas Trutschel: p. 4 · CERAFILTEC Germany GmbH: p. 63
enviplan Ingenieurgesellschaft mbH: p. 56, 57 · EnviroChemie GmbH: p. 45, 58, 59
FUCHS Enprotec GmbH: p. 96, 97 · German Water Partnership e. V.: p. 5, 9, 10, 12, 13
i+M GmbH & Co.KG: p. 83 · Jäger Umwelt-Technik GmbH: p. 104, 105
JUMO GmbH & Co. KG: p. 72, 73 · Lanxess Deutschland GmbH: p. 30, 31
MANN+HUMMEL: p. 21 · PWT Wasser- und Abwassertechnik GmbH: p. 55, 107
REMONDIS Aqua Industrie GmbH & Co. KG: p. 29 · shutterstock: p. 1
Siemens AG: p. 108 · stock.adobe.com: p. 12, 14, 16, 18, 22, 24, 25, 32, 34, 37, 40, 42,
43, 48, 50, 52, 64, 66, 69, 71, 74, 77, 81, 84, 86, 90, 98, 101, 111

En coopération avec

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Projet mondial « Soutien de l'initiative d'exportation des technologies environne-
mentales » (Unterstützung der Exportinitiative Umwelttechnologien (BMU))
Köthener Str. 2
10963 Berlin, Allemagne
+49 (0)30 338 424 646
markus.luecke@giz.de
www.giz.de
<https://www.giz.de/de/weltweit/78869.html>

Le projet mondial fait partie de l'initiative d'exportation
des technologies environnementales du BMU.
www.exportinitiative-umweltschutz.de



On behalf of:



of the Federal Republic of Germany

