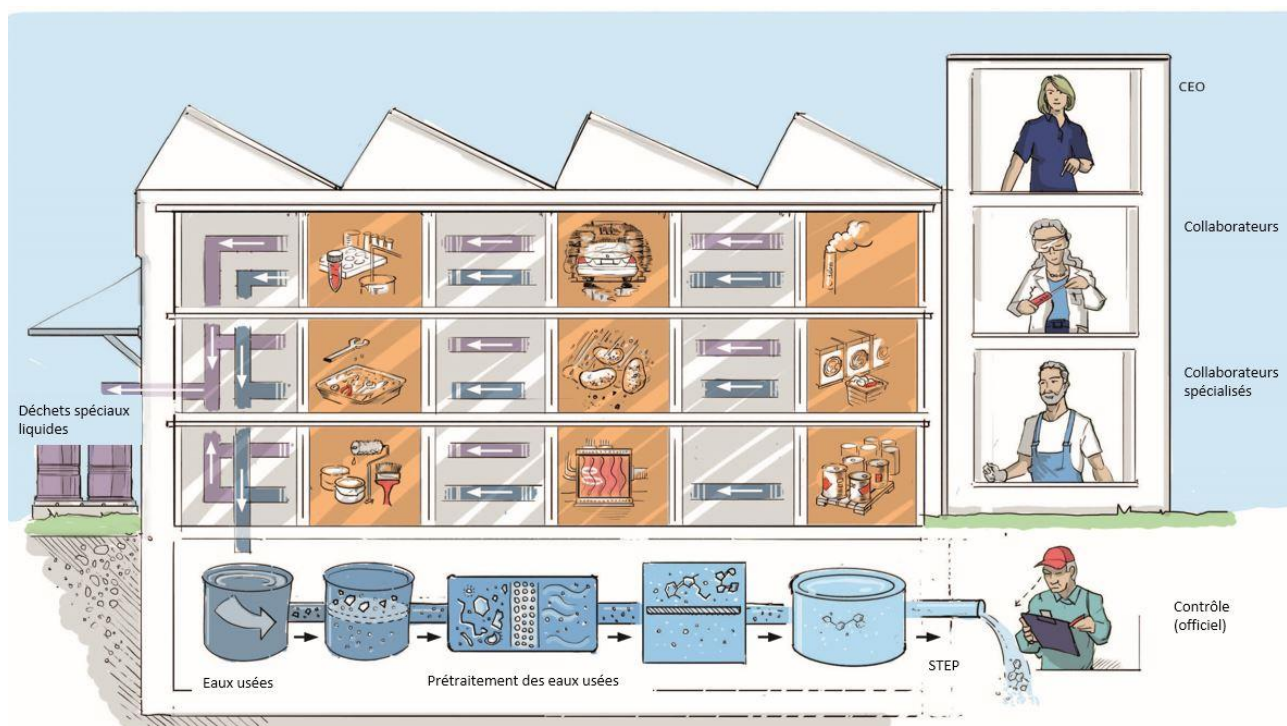


EAUX USÉES INDUSTRIELLES : POSSIBILITÉS DE TRAITEMENT



Mentions légales

La présente publication a été élaborée avec le plus grand soin et en toute bonne foi. Cependant, nous ne pouvons offrir aucune garantie concernant l'intégralité, l'exactitude et l'actualité du contenu. Toute prétention en responsabilité pour dommages matériels ou immatériels consécutifs à l'utilisation de la présente publication est exclue.

Auteurs

Pascal Wunderlin, Plateforme VSA « Techniques de traitement des micropolluants », Glattbrugg
Fabienne Eugster, Plateforme VSA « Techniques de traitement des micropolluants », Glattbrugg

Élaboration des bases techniques des procédés

F. Rey, EnviroChemie AG, Eschenbach
N. Siegenthaler, EnviroChemie AG, Eschenbach

Groupe d'expertes et d'experts

C. Arnold, Syngenta, Monthey (anciennement Lonza, Visp / scienceindustries, Zurich)
A. Buss, AUE, Baselland, Liestal
S. Bitterwolf, Kuster+Hager Ingenieurbüro AG, Saint-Gall
R. Däppen, anciennement BASF Suisse SA, Bâle
P. Foa, TBF + Partner AG, Lugano
H. Färber, Färber & Schmid AG, Dietikon
R. Kottelat, ESCO conseil, Yverdon-les-Bains
L. Kren, scienceindustries, Zurich
S. Lehmann, OFEV, Berne
M. Lambert, CSD Engineers, Lausanne
A.-K. McCall, OST, Rapperswil
B. Mancini, BVU, Aarau
M. Mettler, AfU, Herisau
J. Muff, ecoSign, Rheinfelden
M. Mattle, Holinger SA, Lausanne
M. Ratkovic, EnviroChemie AG, Eschenbach
J.M. Stoll, OST, Rapperswil
M. Schärer, OFEV, Berne
Th. von Kürten, AFRY Suisse SA, Zurich
Th. Wintgens, RWTH, Aix-la-Chapelle (auparavant à la FHNW, Muttentz)
S. Zimmermann-Steffens, OFEV, Berne

Remerciements

Nous remercions toutes les personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre à l'élaboration de ce rapport.

Éditeur

Verband Schweizer Abwasser- und Gewässerschutzfachleute
Association suisse des professionnels de la protection des eaux
Associazione svizzera dei professionisti della protezione delle acque

Photo de couverture, illustrations

Zeichenfabrik, Roland Ryser, Zurich

Source

VSA, Europastrasse 3, Postfach, CH-8152 Glattbrugg,
Téléphone 043 343 70 70, sekretariat@vsa.ch, www.vsa.ch

Citation

Wunderlin, P., Eugster, F. (2022). Les eaux usées industrielles et leur traitement. Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA), Glattbrugg

SOMMAIRE

Résumé	6
1 Contexte	7
1.1 Différents types d'eaux usées sont produits	7
1.2 Différents types de traitement nécessaires	7
1.3 Avez-vous besoin d'aide pour choisir un procédé de traitement ?	7
2 Procédés mécaniques et physiques	9
2.1 Séparateur d'hydrocarbures (séparateur par coalescence/gravité)	9
2.2 Séparation physicochimique des émulsions	10
2.3 Séparateur de graisses	11
2.4 Piège à boues, collecteur de boue	11
2.5 Bassin de décantation	12
2.6 Tamisage	12
2.7 Filtration	13
2.8 Flottation	13
2.9 Filtration membranaire	14
2.10 Adsorption	14
2.11 Évaporation/rectification	15
2.12 Extraction liquide/liquide	16
2.13 Incinération des eaux usées	16
2.14 Échangeurs d'ions	16
2.15 Stripage	17
2.16 Électrolyse/électrodialyse	17
2.17 Inactivation d'eaux usées contaminées biologiquement	18
Procédés mécaniques et physiques et évaluation de leur efficacité sur différentes substances cibles	19
3 Procédés chimiques	20
3.1 Neutralisation	20
3.2 Précipitation (avec complexation)	21
3.3 Floculation	22
3.4 Oxydation	22
3.5 Réduction	23
Procédés chimiques et évaluation de leur efficacité sur différentes substances cibles	25
4 Procédés biologiques	26
4.1 Traitement aérobie des eaux usées	27

4.2	Traitement anaérobie des eaux usées	28
	Procédés biologiques et évaluation de leur efficacité sur différentes substances cibles	30
5	Aspects propres à tous les procédés	31
6	Bonnes pratiques	32

RÉSUMÉ

Les entreprises industrielles et artisanales épurent leurs eaux usées avant de les rejeter dans la canalisation. Cela est nécessaire pour respecter les exigences légales et protéger les eaux. Cela correspond à un traitement à la source. L'avantage est que les substances à éliminer sont présentes sous forme concentrée, ce qui permet un traitement efficace et peu coûteux.

Il est important que les entreprises appliquent l'état de la technique actuel. Or, celui-ci n'est pas documenté au niveau suisse. De plus, les possibilités de traitement sont multiples et le choix au cas par cas est difficile. Le présent rapport offre une aide à cet égard et s'adresse en particulier aux entreprises et aux autorités.

Le rapport distingue entre les procédés mécaniques et physiques, les procédés chimiques et les procédés biologiques, en fonction de leur mode d'action. Pour chaque procédé, le rapport décrit son fonctionnement, les coûts d'exploitation et donne des exemples de secteurs typiques où il est appliqué. La capacité de chaque procédé à éliminer les composants des eaux usées est également évaluée. Les substances organiques synthétiques, appelées micropolluants, ont aussi été prises en compte.

Les procédés les plus divers permettent d'éliminer les micropolluants des eaux usées et sont utilisés dans certaines entreprises. Chez la plupart d'entre elles, le traitement des eaux usées n'est cependant pas axé sur les micropolluants¹. A l'avenir, les micropolluants doivent donc être pris en compte, notamment lors de la planification, conception, surveillance et optimisation du traitement des eaux usées dans les entreprises. Il est également important que les entreprises industrielles et artisanales exploitent et entretiennent correctement ces installations et surveillent l'effet d'épuration à l'aide de méthodes appropriées.

¹ Wunderlin, P., Gulde, R. (2022). Analyse de situation « Apports de substances issues de l'industrie et de l'artisanat dans les eaux ». Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA), Glattbrugg.

1 CONTEXTE

Les entreprises industrielles et artisanales épurent leurs eaux usées avant de les rejeter dans la canalisation. Cela est nécessaire pour respecter les exigences légales et protéger les milieux aquatiques. Les possibilités de traitement sont toutefois multiples et le choix au cas par cas est exigeant.

Le présent rapport a pour but d'aider les entreprises et les autorités à choisir les possibilités de traitement adaptées à chaque cas.

1.1 Différents types d'eaux usées sont produits

Les entreprises industrielles et artisanales produisent différents types d'eaux usées. Les entreprises répertorient ces eaux usées et les évaluent en fonction des composants réglementés par la loi ainsi que d'éventuelles directives internes. Des critères importants servant à la classification des eaux usées sont les suivants :

- Quel est le degré de pollution ?
- Quelle est la composition de l'eau usée: contient-elle des substances organiques ? Y a-t-il des substances inorganiques ?
- Les eaux usées gênent-elles ou perturbent-elles le fonctionnement de la station d'épuration communale ?
- Quelles sont les prescriptions légales et internes ?
- Une réutilisation interne de l'eau est-elle possible ?

A l'aide de cette classification, les entreprises déterminent, en collaboration avec les autorités compétentes, quelles eaux usées doivent être traitées et comment.

1.2 Différents types de traitement nécessaires

Dans la plupart des cas, les entreprises rejettent leurs eaux usées dans les égouts publics. Il y a donc un traitement supplémentaire des eaux usées par la station d'épuration communale. Lorsque les eaux usées ne sont pas polluées, il est possible de les infiltrer ou de les déverser directement dans les eaux. Cela doit toutefois être vérifié et autorisé au cas par cas par l'autorité compétente.

Les entreprises traitent leurs eaux usées avant de les rejeter dans les égouts publics lorsque celles-ci ne respectent pas les normes de l'annexe 3.2 de l'OEaux. Dans ce cas, on parle de "traitement à la source". Les substances n'y sont pas encore diluées avec d'autres eaux usées et composées. Cela permet un traitement à la source efficace et économique. Il est important que les entreprises utilisent les procédés de traitement les plus modernes. Ceux-ci doivent correspondre à ce que l'on appelle « l'état de la technique² ». Dans certains cas, il est très difficile de déterminer un type de traitement, car l'état de la technique n'est pas documenté en Suisse.

1.3 Avez-vous besoin d'aide pour choisir un procédé de traitement ?

Alors vous êtes au bon endroit. Le texte suivant donne en effet un aperçu des procédés de traitement établis. Il aborde notamment leur fonctionnement et mentionne les points importants à prendre en compte lors de la mise en œuvre. Pour chaque type de traitement, il est en outre indiqué quelles substances contenues dans les eaux usées peuvent être ainsi éliminées (désignées dans le rapport comme "substances cibles"). Un accent spécifique est mis sur les substances organiques de synthèse - appelées micropolluants – qui sont produits, traités, employés

² L'état de la technique au sens de l'annexe 3.2, ch. 1, al. 2, OEaux désigne un certain niveau technologique avec un état de développement progressif qui évolue au fil du temps. Les procédés techniques doivent avoir fait leurs preuves dans la pratique ou être réalisables en toute sécurité dans la pratique. En outre, les procédés doivent être économiquement viables. Cela n'est pas identique à l'acceptabilité économique individuelle - c'est-à-dire que la mise en œuvre doit être évaluée au cas par cas.

ou éliminés dans les entreprises (voir encadré). En effet, ces substances devront à l'avenir être davantage prises en compte pour le choix du traitement des eaux usées³.

Le contenu du rapport s'appuie sur les documents du cours VSA module 2 « Eaux usées industrielles et déchets industriels⁴ ». En complément, un atelier a été organisé avec des experts des services cantonaux, de l'industrie ainsi que des bureaux de planification et de conseil afin de concrétiser davantage les contenus. Pour des informations complémentaires et approfondies sur les différents types de traitement, il convient de se référer à la littérature spécialisée (p. ex.^{5,6,7}).

Que sont des micropolluants ?

Le rapport se concentre sur la pollution des eaux par des substances organiques de synthèse provenant d'entreprises industrielles et artisanales. On entend par là les produits chimiques fabriqués, traités, utilisés ou éliminés par les entreprises. Ces substances peuvent être déversées dans les milieux aquatiques avec les eaux usées épurées de l'entreprise via la STEP ou, en cas de fortes pluies, via les déversoirs d'orage existants. Ces substances y sont présentes en faibles concentrations : de l'ordre du microgramme par litre ($\mu\text{g/L}$) ou nanogramme par litre (ng/L). C'est pourquoi ces substances sont appelées « micropolluants » ou « composés traces organiques ». Le présent rapport utilise le terme de « micropolluants ».

³ Wunderlin, P., Gulde, R. (2022). Analyse de situation « Apports de substances issues de l'industrie et de l'artisanat dans les eaux ». Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA), Glattbrugg.

⁴ Cours VSA F2, Exploitation et maintenance d'installations de prétraitement des eaux usées complexes. Cours VSA module 2 « Eaux usées industrielles et déchets industriels », Tschuppert E., Association suisse des professionnels de la protection des eaux, juin 2005

⁵ Hartinger Handbuch Abwasser- und Recyclingtechnik, 3^e édition entièrement remaniée, 2017.

⁶ Stand der Abwassertechnik in verschiedenen Branchen: Forschungsbericht 102 06 226, Band 1, Karl-Ulrich Rudolph, Karl-Erich Köppke, Joachim Korbach, Umweltbundesamt, 1995.

⁷ Förtsch und Meinholz (2014). Handbuch betrieblicher Gewässerschutz, ISBN 978-3-658-03323-1.

2 PROCÉDÉS MÉCANIQUES ET PHYSIQUES

Des procédés mécaniques et physiques sont utilisés lorsque les substances à éliminer peuvent être facilement séparées des eaux usées grâce à leurs propriétés, telles que la densité ou la granulométrie. Les substances ne sont ni modifiées ni détruites. Les eaux usées sont souvent pré-traitées à l'aide de procédés mécaniques et physiques, car les substances éliminées par ce biais peuvent affecter aussi bien le réseau d'égouts que les étapes de traitement suivantes. Des procédés mécaniques et physiques sont souvent combinés à des procédés chimiques (voir chapitre 3) dans le prétraitement des eaux usées industrielles. Ainsi, une étape permettant de séparer les produits de précipitation et de floculation doit être installée en aval d'une précipitation et d'une floculation (p. ex. filtre-pressé à chambre, filtre à bandes).

Les procédés mécaniques et physiques suivants sont décrits dans le présent chapitre (voir également Tableau 1).

Élimination de graisses et d'hydrocarbures :

- Séparateur d'hydrocarbures (séparateur par coalescence/gravité)
- Séparation physicochimique des émulsions
- Séparateur de graisses

Élimination de particules et de substances solides, ainsi que des substances sorbées dessus :

- Bassin de décantation/piège à boues
- Tamisage
- Filtration
- Flottation

Procédés ayant une efficacité à large spectre :

- Procédé à membranes (nanofiltration)
- Adsorption
- Évaporation/rectification
- Extraction liquide/liquide
- Incinération des eaux usées

Autres procédés peu répandus dans le domaine du traitement des eaux usées industrielles :

- Échangeurs d'ions
- Stripage
- Électrolyse, électrodialyse
- Inactivation thermique des eaux usées

2.1 Séparateur d'hydrocarbures (séparateur par coalescence/gravité)

Un séparateur d'hydrocarbures permet de séparer des eaux usées des substances insolubles et flottantes telles que des hydrocarbures, des huiles, des graisses ainsi que de l'essence et du diesel. Un séparateur par coalescence a généralement un rendement d'épuration supérieur à un séparateur d'hydrocarbures. Ces deux procédés sont efficaces et faciles à exploiter et fournissent une contribution importante à la protection des eaux.

Dans le séparateur d'hydrocarbures, les substances (liquides très fluides tels que l'essence ou d'autres huiles minérales) sont séparées des eaux usées grâce à leur faible densité. Selon l'origine des eaux usées et le processus employé, de l'huile libre peut se retrouver dans les eaux usées et doit être retenue le plus possible à la source. Grâce à leur densité plus faible que l'eau, les substances huileuses qui doivent être séparées s'accumulent à la surface des eaux usées dans le séparateur à faible courant. L'huile ainsi capturée doit être pompée en fonction de la quantité produite. L'eau exempte d'huile est ensuite acheminée dans les égouts avec l'effluent. Selon le type et l'équipement du séparateur d'hydrocarbures, l'écoulement se ferme automatiquement dès qu'une certaine quantité d'huile minérale se trouve dans le séparateur. Cela est par exemple nécessaire dans les stations-service, afin qu'elle ne puisse pas parvenir dans les égouts en cas de fuite importante de carburants.

Les séparateurs par coalescence présentent un degré de séparation plus élevé que les séparateurs d'hydrocarbures. Ils sont généralement installés à l'arrière du séparateur, afin que les eaux usées contenant de l'huile résiduelle le traversent. Des gouttelettes d'huile se déposent sur le média filtrant en traversant le filtre coalescent. De fines gouttelettes d'huile à flottabilité réduite sont retenues dans le filtre coalescent et s'unissent à d'autres gouttelettes qui le traversent (coalescence). Lorsqu'un nombre suffisant de fines gouttelettes d'huile se sont réunies, elles remontent à la surface des eaux usées et peuvent être évacuées du système avec les autres liquides captés. L'utilisation de tensioactifs affecte l'efficacité du séparateur par coalescence, car les substances à séparer sont stabilisées dans la solution par les tensioactifs. Il convient toutefois de noter que les substances cibles sont difficiles à éliminer avec des émulsions stables. Cela vaut pour les deux procédés.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Liquides très fluides tels que l'essence, les huiles (minérales) et les graisses et les substances contenues telles que des hydrocarbures aromatiques, aliphatiques ou chlorés
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Piège à boues/sédimentation, séparation physicochimique des émulsions (si les substances sont présentes sous une forme émulsionnée)
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme faibles; traitement ultérieur/élimination des substances/liquides retenus
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Centres d'entretien, entreprise de traitement de déchets, entreprises automobiles/garages, stations-service

2.2 Séparation physicochimique des émulsions

La séparation physicochimique des émulsions est utilisée pour éliminer des substances émulsionnées, telles que de l'huile ou des solvants. Pour ce faire, une poudre séparatrice composée notamment de bentonite et d'un agent flocculant (polyacrylate) est mélangée aux eaux usées. Cela conduit à la formation de floccs de boue qui lient les substances émulsionnées et les éliminent des eaux usées. Un traitement supplémentaire des eaux usées avec du charbon actif permet également d'éliminer les biocides dissous de manière efficace⁸. La séparation physicochimique des émulsions est proposée sur le marché sous forme d'installations compactes appelées séparateurs. La variante classique est composée d'un réacteur dans lequel une précipitation, une floculation et parfois aussi une neutralisation sont effectuées. Les matières solides sont retenues via un filtre placé en aval (p. ex. filtre à bandes, filtre à poche, clarificateur incliné).

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Substances émulsionnées (huiles, hydrocarbures, solvants, colorants), parfois aussi métaux (lorsque l'augmentation de pH due à l'ajout de poudre séparatrice est suffisante pour précipiter les métaux)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Précipitation/floculation, neutralisation, séparation de matières solides
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme faibles; traitement ultérieur/élimination des substances séparées, remplissage périodique du séparateur

⁸ Burkhardt, M., Englert, A. (2016). Verfahrensklä rung zur Behandlung von Abwasser der Farb- und Putzhersteller (FARBAB). Bericht für AWEL Amt für Abfall, Wasser, Energie, Luft. HSR Rapperswil, S. 34.

Branches cibles

- Entreprises de peinture, garages/entreprises automobiles/sociétés de transport (en cas de nettoyage de moteurs/châssis), fabricants de colorants/peinture, entreprises d'ébavurage

2.3 Séparateur de graisses

Un séparateur de graisses permet de retenir des particules de graisse et d'huile d'origine animale et végétale. Ces particules peuvent s'accumuler sur les parois froides des tuyaux, s'y incruster et provoquer des obturations. Lorsque des huiles et des graisses séjournent dans les égouts pendant une durée prolongée, cela peut engendrer l'émanation d'odeurs désagréables et/ou provoquer la corrosion de matériaux non résistants aux acides gras en raison de l'agressivité de ces derniers. Un séparateur de graisses est composé d'un conteneur, dans lequel les eaux usées sont déversées. Les graisses flottent à la surface de l'eau en raison de leur faible densité et de leurs propriétés hydrophobes. Une diminution de la température permet d'améliorer l'efficacité de la séparation des graisses (dont la solubilité dépend fortement de la température). D'autres substances, comme les restes alimentaires, s'accumulent au fond du piège à boues. Le VSA a élaboré un aide-mémoire sur le thème du séparateur de graisses⁹.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none">• Substances lipophiles
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none">• Sédimentation, piège à boues
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Considérés comme faibles; traitement ultérieur/élimination des graisses séparées et des boues produites
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none">• Gastronomie, industrie alimentaire

2.4 Piège à boues, collecteur de boue

Le piège à boues permet de séparer des impuretés minérales, telles que le sable et le gravier. Il est souvent utilisé lors de l'évacuation des eaux d'aires de lavage et du nettoyage de véhicules. Les collecteurs de boue sont généralement équipés d'un coude plongeur qui permet de retenir les substances huileuses. Les collecteurs de boue sont utilisés dans les systèmes d'évacuation des eaux de chaussée.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none">• Substances lipophiles
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none">• Sédimentation, piège à boues
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Considérés comme faibles; traitement ultérieur/élimination des graisses séparées et des boues produites
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none">• Garages, entreprises automobiles/sociétés de transport (aires de lavage) ; évacuation des eaux de chaussée

⁹ Aide-mémoire du VSA « Séparateurs de graisses ». <https://vsa.ch/fr/Médiathèque/separateurs-de-graisses-aide-memoire-du-vsa/> [7.2.2020].

2.5 Bassin de décantation

La sédimentation est utilisée dans toutes les branches lorsque des substances particulières se déposent dans des eaux calmes après un temps de séjour prolongé. Le cheminement des eaux usées est généralement conçu de manière à ce que les matières solides contenues dans les eaux usées puissent précipiter et être évacuées sous une forme concentrée. Selon l'espace disponible, des bassins de sédimentation conventionnels (bassins longitudinaux et circulaires) ou des clarificateurs inclinés (surfaces de sédimentation agrandies par des lamelles) sont utilisés. En ce qui concerne les clarificateurs inclinés et à lamelles, le rendement peut être amélioré grâce à l'ajout de précipitants et de flocculants. Le sol des bassins de sédimentation de petite taille dispose d'entonnoirs, dans lesquels les substances particulières sédimentées s'accumulent et peuvent être évacuées avec des dispositifs d'extraction appropriés. Les bassins de sédimentation de grande taille possèdent en plus des racleurs qui amènent la boue sédimentée jusqu'à l'entonnoir.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none">• Substances particulières, sédimentables (organiques/anorganiques) et substances qui y adhèrent (p. ex. métaux lourds, phosphates)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none">• Précipitation/floculation
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Considérés comme faibles; traitement ultérieur/élimination des boues produites
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none">• Toutes branches confondues (p. ex. branche de l'alimentation, plus particulièrement les entreprises productrices de légumes ; évacuation des eaux de chantier ; stations d'épuration)

2.6 Tamisage

Le tamisage permet de séparer des substances particulières grossières, qui n'auront ainsi pas à être éliminées lors des étapes de traitement ultérieures des eaux usées. Le tamisage est utilisé lorsque les substances particulières peuvent être facilement séparées des eaux usées à l'aide d'un tamis. L'avantage est le suivant : en s'accumulant, la matière tamisée peut être directement évacuée sous forme concentrée. Différentes variantes peuvent être employées selon le type et la taille des substances, le degré de séparation requis, le processus de production en amont et les autres substances contenues dans les eaux usées (p. ex. tamis à tambour, tamis courbé, tamis vibrant).

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none">• Substances particulières grossières et les substances qui y adhèrent
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none">• Indispensable la plupart du temps, car il y a un risque de dépôts et de colmatage (p. ex. de conduites, cuves de pompes, membranes d'ultrafiltration), mais également neutralisation (variations de pH dues aux produits de nettoyage)
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Considérés comme faibles; traitement ultérieur/élimination des matières tamisées
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none">• Entreprises de traitement de déchets, industrie alimentaire

2.7 Filtration

Dans le cas de la filtration, différentes technologies (tamis à tambour, tamis courbé, filtre à sable, etc.) et matériaux filtrants peuvent être utilisés. (i) La granulométrie des substances à filtrer, (ii) le volume d'eaux usées à filtrer, et (iii) les valeurs de sortie requises après la filtration jouent toutefois un rôle déterminant dans le choix du procédé et du matériau filtrant. Lors de la filtration, les eaux usées sont dirigées vers le média filtrant par gravité ou pompage. Ce faisant, les particules plus grandes que les pores du média filtrant sont retenues. Selon le procédé, les filtres utilisés sont rétrolavés ou renouvelés après utilisation. La filtration est généralement la dernière étape du prétraitement des eaux usées (p. ex. après la précipitation/floculation).

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none">• Substances en suspension et substances qui y adhèrent
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none">• Généralement obligatoire, pour un fonctionnement en tant qu'étape d'épuration finale (p. ex. après la précipitation/floculation ou après l'étape de traitement biologique)
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Considérés comme faibles; traitement ultérieur/élimination des substances filtrées et de l'eau de rétrolavage générée
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none">• Toutes branches confondues (p. ex. tamis vibrant pour les eaux usées de blanchisserie)

2.8 Flottation

La flottation permet de séparer de fines substances particulières (mais également des substances et des liquides dont la densité est inférieure à celle de l'eau) des eaux usées par moussage ou flottabilité (cela peut également être intéressant avec des substances solides organiques légères). Une partie centrale de ce procédé est la formation de fines bulles d'air, qui se déposent sur la surface des substances à éliminer et augmentent leur flottabilité, améliorant ainsi la performance de séparation. Selon le mode opératoire, il se forme à la surface de l'eau un mélange d'air et de matières solides (produit de flottation), qui est évacué à l'aide de racleurs. L'efficacité du procédé peut être améliorée grâce à l'ajout d'agents précipitants et floculants. Il existe trois types différents de flottation en fonction de la production de bulles de gaz. Il s'agit de la flottation par agitation, l'électroflottation et la flottation à air dissous.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none">• Particules organiques légères et flottables telles que des huiles et des graisses et les substances qu'elles contiennent ; matières solides fines ; plus rarement hydroxydes de métaux lourds, et graisses et protéines utilisées dans l'industrie alimentaire
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none">• Précipitation/floculation
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Considérés comme moyens; traitement ultérieur/élimination de boues (odeurs parfois très fortes)
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none">• Industrie alimentaire (grandes entreprises), entreprises de traitement de déchets

2.9 Filtration membranaire

La filtration membranaire est un procédé très largement utilisé, qui peut être combiné avec d'autres procédés. La filtration membranaire peut être subdivisée en microfiltration (> 0.1 µm) et ultrafiltration (> 10-100 nm) selon la taille des pores. La nanofiltration et l'osmose inverse utilisent des membranes de diffusion. La microfiltration et l'ultrafiltration consistent à séparer des matières solides et des bactéries. L'ultrafiltration constitue par ailleurs une barrière absolue contre les virus. La nanofiltration permet de retenir des macromolécules et des ions bivalents, tandis que tous les ions (> 99 %) peuvent être éliminés des eaux usées à purifier à l'aide de l'osmose inverse. En principe, la règle est la suivante : plus les pores de la membrane sont petits, plus la préfiltration doit être efficace ; une osmose inverse ne peut pas être alimentée directement avec des eaux usées contenant des matières solides, car des substances telles que des huiles, des graisses ou des particules peuvent obstruer la membrane. Dans la pratique, différents procédés à membranes sont souvent exploités en série. L'une des applications les plus courantes est l'ultrafiltration combinée à l'osmose inverse ; la première sépare les matières solides pour éviter l'encrassement de la membrane de l'osmose inverse. L'osmose inverse réduit la teneur en ions et en sel des eaux usées traitées. Cela permet d'obtenir une eau hautement purifiée. En ce qui concerne le concentrat, il faut veiller à ce qu'il ne génère aucune précipitation d'agents de dureté (calcium, magnésium). Cela peut être empêché grâce à un adoucissement préalable des eaux usées à traiter (p. ex. à l'aide d'un échangeur d'ions ; voir plus bas) ou par l'ajout d'un antitartre (p. ex. acides polyacryliques, phosphonate). L'exploitation d'une filtration membranaire peut se révéler très onéreuse selon la composition des eaux usées.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Efficacité à large spectre (selon le type de membrane) : matières solides, bactéries, virus, molécules, ions (métaux lourds)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • La plupart des applications nécessitent une préfiltration, selon la technologie (ultrafiltration jusqu'à osmose inverse) et un adoucissement ; traitement biologique
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme moyens (exploitation plus onéreuse selon la composition des eaux usées); traitement ultérieur/élimination des concentrats
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Toutes branches confondues (p. ex. branche chimique et pharmaceutique) ; utilisation en cas de recirculations (p. ex. branche métallurgique) ; ultrafiltration dans les garages/entreprises automobiles/sociétés de transport (séparation des huiles émulsionnées)

2.10 Adsorption

Les procédés par adsorption éliminent les substances organiques des eaux usées en grande partie par adsorption. Pour ce faire, des adsorbants spécifiques (p. ex. résine adsorbante, hydroxyde de calcaire/fer ou zéolite pour les métaux lourds) ou du charbon actif sont utilisés. Certains adsorbants sont spécifiquement utilisés pour l'adsorption sélective de polluants spécifiques, tandis que le charbon actif est souvent employé pour une adsorption non sélective (efficacité à large spectre). Selon l'usage prévu, différents types de charbon actif de différente répartition granulométrique sont utilisés (sous forme de poudre ou de grains). Le charbon actif en poudre peut être mélangé aux eaux usées dans les réacteurs, mais il doit ensuite être à nouveau séparé de manière efficace. Le charbon actif en grains peut être utilisé dans des filtres fermés ou des bassins filtrants et est régénéré après épuisement de la capacité d'adsorption. Le charbon actif est largement utilisé, toutes branches confondues.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> Matières organiques réfractaires (notamment les micropolluants), divers hydrocarbures (HPA, BTX, HCC, AOX), colorants/pigments, phénols, métaux lourds (hydroxyde de calcium/fer, zéolite)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> Échangeur d'ions, procédés à membranes, procédés d'oxydation
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> Considérés comme moyens ; le matériau adsorbant doit être échangé ou régénéré périodiquement
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> Toutes branches confondues (p. ex. industrie chimique et pharmaceutique)

2.11 Évaporation/rectification

Lors de l'évaporation, une partie des eaux usées (ou du solvant à récupérer) est convertie à l'état gazeux (généralement à des températures comprises entre 40 à 90 °C). Ce faisant, il est crucial que les substances à éliminer des eaux usées (p. ex. sels, matières organiques) aient une pression de vapeur plus faible que l'eau, afin de ne pas passer dans la phase gazeuse dans les conditions qui prévalent. Des mélanges ou substances, qui ne peuvent pas être concentrés avec d'autres technologies, sont ainsi condensés et la quantité d'eaux usées à éliminer est réduite au minimum (est plus particulièrement utilisé avec de faibles volumes d'eaux usées afin de réduire le volume de déchets ; p. ex. dans les petites entreprises de galvanisation). Les évaporateurs fonctionnent à la vapeur ou l'électricité. Avec les compresseurs de vapeur, une grande partie de l'énergie peut être récupérée grâce à la compression des vapeurs et réutilisée pour l'évaporation. L'évaporation des eaux usées nécessite beaucoup d'énergie, son fonctionnement est donc onéreux : il existe de grandes différences en matière de consommation d'énergie selon le procédé et le nombre d'étapes de l'évaporateur ; à titre indicatif, il faut compter une consommation d'énergie de 35-70 kW/m³ avec un petit évaporateur (10 m³/h). Des tensioactifs peuvent perturber le fonctionnement, car de la mousse peut être emportée lors de l'évaporation. Cela peut être partiellement évité grâce à l'utilisation d'un agent antimoussant. Le distillat produit peut être réutilisé.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> Eaux usées fortement polluées, sels, eaux usées contenant de l'huile, hydrocarbures, substances organiques (notamment micropolluants)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> Procédé à membranes
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> Considérés comme élevés; les eaux usées condensées et concentrées doivent être traitées (en externe) (souvent par le biais d'une incinération)
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> Industrie galvanique (petites entreprises), industrie minière, industrie chimique et pharmaceutique

La rectification est une forme spécifique de l'évaporation (distillation à contre-courant). Lors de la rectification, plusieurs étapes d'évaporation sont placées les unes derrière les autres. La performance de séparation est donc beaucoup plus élevée que lors de la distillation monoétagée.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> Solvants organiques
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> Extraction, procédé à membranes

Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme moyens
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie chimique et pharmaceutique, branche alimentaire

2.12 Extraction liquide/liquide

L'extraction liquide/liquide est effectuée à l'aide de deux solvants non mélangeables entre eux. Le procédé a souvent recours à une phase hydrophile (p. ex. eau) et une phase hydrophobe (p. ex. solvants organiques). La substance à éliminer est répartie entre les deux phases dans une réaction d'équilibre. La séparation et l'évaporation du liquide d'extraction permettent de récupérer la substance cible. Le processus d'extraction peut être réalisé de manière continue ou intermittente.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Substances organiques
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Évaporation du solvant pour extraire la substance cible
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme moyens
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie chimique et pharmaceutique

2.13 Incinération des eaux usées

Lors de l'incinération des eaux usées (> 1000 °C), les substances organiques contenues sont entièrement détruites thermiquement. L'incinération des eaux usées est un processus à forte consommation d'énergie. Elle est donc très onéreuse dans les entreprises où les rejets thermiques ne peuvent pas être valorisés avec un taux de rendement suffisamment élevé. Grâce à l'incinération des flux d'eaux usées les plus concentrés, l'installation de prétraitement des eaux usées interne à l'exploitation peut être de plus petite dimension et le processus d'élimination peut être exploité avec plus d'efficacité.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Composés organiques, ingrédients pharmaceutiques actifs, pesticides, substances difficilement dégradables (micropolluants)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Procédé à membranes, évaporation
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme élevés
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie chimique et pharmaceutique

2.14 Échangeurs d'ions

Les échangeurs d'ions peuvent être utilisés sous forme d'échangeurs d'anions ou de cations. Différents ions cibles peuvent ainsi être éliminés des eaux usées. La règle suivante s'applique : plus la densité de charge d'un ion est élevée, plus il sera lié à la résine échangeuse d'ions. L'échangeur d'ions est le plus souvent utilisé pour adoucir l'eau à l'aide d'un échangeur de cations sous forme de sodium (les agents de dureté calcium et magnésium sont ainsi remplacés par du sodium). La régénération est effectuée à l'aide d'une solution saline hautement concentrée. Ce faisant les agents de dureté adsorbés sur la résine échangeuse d'ions sont à nouveau remplacés par du sodium dans une réaction d'équilibre.

Dans le domaine du traitement des eaux usées industrielles, des échangeurs d'ions sont utilisés pour diverses applications. Des échangeurs d'anions et de cations sont ainsi utilisés dans l'industrie galvanique pour la régénération de l'eau dans les recirculations de bains de rinçage. Des échangeurs d'ions permettant d'éliminer les métaux lourds sont utilisés dans des industries qui produisent des métaux lourds qui ne peuvent pas être entièrement éliminés par une précipitation d'hydroxydes/de sulfure (voir plus bas). Les échangeurs d'ions ne sont pas permis comme filtre final (circuit end of pipe) dans le traitement de surfaces métalliques/la galvanisation.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> Anions, cations
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> Précipitation, floculation, procédé à membranes, procédé d'adsorption
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> Considérés comme faibles
Branche cible	<ul style="list-style-type: none"> Entreprises de galvanisation/traitement de surfaces métalliques, incinération des ordures ménagères

2.15 Stripage

Le stripage consiste à chasser des eaux usées les substances (très) volatiles (p. ex. hydrocarbures chlorés) à l'aide d'air ou de vapeur. Le stripage est effectué soit par détente/expulsion (voir flottation) ou par désorption à l'aide d'une augmentation de température¹⁰. Des substances organiques très volatiles et peu solubles dans l'eau peuvent ainsi être éliminées des eaux usées par stripage d'air (stripage d'ammoniac permettant de récupérer l'azote). Le taux d'épuration atteignable dépend donc de la qualité des eaux usées, des propriétés physiques des substances à éliminer et de la quantité d'air utilisée.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> Substances organiques très volatiles et peu solubles dans l'eau (p. ex. hydrocarbures chlorés, ammoniac)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> Avec des procédés biologiques
Frais de maintenance	-
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> Industrie chimique et pharmaceutique

2.16 Électrolyse/électrodialyse

Lors de l'électrolyse, le courant électrique créé va fragmenter ou isoler les substances contenues dans les eaux usées. L'électrolyse est utilisée dans de nombreuses applications scientifiques et techniques : lors du procédé chlore-alcali, de la fabrication et du nettoyage de métaux par électrolyse ignée ou de la fabrication de peroxyde d'hydrogène. Ce procédé n'est pas très répandu dans le prétraitement des eaux usées. Il est surtout employé lorsque des matériaux recyclables doivent être récupérés. L'électrolyse peut également être utilisée lors de l'électroflottation pour produire des bulles d'air.

L'électrodialyse combine l'électrolyse à un procédé membranaire. Elle est caractérisée par le fait qu'une concentration sélective d'ions est créée à l'aide d'un champ électrique. De cette manière, des membranes échangeuses d'anions et de cations permettent de séparer les ions chargés po-

¹⁰ Förtsch und Meinholz (2014). Handbuch betrieblicher Gewässerschutz (Kapitel zur Strippung, S. 293), ISBN 978-3-658-03323-1.

sitivement des ions chargés négativement. Une électrodialyse permet de déminéraliser partiellement des eaux usées contenant du sel (saumure) ; l'électrodialyse bipolaire est une forme spécifique d'électrodialyse, qui permet de fabriquer des acides et bases faibles (environ 4 %) à partir d'eaux salines.

Lors de la récupération de métaux tels que le cuivre, le nickel ou l'étain, l'électrolyse n'a de sens que dans des semi-concentrés ou des concentrés. Idéalement, elle est combinée à un traitement avec des résines échangeuses d'ions en aval afin d'obtenir de plus faibles concentrations. La solution traitée peut ensuite être dirigée vers une installation de prétraitement des eaux usées ou être éliminée en externe en raison des charges élevées de sel.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Substances chargées, métaux (cuivre, nickel, étain)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Procédé à membranes ; procédés thermiques (évaporation), (électro)-flottation ; échangeurs d'ions
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme élevés : l'électrodialyse requiert un travail de nettoyage plus important lorsque les eaux usées présentent une pollution organique élevée
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie alimentaire (minéralisation de lactosérum), industrie galvanique

2.17 Inactivation d'eaux usées contaminées biologiquement

Des flux de déchets contaminés ou potentiellement contaminés sont générés lors des travaux réalisés avec des organismes génétiquement modifiés ou pathogènes et des matériaux biologiques. Ces flux de déchets doivent au moins être inactivés à l'échelle du laboratoire et de la production de manière à ce qu'ils ne puissent pas nuire aux êtres humains, aux animaux, à l'environnement ou à la biodiversité¹¹. Les procédés standard d'inactivation d'eaux usées contaminées biologiquement sont, outre l'autoclave classique, des méthodes d'inactivation purement thermiques (mode opératoire souvent continu), purement chimiques (p. ex. augmentation du pH) ou des combinaisons. L'efficacité de la méthode choisie doit être contrôlée. Dans le cas des procédés chimiques, l'apport d'autres substances réactives potentiellement nocives dans les flux d'eaux usées doit être pris en compte.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Organismes, microorganismes et matériaux biologiques selon la définition de l'OUC (Ordonnance sur l'utilisation confinée¹²)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Procédés d'inactivation physiques et/ou chimiques, en mode batch ou continu tenant compte de la classe de risque biologique
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Maintenance et contrôle réguliers de l'efficacité de l'inactivation en fonction de l'organisme concerné et de la classe de risque
Branche cible	<ul style="list-style-type: none"> • Biotechnologie

¹¹ Ordonnance sur l'utilisation des organismes en milieu confiné (Ordonnance sur l'utilisation confinée, OUC) du 9 mai 2012, (état le 1^{er} janvier 2020) RS 814.912

¹² ibid.

Procédés mécaniques et physiques et évaluation de leur efficacité sur différentes substances cibles

Tableau 1 : Aperçu de différents procédés individuels mécaniques et physiques et évaluation de leur efficacité sur différents groupes de substances et substances cibles. Les procédés sont également possibles en combinaisons.
Légende : « ++ » = est éliminé efficacement, « + » = est partiellement éliminé, « - » = n'est pas éliminé (selon l'estimation des expertes et des experts)

PROCÉDÉS ↓	SUBSTANCES/GROUPES DE SUBSTANCES →	Production de boues, concentrats, etc. à traiter et/ou éliminer																																			
		Variations de pH		Matières solides/particules (MES)		Métaux lourds		DCO		DBO		COT		COD		Graisses		Colorants/pigments		Phosphite (phosphonate)		Phosphates		Hydrocarbures (HC)		Substances organiques de synthèse											
		soluble	non dégradabile	totale	libres	émulsionnées	Hypophosphite	Polyposphate	aliphatiques	aromatiques (BTX)	chlorés (HCC)	AOX halogénés (FOCI, VOX)	HC non halogénés	polyaromatiques (CAP)	Micropolluants	Huiles (minérales)	Chromate	Phénol	Cyanure	Ammonium	Nitrite	Nitrate	Agents complexants	Sulfure	Fluore	Chlorure	Autres sels (p. ex. bromure)	Nitrosamines et précurseurs	Pathogènes (microorganismes)	Odeurs							
Séparateur d'huiles minérales, séparateur par coalescence	Élimine les graisses, huiles et hydrocarbures	++	-	-	-	-	+	-	-	-	++	-	-	-	-	+	+	+	+	+	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Rupture de l'émulsion		++	-	+	+	-	-	-	-	-	+	++	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Séparateur de graisses		++	-	-	-	-	+	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Bassin de décantation/piège à boues (avec coude plongeur)	Élimine les particules et les matières solides ET les substances sorbées dessus	++	-	++	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Tamassage		++	+	++	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Filtration		++	-	++	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Flottation		++	-	++	+	-	+	+	+	+	++	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Procédé à membranes (osmose inverse)	Effet à large spectre	++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	
Procédé d'adsorption		++	-	-	-	+	+	+	++	+	++	-	-	++	-	-	++	++	++	++	++	++	++	+	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	++
Évaporateur		++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	-
Incinération des eaux usées		++	-	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++	++
Échangeurs d'ions		+	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Stripage	Autres procédés (peu répandus)	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+		
Électrolyse, électrodialyse		++	-	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-		
Inactivation thermique		+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	++	-	

3 PROCÉDÉS CHIMIQUES

Ce chapitre traite des procédés chimiques qui permettent de détruire les substances ou de les modifier afin qu'elles puissent être éliminées des eaux usées. Il s'agit de procédés relativement compacts et peu encombrants (comparés aux procédés biologiques, par exemple). Les aspects liés à la sécurité doivent être pris en compte, notamment avec des procédés impliquant des agents d'oxydation et de réduction. L'utilisation correcte de ces procédés n'est pas chose facile et suppose des connaissances techniques précises.

Les procédés chimiques répertoriés ci-après sont décrits dans le présent chapitre (voir également Tableau 2).

Neutralisation de la valeur pH :

- Neutralisation

Procédés ayant une efficacité à large spectre (outre les métaux lourds, éliminent aussi les colorants, les phosphates, les hydrocarbures émulsionnés, etc.) :

- Flocculation
- Précipitation / complexation

Procédés ayant une efficacité à large spectre sur les substances organiques difficilement dégradables (micropolluants) :

- Oxydation : ozone, UV, peroxyde d'hydrogène, eau de Javel, réaction de Fenton

Autres procédés :

- Réduction de chrome(VI) et nitrite

3.1 Neutralisation

La neutralisation d'eaux usées industrielles est un procédé largement utilisé, souvent combiné avec d'autres procédés (p. ex. précipitation/flocculation). Elle permet de protéger les canalisations d'eaux usées de la corrosion et une inhibition des bactéries dans les étapes de traitement biologique placées en aval. La neutralisation des eaux usées est effectuée pour ajuster la valeur pH. Contrairement à la définition chimique d'une solution neutre (pH 7), l'ordonnance sur la protection des eaux autorise un pH compris entre 6,5 et 9 (lors d'un déversement dans les égouts publics, des écarts sont autorisés si le mélange avec les autres eaux dans les égouts est suffisant). Les valeurs situées hors de cette échelle peuvent être neutralisées à l'aide d'acides/de CO₂ ou de solutions alcalines. L'ajout d'acides/solutions alcalines est contrôlé avec une électrode à pH. Il est important que le support à neutraliser soit complètement mélangé, sinon la neutralisation n'a lieu que de manière localisée sur le point de dosage.

En principe, il faut distinguer la neutralisation intermittente de la neutralisation continue. Lors d'une neutralisation intermittente, un ajustement de pH peut avoir lieu grâce aux différentes lignes d'eaux usées ou lots, sans dosage supplémentaire d'acides/solutions alcalines.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none">• Acides, solutions alcalines
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none">• Piège à boues, sédiments, Séparation physicochimique des émulsions
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Considérés comme faibles
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none">• Toutes branches confondues (p. ex. évacuation des eaux de chantier (laitance du béton), eaux usées de nettoyage en cas de NEP (= nettoyage en place), p. ex. dans l'industrie agroalimentaire, le traitement de surfaces métalliques/la galvanisation

3.2 Précipitation (avec complexation)

Lors de la précipitation, des substances dissoutes sont rendus insolubles. Pour cela, un précipitant est ajouté et la valeur pH est modifiée de sorte que la substance à précipiter présente une solubilité minimale dans l'eau dans les conditions qui prévalent. Les substances précipitées sont ensuite séparées et concentrées à l'aide de procédés de séparation solide-liquide. Selon la teneur en matières solides, la séparation des matières solides peut être effectuée à l'aide d'une sédimentation, d'un épaissement, d'une flottation ou d'une filtration directe (voir plus haut). Des filtres-presses ou des centrifugeuses sont généralement utilisés pour obtenir un épaissement ou une déshydratation supplémentaire. Les matières résiduelles produites sont valorisées si possible.

Ci-après, la précipitation de métaux est abordée plus spécifiquement, car elle représente un grand domaine d'application dans la pratique.

Comme décrit plus haut, une plage de pH adéquate où le métal à précipiter présente une solubilité minimale est ajustée pour la précipitation des métaux. Si plusieurs d'entre eux précipitent simultanément, une plage de pH optimale doit être déterminée ; elle peut par ailleurs être étendue en choisissant un agent de neutralisation adapté. Autres options : il est possible d'utiliser un procédé en deux étapes ou de placer une précipitation d'hydroxydes en aval grâce à une précipitation supplémentaire avec du sulfure de sodium ou un organo-sulfure. Dans la mesure où la solubilité des sulfures de métal est beaucoup plus faible, une précipitation combinée d'hydroxyde/sulfure peut être réalisée dans la plupart des cas. Les solubilités des métaux en fonction de la valeur pH sont répertoriées dans ¹³. Il convient toutefois de noter qu'il s'agit de valeurs théoriques, qui peuvent varier dans la pratique en raison des substances contenues dans les eaux usées telles que des substances organiques ou des sels. Les réglages et dosages optimaux doivent donc être préalablement déterminés dans le cadre d'essais en laboratoire.

Il peut arriver que la précipitation de métaux soit difficile ou même impossible dans des eaux usées, pour lesquelles des agents complexants, tels qu'amines, acide citrique, EDTA, acide tartrique ou polyphosphate ont été utilisés au cours de procédés de traitement en amont. Dans ces cas, des étapes de traitement supplémentaires doivent être introduites, afin de contrer l'effet des agents complexants. Parallèlement aux autres mesures possibles, la précipitation des métaux en question peut être réalisée avec du sulfure de sodium ou des organo-sulfures usuels dans la zone neutre ou éventuellement alcaline (le trimercaptotriazine, le diméthylthiocarbamate (inhibition possible du traitement biologique des eaux usées) ou le thiocarbamide sont des voies alternatives de dissociation de complexes). Pour dissocier des agents complexants puissants, un échangeur d'ions sélectifs peut également être utilisé, surtout pour des métaux bivalents, ou une oxydation (ozone, peroxyde d'hydrogène avec du sel de fer(II), peroxyde d'hydrogène combiné à des UV ; voir plus bas).

Certains métaux peuvent aussi être présents sous forme anionique et nécessitent d'autres méthodes de traitement. Le chromate est le plus souvent utilisé dans l'industrie de traitement de surfaces métalliques. Lors du traitement, le chrome(VI) doit d'abord être converti en forme trivalente avec du bisulfite de sodium ou des sels de fer(II) (voir plus bas le chapitre « Réduction »), puis être précipité sous forme d'hydroxyde de chrome(III). Des métaux tels que l'arsenic, le molybdène, le tungstène, également présents sous forme anionique, ne peuvent pas être précipités directement et doivent être éliminés par fixation sur des hydroxydes de fer.

Outre les métaux, d'autres anions tels que le phosphate, le sulfate, le fluorure ou le sulfure peuvent également être précipités. Pour ce faire, des excès stœchiométriques sont nécessaires selon la valeur seuil prédéterminée.

¹³ Wilhelm S., Wasseraufbereitung Chemie und chemische Verfahrenstechnik, 7. Aktualisierte Auflage, Springer, 2007. Hagen, WABAG Handbuch Wasser, 9 Auflage, Vulkan Verlag, 2000

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Métaux lourds (anioniques, cationiques), phosphate, sulfate, fluorure, sulfure
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Floculation, procédé de séparation de matières solides et déshydratation/épaississement des boues
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme faibles
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement de surfaces métalliques/galvanisation

3.3 Floculation

Lors de la floculation, des substances en suspension sont regroupées en agglomérats, qui peuvent être séparés de la phase aqueuse par des procédés physiques tels que la sédimentation, la filtration ou la flottation. La floculation élimine par ailleurs un large spectre de substances des eaux usées (comme des métaux lourds déjà précipités, des hydrocarbures émulsionnés, des fluorures, des phosphates, des sulfates, ainsi que des colorants et des pigments). Elle est donc utilisée pour le traitement de nombreuses eaux usées industrielles et artisanales différentes. La floculation peut être divisée en trois étapes de traitement : (i) coagulation, (ii) neutralisation et (iii) floculation. Lors de la coagulation, les eaux usées à traiter sont déstabilisées électrochimiquement, soit via l'ajout d'une solution de métal bi ou trivalente ou par électrocoagulation en utilisant une anode sacrificielle en fer ou aluminium. Lors de la neutralisation, le pH est neutralisé (des microflocs se forment dans la plage pH neutre), tandis que des macroflocs se forment pendant la floculation lorsque des floculants ou des polyélectrolytes sont ajoutés. Ces polyélectrolytes se déposent principalement sur les floccs formés, ne polluent les eaux usées que dans une faible mesure et ne sont que partiellement biodégradables. Leur dosage doit donc être réduit au minimum nécessaire. Pour que le rendement d'élimination des polluants soit le plus élevé possible, des conditions-cadres optimales doivent être garanties pour les trois étapes de la floculation. Ces conditions sont les suivantes : (i) temps de réaction, (ii) conditions de réaction, (iii) produits chimiques utilisés (floculants), (iv) plage de pH.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Métaux lourds, hydrocarbures émulsionnés, fluorure, phosphate, colorants, pigments, acides/solutions alcalines
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Précipitation
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Faibles
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement de surfaces métalliques/galvanisation, centres d'entretien, garages auto

3.4 Oxydation

Les procédés d'oxydation permettent de transformer les substances à éliminer au cours d'une réaction chimique. Lors de tels procédés, les agents d'oxydation s'épuisent. Des procédés d'oxydation sont utilisés dans le domaine des eaux usées, lorsque l'épuration fait l'objet des exigences suivantes : (i) oxydation (partielle) de composés organiques persistants (micropolluants), (ii) décontamination d'eaux usées (p. ex. détoxification d'eaux usées contenant du cyanure (CN⁻)), (iii) décoloration d'eaux usées, (iv) désinfection d'eaux usées.

Dans ce chapitre, les principaux procédés d'oxydation utilisés pour le traitement des eaux usées industrielles et artisanales sont abordés. Ces procédés sont les suivants : (i) ozonation, (ii) oxydation par UV (en combinaison avec un agent oxydant tel que le peroxyde d'hydrogène ou un catalyseur tel que le palladium), (iii) oxydation avec H₂O₂ activé (peroxyde d'hydrogène ; en combinaison avec un catalyseur tel que les ions d'argent et les ions ferreux (réaction de Fenton) ou

des UV), (iv) oxydation à l'eau de Javel (NaOCl), et (v) oxydation au permanganate de potassium. L'oxydation par réaction de Fenton produit des boues d'hydroxydes de fer, qui doivent être dés-hydratées et éliminées de manière adéquate.

Des procédés d'oxydation peuvent être combinés entre eux : ainsi, l'ozone peut être combiné aux UV ou au peroxyde d'hydrogène. Dans ce cas, la formation de radicaux hydroxyles (OH^{*}) s'accélère aux dépens de l'ozone, ce qui conduit à un rendement d'oxydation non spécifique plus élevée. Ces « processus d'oxydation avancés » (POA) sont utilisés lorsque les substances à éliminer sont particulièrement persistantes. Les procédés au peroxyde d'hydrogène et aux UV sont plutôt onéreux et ne sont pas utilisés très fréquemment pour le traitement des eaux usées industrielles.

Avec les processus oxydatifs, il convient de vérifier si des eaux usées spécifiques sont adaptées à un traitement oxydatif, notamment lorsque de l'ozone est utilisé. Dans certaines circonstances, il peut arriver que des produits de réaction toxiques soient formés de manière excessive (p. ex. des nitrosamines si des précurseurs correspondants sont contenus dans les eaux usées ; du bromate si des eaux usées contenant du bromure sont traitées avec de l'ozone)¹⁴. Certaines substances contenues dans les eaux usées, telles que la matière organique (COD) et parfois aussi le nitrite, consomment énormément d'agents d'oxydation, ce qui a des incidences négatives sur le rendement d'épuration. Un traitement préalable adapté est donc efficace. Par ailleurs, une étape biologiquement active doit être placée en aval des procédés d'oxydation, afin d'éliminer les éventuels produits de réaction labiles toxiques.

Dans l'artisanat du métal, la détoxification d'eaux usées contenant du cyanure est effectuée à l'eau de Javel (= hypochlorite de sodium, NaOCl). Ce faisant, la formation d'AOX doit être prise en compte. L'important est que la valeur pH se situe dans la plage fortement alcaline (au moins 12) et que la température soit inférieure à 38 °C, afin d'empêcher la formation de chlorure de cyanogène, un produit intermédiaire également très toxique (la formation d'acide cyanhydrique n'est pas pertinente dans la plage alcaline). Ce processus de détoxification d'eaux usées contenant du cyanure conduit à une augmentation des concentrations d'ammonium dans les eaux usées. Cette détoxification est de plus en plus effectuée avec du peroxyde d'hydrogène et des UV, car cela permet d'éviter la formation d'AOX.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Substances organiques persistantes (micropolluants)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Prétraitement/traitement complémentaire biologique ; précipitation, floculation
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Faibles à élevés selon l'agent d'oxydation • Attention : l'ozone est fabriqué sur place, car l'ozone n'est pas assez stable pour être stocké
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie chimique et pharmaceutique ; traitement de surfaces métalliques/galvanisation

3.5 Réduction

Des processus réducteurs sont nécessaires pour éliminer le chrome(VI) et le nitrite. Lors de la décontamination d'eaux usées chargées de chromates, le chrome(VI) est réduit en chrome(III) à l'aide de bisulfite de sodium (avec des valeurs de pH inférieures à 2,5) ou des sels de fer(II). Il peut ensuite être précipité en hydroxyde dans des conditions de pH neutres. Pour éliminer le nitrite des eaux usées, de l'acide amidosulfonique est ajouté à un pH de 4. Le nitrite est alors réduit en azote atmosphérique (N₂) et du sulfate est produit. Mais le nitrite peut également être

¹⁴ Von Gunten, U. (2018). Oxidation Processes in Water Treatment: Are We on Track? Environmental Science and Technology, 52, 5062-5075.

réduit en N₂ à l'aide de processus biologiques (p. ex. dénitrification). Cela risque toutefois de conduire à une formation accrue de protoxyde d'azote.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none">• Chromate, nitrite
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none">• Précipitation, floculation ; élimination biologique
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none">• Considérés comme faibles
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none">• Traitement de surfaces métalliques/galvanisation/(réduction de chromate), branche alimentaire, entreprises de traitement thermique, traitement chimique et physique de déchets spéciaux liquides (réduction de nitrite)

4 PROCÉDÉS BIOLOGIQUES

Un prétraitement biologique des eaux usées industrielles a lieu si les substances contenues dans les eaux usées peuvent être facilement biodégradées. Souvent, des procédés biologiques sont seulement pertinents du point de vue de la rentabilité si les charges sont élevées (grandes quantités de substances facilement dégradables). Ce faisant, des nutriments et des substances organiques sont éliminés, afin d'éviter de surcharger la station d'épuration communale placée en aval, car cette dernière possède également une étape de traitement biologique.

Tableau 3 : Comparaison entre le prétraitement des eaux usées aérobie et anaérobie

Biologie aérobie	Biologie anaérobie
Prérequis	
<ul style="list-style-type: none"> Utilisé avec des concentrations de contaminants plutôt faibles. Convient également aux eaux relativement froides. Substances toxiques partiellement autorisées. Préneutralisation nécessaire avec des eaux usées acides/alcalines. 	<ul style="list-style-type: none"> Rentable uniquement avec des eaux usées hautement concentrées (> 2000 mg DCO/L). Eaux usées relativement chaudes (> 25 °C; 30-35 °C = plage idéale pour des anaérobies mésothermes). Les substances toxiques peuvent avoir un effet inhibant. Ajustement de la valeur pH en entrée de réacteur anaérobie en cas d'hydrolyse et d'acidification séparées.
Mode opératoire	
<ul style="list-style-type: none"> Faibles valeurs de rejet atteignables grâce à un traitement en plusieurs étapes. Possibilité d'intégrer l'élimination de N et P. Production élevée de boues. Faible charge volumique. Charges de maintenance élevées pour l'aération, la déshydratation des boues, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Le traitement complémentaire aérobie est nécessaire pour obtenir de faibles valeurs en sortie. Pas d'élimination de N et P significative. Faible production de boues. Charges volumiques élevées. Faibles charges de maintenance. La valeur pH doit être surveillée dans le réacteur anaérobie.
Matières résiduelles	
<ul style="list-style-type: none"> Boues 	<ul style="list-style-type: none"> Biogaz (valorisation énergétique)
Coûts	
<ul style="list-style-type: none"> Faibles coûts d'investissement. Coûts d'exploitation élevés : électricité pour l'aération, le traitement et l'élimination des boues, éventuellement ajout de nutriments. Également possible sous forme de micro-station d'épuration. 	<ul style="list-style-type: none"> Coûts d'investissement souvent très élevés. Coûts d'exploitation peu élevés : faible consommation d'électricité, pratiquement aucun ajout de nutriments nécessaire, faible production de boues. Rentable uniquement avec des charges relativement élevées.

Avec une composition d'eaux usées trop déséquilibrée (généralement DCO:N:P = 200:5:1), de l'azote et/ou du phosphore doivent être ajoutés aux eaux usées, afin de créer des conditions de croissance optimales pour les microorganismes. Des eaux usées fortement acides ou alcalines doivent être préalablement neutralisées.

Des procédés biologiques peuvent être utilisés au cours de différents processus et modes opératoires. Les procédés suivants sont décrits ci-après (voir également Tableau 3 et Tableau 4):

- Traitement aérobie des eaux usées, peut être combiné à un traitement anoxique (p. ex. dénitrification)
- Traitement anaérobie des eaux usées (pour des eaux usées fortement concentrées)

4.1 Traitement aérobie des eaux usées

Lors du traitement aérobie des eaux usées, des substances organiques biodégradables ainsi que des nutriments sont éliminés par des microorganismes en conditions aérobies (c'est-à-dire avec de l'oxygène).

Les microorganismes hétérotrophes ont besoin de carbone organiquement lié comme source de carbone. Ils se différencient ainsi des organismes autotrophes qui prélèvent le carbone à partir du CO₂ dans l'atmosphère. Généralement, les microorganismes hétérotrophes ont une croissance rapide. Avec un métabolisme aérobie, ils éliminent des substances organiques à l'aide d'oxygène, tout en produisant de l'énergie. Une majeure partie des matières organiques sont utilisées pour la croissance. La biomasse ainsi obtenue l'est sous forme de boue et doit être séparée.

Les microorganismes autotrophes sont essentiellement responsables de la nitrification. Cela signifie que le CO₂ est utilisé comme source de carbone pour la croissance. Pour ce faire, l'oxydation de sources d'azote est nécessaire (p. ex. ammonium). L'ammonium (NH₄⁺) et l'ammoniac (NH₃) sont oxydés par des microorganismes nitrifiants en nitrite (NO₂⁻), puis en nitrate (NO₃⁻). Peu d'énergie est produite lors du deuxième processus (transformation en nitrate), c'est pourquoi ces microorganismes ont une croissance lente. Une nitrification s'effectue de manière aérobie et nécessite donc de l'oxygène. Différents facteurs jouent un rôle lors de la nitrification (concentration de substrat, température, teneur en oxygène, pH, produits de désinfection). L'alcalinité de l'eau est réduite lors de la nitrification, c'est-à-dire que le pH diminue. Une valeur de pH comprise entre 6,5 et 9,0 est optimale. En présence d'eau douce, la valeur du pH peut diminuer si fortement que la nitrification s'arrête. Une diminution de la valeur du pH peut être empêchée grâce à l'ajout d'une matière tampon (p. ex. hydrogénocarbonate de sodium). Comme l'oxydation de l'ammonium est le processus limitant, des augmentations de concentration de nitrite indiquent un problème lors de la nitrification (des émissions de protoxyde d'azote accrues sont également produites dans ces conditions de fonctionnement).

Des organismes autotrophes et hétérotrophes sont responsables de la dénitrification. Le nitrate est transformé en azote élémentaire gazeux à l'aide de microorganismes. Ce processus fonctionne normalement sans oxygène (donc de manière anoxique), mais peut nécessiter toutefois l'ajout d'une source de carbone supplémentaire sous certaines conditions. La réduction de la charge globale d'azote et l'amélioration de la capacité tampon (augmentation de l'alcalinité) constituent de grands avantages.

Si la composition des eaux usées change fréquemment, il est très important d'adapter la biologie. Un prétraitement biologique des eaux usées est relativement onéreux (p. ex. traitement et élimination des boues, énergie pour l'aération de la biologie, nutriments à doser en cas de composition déséquilibrée des eaux usées) et ne sera donc réalisé que s'il n'existe aucune solution alternative.

Le traitement biologique peut être réalisé selon différents modes opératoires. Il peut être exécuté en tant que procédé conventionnel avec des boues activées en suspension, procédé batch (SBR), procédé à lit fluidisé (avec éléments de croissance), procédé à lit fixe, biologie membranaire (MBR) ou d'autres systèmes à biofilm, p. ex. avec des boues activées granulaires. La biologie membranaire recourt généralement à une membrane d'ultrafiltration (voir plus haut). Cela per-

met d'obtenir des concentrations de boues activées plus élevées qu'avec les procédés biologiques conventionnels, ce qui conduit à une diminution du volume de bassin et une augmentation de la consommation d'énergie (notamment pour le rétrolavage périodique de la membrane). Tous les procédés susmentionnés doivent être aérés activement (alimentation en oxygène pour les processus biologiques), ce qui représente une grande partie de la consommation d'énergie.

Il est connu que le spectre d'élimination des procédés biologiques est limitée pour les composés traces organiques (même avec des variantes très complexes¹⁵), p. ex. âge des boues > 25 jours, temps de séjour hydraulique de plus d'un jour, ainsi qu'étapes de traitement anaérobie, voir plus bas). Mais il est tout à fait possible d'éliminer considérablement des substances individuelles, telles que le diuron et le diclofénac, en adaptant la biologie de manière adéquate¹⁶.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Carbone biodégradable (DBO, COD), azote, phosphore, matières solides
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Précipitation, sédimentation, filtration, procédé à membranes
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme élevés
Branches cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Industrie alimentaire et boissons, industrie du papier, industrie chimique et pharmaceutique et en partie industrie textile

4.2 Traitement anaérobie des eaux usées

Le traitement anaérobie des eaux usées (c'est-à-dire sans présence d'oxygène ou de nitrate) est particulièrement utilisé avec des eaux usées hautement concentrées (> 2000 mg DCO/L). Les substances organiques sont principalement transformées en méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂). Seule une infime partie d'entre elles sont utilisées pour la croissance des microorganismes. En principe, la croissance des bactéries anaérobies est beaucoup plus lente que celle des bactéries aérobies. Ce procédé ne produit pratiquement aucune boue ; il peut même arriver que la perte de boues dans l'effluent soit plus élevée que le taux de croissance des microorganismes. Une attention toute particulière doit donc être portée à la technique de séparation des boues. Il convient également de noter que le réacteur anaérobie peut rapidement s'acidifier si la gestion du processus n'est pas assez stable (si le pH tombe trop bas dans la plage acide, il peut arriver que les microorganismes chargés d'éliminer les acides soient inhibés de manière irréversible en quelques heures). Les eaux usées prétraitées de manière anaérobie doivent être aérées avant leur déversement dans les égouts, afin d'éviter des problèmes de fonctionnement dans la station d'épuration communale (notamment si la station d'épuration communale est plutôt petite). Les procédés anaérobies sont largement répandus dans le domaine du traitement des eaux usées industrielles.

Substances cibles	<ul style="list-style-type: none"> • Carbone biodégradable (DBO, COD)
Combinaison de procédés	<ul style="list-style-type: none"> • Traitement aérobie des eaux usées : flottation avant le réacteur anaérobie en cas d'eaux usées contenant des graisses et des protéines (l'accumulation de graisses/protéines dans les boues conduit à un débordement accru de celles-ci)
Frais de maintenance	<ul style="list-style-type: none"> • Considérés comme moyens

¹⁵ P. Falås, A. Wick, S. Castronovo, J. Habermacher, T. Ternes, A. Joss (2016): Tracing the limits of organic micropollutant removal in biological wastewater treatment. *Water Research*, 95, 240–249.

¹⁶ *ibid.*

Branches cibles

- Industrie alimentaire / boissons (industrie du lait et de la viande, brasseries)

Procédés biologiques et évaluation de leur efficacité sur différentes substances cibles

Tableau 4 : Aperçu de différents procédés biologiques individuels et de leur efficacité sur différentes substances cibles et groupes de substances. Les procédés peuvent également être combinés à d'autres procédés individuels.
Légende : « ++ » = est éliminé efficacement, « + » = est partiellement éliminé, « - » = n'est pas éliminé (selon l'estimation des expertes et des experts).

PROCÉDÉS	SUBSTANCES/GROUPES DE SUBSTANCES																																							
		Production de boues, concentrats, etc. à traiter et/ou éliminer	Variations de pH	Matières solides/particules (MES)	Métaux lourds	soluble	DCO	DBO	COT	COD	Graisses	Colorants/pigments	Phosphite (phosphonate)	Phosphates	aliphatiques	aromatiques (BTX)	chlorés (HCC)	AOX halogénés (FOCI, VOX)	AOX non halogénés	polyaromatiques (CAP)	Substances organiques de synthèse	Huiles (minérales)	Chromate	Phénol	Cyanure	Ammonium	Nitrite	Nitrate	Agents complexants	Sulfure	Fluorure	Chlorure	Autres sels (p. ex. bromure)	Nitrosamines et précurseurs	Pathogènes (microorganismes)	Odeurs				
Biologie anaérobie	Digestion	+	-	-	-	++	-	++	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	-	-	-	-	-	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Biologie aérobie, p. ex.	Élimination de carbone (faibles charges) et de nutriments	- Procédé conventionnel à boues activées	++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	++	++	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+	
- SBR (procédé batch)		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	++	++	++	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
- Procédé à lit fluidisé (avec éléments de croissance)		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	++	++	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
- Procédé à lit fixe		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	++	++	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
- Bioréacteur à membrane (MBR)		++	+	++	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	++	++	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+
- Systèmes à biofilm		++	+	+	+	++	-	++	++	++	++	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	++	++	+	-	-	-	-	-	-	+	-	-	+

5 ASPECTS PROPRES À TOUS LES PROCÉDÉS

- Les **bassins de lissage et de rétention** servent à l'équilibrage des charges (p. ex. pour atténuer de brefs pics de charge). Ils ne sont pas considérés comme des procédés à part entière, mais comme une étape de procédé fréquemment utilisée toutes branches confondues (avec ou sans installation de prétraitement des eaux usées en aval). Un volume de bassin suffisant doit être disponible. Des bassins de compensation et de rétention peuvent être aérés en plus afin d'éviter la formation d'odeurs. En cas de précipitations intenses nécessitant l'activation de déversoirs d'orage, les eaux usées d'exploitation doivent être retenues le plus possible ; mais cela nécessite également des bassins de rétention suffisamment grands.
- La plupart des procédés susmentionnés produisent des **déchets**, tels que des boues, des concentrats, des filtrats, etc. Les boues doivent être évacuées le plus efficacement possible à l'aide d'un système de déshydratation des boues, afin que seule une part minimale d'eau y subsiste. Des systèmes de filtration (voir plus haut) comme un filtre à bandes, un filtre-pressé à chambres (p. ex. avec des boues minérales), un décanteur ou des filtres-pressés à bandes sont utilisés pour la déshydratation des boues. Les boues déshydratées doivent être éliminées de manière adéquate. Avant l'élimination des déchets, il convient de vérifier si les matériaux doivent être acheminés vers un centre d'élimination spécifique en tant que déchets spéciaux¹⁷¹⁸.
- Des **produits chimiques**, tels que les agents précipitants et flocculants, doivent être utilisés comme réactifs au cours de certains procédés. Certains d'entre eux ont un effet en partie toxique sur la vie aquatique (p. ex. flocculants cationiques avec composés d'ammonium quaternaires). Par ailleurs, des effets toxiques peuvent survenir lors de l'utilisation de certains produits d'exploitation (p. ex. nitrosamines en cas de désinfection avec des chloramines). Si les produits ne sont pas utilisés de manière adéquates, le fonctionnement de la station d'épuration communale peut même être perturbé (p. ex. inhibition de l'étape de traitement biologique engendrée par des dissociateurs de complexes tels que le diméthylthiocarbamate). Si ces produits d'exploitation sont surdosés, les excédents doivent toujours être ôtés. Le stockage de grandes quantités de produits chimiques implique des dangers. L'exploitant a donc la responsabilité de vérifier s'il dépasse les quantités seuils fixées par l'ordonnance sur la protection contre les accidents majeurs et si l'entreprise est par conséquent soumise à cette ordonnance.
- Les **procédés exploités par batch** présentent une plus grande sécurité d'exploitation que les installations exploitées de manière continue et doivent être plus particulièrement privilégiés dans les exploitations de petite et moyenne taille.

¹⁷ Mémo du VSA « S'agit-il d'eaux usées ? S'agit-il de déchets ? » Lien : <https://vsa.ch/fr/Médiathèque/sagit-il-deaux-usees-sagit-il-de-dechets-fiche-dinformation-du-vsa/> [19.02.2021].

¹⁸ Ordonnance sur la limitation et l'élimination des déchets (Ordonnance sur les déchets, OLED) du 4 décembre 2015 (état au 1^{er} janvier 2021), 814.600

6 BONNES PRATIQUES

Dans la plupart des entreprises, le traitement des eaux usées est axé sur les polluants classiques, comme les matières solides ou les métaux lourds. Les micropolluants ne sont pas au centre des préoccupations. Soit parce que les autorités et les entreprises ne les connaissent pas, soit parce qu'il n'y a pas de directives officielles concernant leur rejet¹⁹. Le présent rapport montre que des procédés de traitement existent et sont établis pour éliminer les micropolluants des eaux usées des entreprises. Un autre potentiel pour réduire l'apport de substances dans les milieux aquatiques réside dans l'exploitation de ces installations. Il convient de souligner en particulier les aspects suivants :

- **Exploitation des procédés** : les installations de prétraitement des eaux usées industrielles doivent être exploitées correctement et les conditions de déversement prédéfinies doivent être respectées. Il est donc important (i) que les flux d'eaux usées soient « triés » correctement et envoyés vers les étapes de traitement nécessaires (gestion des eaux usées), (ii) que les personnes responsables du prétraitement des eaux usées dans l'entreprise disposent des connaissances spécialisées requises (p. ex. en ayant recours aux offres de formation et de perfectionnement disponibles), (iii) que les produits d'exploitation soient disponibles en quantité suffisante (p. ex. produits chimiques) et (iv) que leur ajout (automatique) fonctionne. Les boues et autres éléments produits doivent être évacués des installations et éliminés de manière appropriée. Si nécessaire, les prescriptions de la station d'épuration centrale doivent être intégrées dans l'exploitation du prétraitement des eaux usées (avoir un contact direct avec le responsable de la station d'épuration est bénéfique). L'autorité qui octroie les autorisations dispose de l'expertise nécessaire et décide des conditions à respecter (normes de déversement, état de la technique). Il est donc recommandé de faire appel à cette autorité en cas de doute. Les mauvais investissements ou les déversements non conformes dans les eaux pourront ainsi être évités.
- **Surveillance** : l'exploitation du prétraitement des eaux usées industrielles doit être surveillée, ce qui constitue une tâche exigeante. La surveillance peut être réalisée à l'aide d'analyses périodiques des substances pertinentes ou d'appareils de mesure en ligne adaptés. Dans les deux cas, une maintenance appropriée et une assurance qualité doivent être garanties. Les systèmes de mesure de la gestion des processus (p. ex. électrodes de pH) sont souvent nettoyés et calibrés de manière insuffisante ou les analyses (p. ex. tests rapides) ne sont pas effectuées correctement (p. ex. pas de filtration préalable d'eaux usées troubles lors d'une mesure photométrique).
- **Maintenance** : une maintenance et un entretien appropriés (p. ex. selon les directives du fournisseur) garantissent une exploitation stable et fiable. Il convient de tenir compte que les conditions de déversement doivent également être respectées pendant la maintenance.
- **Autres aspects** : les responsabilités des installations de prétraitement des eaux usées doivent être clairement définies et communiquées (dans l'entreprise, vis-à-vis des autorités compétentes et de la station d'épuration centrale). Il est par ailleurs recommandé de documenter les instructions sur les principaux aspects de manière claire et dans les langues correspondantes. Un journal d'exploitation doit également être tenu. Il convient de vérifier si les coûts du prétraitement et de l'élimination des eaux usées (coûts du personnel, coûts pour les moyens de production, etc.) doivent être transférés vers les différents processus au sein de l'entreprise, au lieu de grever un centre de coûts commun.
L'exploitation d'installations de prétraitement des eaux usées industrielles peut parfois être assumé par des professionnels spécialisés externes (p. ex. personnel de la station d'épuration communale) ou effectué dans des sites centralisés. Cela garantit une professionnalisation adéquate, car les procédés de traitement complexes constituent un défi considérable pour des entreprises, qui ne possèdent souvent pas les connaissances techniques et les expériences requises.

¹⁹ Wunderlin, P., Gulde, R. (2022). Analyse de situation « Apports de substances issues de l'industrie et de l'artisanat dans les eaux ». Association suisse des professionnels de la protection des eaux (VSA), Glattbrugg.