

> ZONES HUMIDES CONSTRUITES POUR LE TRAITEMENT DES EAUX USÉES

// Description générale et caractérisation de l'entité de la SfN

I.1 Définition et différentes variantes existantes

| | |
|-------------------|--|
| Définition | <p>Cette SfN consiste essentiellement à la mise en place de zones humides construites (CW). Les zones humides construites ont été conçues et construites pour exploiter les processus naturels en vue de traiter les eaux usées dans un environnement plus contrôlé que les zones humides naturelles.</p> <p>Dans des environnements urbains, cette SfN apporte une source durable d'eau d'irrigation, un nouveau modèle d'infrastructure verte/bleue ou de parc urbain à faible coût et un support dans la stratégie de gestion des eaux de la ville.</p> |
|-------------------|--|

Différentes variantes existantes
 Les zones humides construites peuvent être classées en fonction de différents critères mais le paramètre le plus courant est leur hydrologie. En fonction de ce paramètre, les zones humides construites peuvent être classées en trois variantes principales :

=> Zones humides construites à surface d'eau libre (FW-CW)
 Il s'agit d'espaces d'eau ouverts qui contiennent des plantes flottantes, submergées et émergées. La figure 1 explique de manière schématique comment elles fonctionnent. En résumé, comme les eaux usées s'écoulent dans la zone humide, cette dernière fait l'objet de processus physiques, chimiques et biologiques différents qui éliminent la pollution. Les processus principaux sont notamment la sédimentation, la filtration et la dégradation microbologique. Ils retirent avec efficacité l'ammoniac, les organismes et les éléments solides en suspension ; l'efficacité du retrait de l'azote est également importante tandis que l'efficacité du retrait du phosphore est basse. Ces processus sont employés dans le traitement tertiaire des eaux usées municipales et des écoulements des eaux pluviales. La figure 2 montre un exemple de zone humide à surface d'eau libre intégrée dans le cadre urbain.

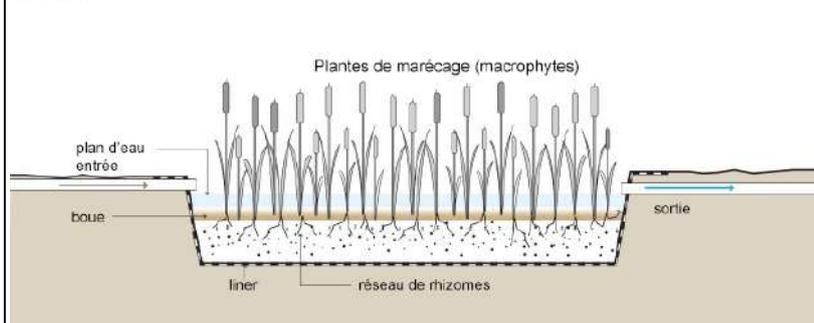
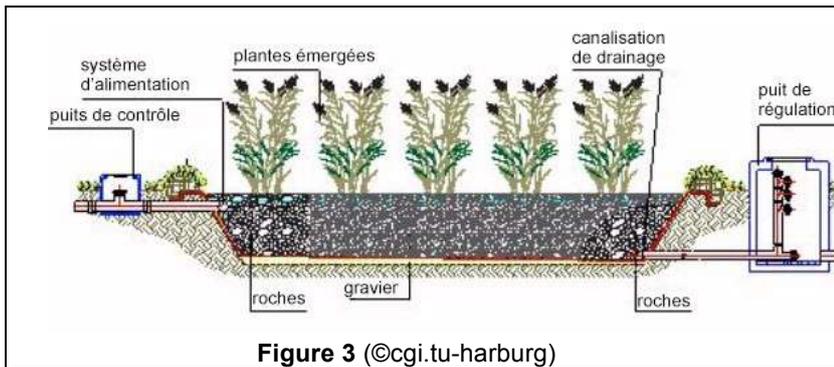


Figure 1 (© SSWM University)



Figure 2 (© domusweb)

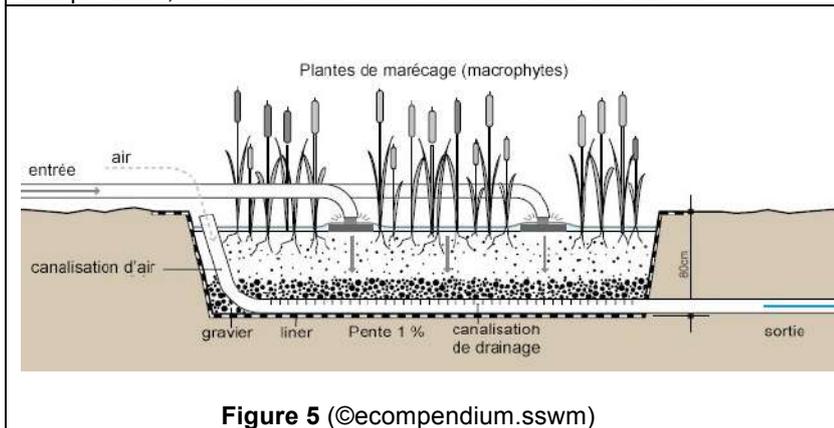
=> Zones humides construites à surface souterraine horizontale
 Dans ce cas, les eaux usées passent par le canal d'entrée et s'écoulent lentement à l'horizontale via un milieu poreux dans lequel la végétation émergente est plantée, Fig. 3. Par conséquent, cette eau est filtrée et fait l'objet de processus d'aérobic, d'anoxie et d'anaérobic qui la purifient. Les zones humides construites à surface souterraine horizontale sont des systèmes plus robustes que les zones humides construites à surface d'eau libre et éliminent les organismes et les éléments solides en suspension de manière efficace ; toutefois, leur capacité à éliminer l'azote dépend de plusieurs facteurs et leur capacité d'élimination de l'ammoniac et du phosphore est faible. Elles sont notamment utilisées dans les traitements secondaires des eaux usées municipales. La figure 4 montre un exemple de zone humide construite à surface souterraine horizontale.



=> Zones humides construites à surface souterraine verticale (VW-CW)

Elles se distinguent des variantes précédentes dans la mesure où les eaux usées s'écoulent via le milieu poreux, Fig.5. De grandes quantités d'eau sont ramenées à la surface, entraînant l'inondation. Les eaux usées doivent alors se filtrer dans le lit pour quitter le système. Les zones humides construites à surface souterraine verticale fournissent des échanges d'O₂ plus importants dans le lit que les zones humides construites à surface souterraine horizontale, produisant ainsi des effluents riches de NO₃, ce qui n'est pas possible avec les autres processus. Grâce à leur complexité technique, elles sont plus adaptées aux petites zones de traitement et sont idéales pour traiter des eaux usées de petites communautés ou domestiques. La figure 6 montre un exemple de zone humide construite à surface souterraine verticale.

D'un autre côté, les zones humides construites à surface souterraine verticale et les zones humides construites à surface souterraine horizontale sont combinées dans un système hybride, ce qui améliore les performances de chaque zone, notamment en termes d'élimination de l'azote.



| I.2 Enjeux urbains principaux et secondaires associés + impacts | | |
|---|--|---|
| Principaux enjeux et sous-enjeux ciblés par la SfN | 02 Gestion et qualité de l'eau >02-1 Gestion des eaux urbaines 04 Biodiversité et espace urbain > 04-1 Biodiversité > 04-2 Développement et régénération de l'espace urbain > 04-3 Gestion de l'espace urbain | <ul style="list-style-type: none"> - Une source durable d'eau d'irrigation - Utilisation de nouvelles étendues d'eau à la surface végétalisée dans des espaces urbains comme processus naturels du traitement des eaux usées - Traitement des eaux usées durable et à faible coût - Création de nouvelles étendues d'eau à la surface végétalisée - Réduction des coûts relatifs aux chargements dans les systèmes d'assainissement - Réduction des polluants contenus dans les eaux - Renforcement de la biodiversité - Amélioration de la qualité et de la quantité des espaces verts et bleus dans les SfN existantes, restaurées et nouvelles |
| Co-bénéfices | 01 Climat >01-2 Adaptation au climat 02 Gestion de l'eau >02-2 Gestion des crues 07 Santé publique et bien-être >07-2 Qualité de vie 09 Urbanisme et gouvernance >09-1 Forme urbaine | <ul style="list-style-type: none"> - Constitution de zones fraîches - Réduction de l'écoulement - Réduction des pointes de crue - Changement de l'image de l'environnement urbain - Augmentation de la participation des citoyens dans la gestion de la SfN, notamment dans le cas des zones humides construites de petite taille qui peuvent être gérées par les habitants locaux dont la propriété comprend la zone humide - Augmentation de la quantité d'espaces verts ouverts pour les résidents |
| Effets négatifs possibles | 06 Efficacité des ressources >06-3 Déchets 07 Santé publique et bien-être >07-2 Santé >07-3 Acoustique | <ul style="list-style-type: none"> - Présence d'espèces bruyantes, principalement des oiseaux aquatiques - Gestion des sols et des plantes mortes qui peuvent contenir des polluants dangereux - Présence d'insectes indésirables - Augmentation de l'humidité ambiante (en fonction du lieu) |

III// Informations plus détaillées sur l'entité de la SfN

| II.1 Description et implication à différentes échelles spatiales | |
|--|--|
| Échelle à laquelle la SfN est mise en œuvre | <p>Voisinage et ville. Notons que les zones humides construites à l'échelle de la ville peuvent uniquement être mises en œuvre dans des villes en développement où l'espace restant est suffisant pour l'installation de ces SfN. Cette échelle n'est pas applicable à des villes à forte population puisqu'il est quasiment impossible d'y trouver toutes les terres nécessaires.</p> <p>Les échelles auxquelles la SfN peut être mise en œuvre dépendent de l'hydrologie de la zone humide construite choisie. Les zones humides construites à surface d'eau libre et les zones humides construites à surface souterraine horizontale peuvent être mises en œuvre à l'échelle de la ville mais cette alternative est limitée par les conditions des terres libres.</p> <p>Les zones humides construites à surface souterraine verticale sont adaptées à une échelle locale (voisinage), ce qui facilite la mise en œuvre de cette technologie dans un contexte urbain.</p> |
| Échelles affectées | Les effets sont essentiellement locaux, cependant, ils peuvent avoir des répercussions au delà du dispositif, notamment dans la gestion de l'eau, l'adaptation climatique et la biodiversité. |
| II.2 Perspective temporelle (avec problèmes de gestion) | |

| | |
|---|---|
| Temps estimé avant que la SfN ne prenne entièrement effet après sa mise en œuvre | La durée de vie est directement liée à la croissance des plantes, aucun autre aspect ne devrait retarder leur développement. Les plantes flottantes et submergées poussent vite, leur croissance ne devrait donc pas constituer une limite. La croissance des plantes émergentes peut être la plus longue mais elle ne devrait pas dépasser quelques semaines à un mois. Si des plantes saisonnières sont utilisées, nous rappelons que certains processus de purification associés à ces plantes n'auront pas lieu tout au long de l'année. |
| Durée de vie | Il est difficile d'obtenir des performances de traitement efficace à long terme dans les zones humides construites. Les problèmes opérationnels que les zones humides construites à surface souterraine horizontale et les zones humides construites à surface souterraine verticale impliquent limitent leur durée de vie à 10 ans. La durée de vie des zones humides à surface d'eau libre peut s'étendre à plusieurs décennies. |
| Développement durable et cycle de vie | Les zones humides construites offrent une alternative de traitement des eaux usées plus écologique et durable que les traitements classiques. Une fois la zone humide épuisée de ses ressources, son retrait n'implique pas de difficultés techniques ; de plus, cette activité sera plus simple grâce à la petite taille des zones humides construites dans des emplacements urbains. La gestion des plantes et des sols retirés constitue la question principale à aborder en termes de durabilité de ces systèmes, ces matériaux pouvant contenir certains composants qui risquent de se transformer en résidus polluants. Cependant, dans la plupart des cas, ce risque ne s'applique pas. De la même manière, la mort des plantes (due à des causes naturelles ou externes comme le gel) en pleine activité de la zone humide construite doit être bien contrôlée car les polluants qu'elles contiennent se libèrent dans l'eau, entraînant des performances d'élimination faibles. |
| Aspects relatifs à la gestion (type d'interventions + intensité) | La gestion des activités dépend également de l'hydrologie de la zone humide construite. <ul style="list-style-type: none"> • Les zones humides construites à surface d'eau libre n'ont besoin que d'activités ponctuelles pour fonctionner correctement. Elles sont capables de contenir les pluies lourdes et les écoulements d'eaux pluviales forts mais leurs plantes peuvent être affectées par le gel ou les pics de pollution des eaux usées. Si les plantes meurent à cause de ces phénomènes externes, elles doivent être remplacées. • Outre leur contrôle nécessaire pendant/après des phénomènes nocifs, les zones humides à surface souterraine horizontale et les zones humides à surface souterraine verticale doivent subir d'autres interventions car elles sont assez exposées à l'obstruction. Ce problème doit être évité autant que possible grâce à une conception efficace mais une gestion continue des zones humides construites est nécessaire pour garantir un écoulement correct des eaux usées. |
| II.3 Intervenants impliqués/aspects sociaux | |
| Intervenants impliqués dans le processus de décision | Pour les zones humides construites à l'échelle de la ville : les autorités locales, voire les autorités régionales, en fonction du lieu. Pour les zones humides construites à l'échelle du voisinage : les autorités locales ou, si la zone humide construite est sur le point de traiter les eaux usées provenant d'une petite communauté et si elle est située dans des zones privées de la communauté, la communauté en question. |
| Intervenants et réseaux techniques | Des tâches d'ingénierie et d'agriculture sont nécessaires pour que la mise en œuvre puisse être effectuée par des entreprises qui fournissent des services ou des réseaux d'entreprises avec des profils plus spécifiques. Une fois que la mise en œuvre est terminée, le contrôle périodique des installations ne requiert pas une personne aussi qualifiée. Certains types de zones humides peuvent même être gérées par les citoyens eux-mêmes. |
| Aspects sociaux | <ul style="list-style-type: none"> • Le cas échéant, il est nécessaire de conclure un accord avec tous les co-propriétaires d'une communauté. • La nécessité d'informer les voisins que les éventuels inconvénients (humidité, odeurs, insectes, bruits) sont compensés par une technologie rentable et respectueuse de l'environnement. |
| II.4 Conception/techniques/stratégie | |

| | |
|--|--|
| Connaissances et savoir-faire impliqués | <p>La conception des zones humides construites requiert un savoir-faire spécifique et, si possible, une expérience riche sur le terrain. Deux types de facteurs doivent être pris en compte lors de ce processus. D'abord, plusieurs facteurs ambiants, du lieu et de la météo locale aux polluants que la zone humide construite devra gérer, entre autres. Ensuite, les paramètres de conception comme le choix des plantes et du substrat, et l'optimisation de la configuration de la zone humide.</p> <p>Si la morphologie basique est modifiée ou si des zones humides construites sont combinées à d'autres technologies, comme décrit ultérieurement dans la section II.7, le processus de conception devient encore plus complexe.</p> |
| Matériel impliqué | <p>Pour les zones humides construites classiques, les matériaux suivants sont nécessaires :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Matériaux de construction pour la structure et le liner : ciment, gravier, tuyauterie, etc. • Plantes : plus de 150 espèces de macrophytes, comme la Phragmites spp. la Typha spp ou la Scirpus spp, ont été utilisées dans les zones humides construites de manière générale. • Sol : sa composition s'étend de matières naturelles (sable, gravier) à des produits artificiels (carbone activé, compost) voire des produits dérivés industriels (cendres, écorce de palmier à huile). <p>Des matériaux spécifiques sont nécessaires en cas de modification ou d'association de ces configurations classiques avec d'autres technologies. Ex : la mise en œuvre d'une zone humide générant de l'électricité requiert la construction d'un circuit électrique complet. Cela implique des électrodes, des couches de collection d'électrons, un circuit externe et un système d'énergie et de récolte d'énergie.</p> |
| <h2>II.5 Aspects légaux associés</h2> | |
| <p>L'installation de zones humides dans des zones publiques exige la conformité aux normes municipales/régionales ; si la zone humide construite va être installée dans une zone privée, l'accord de tous les propriétaires de cette zone est obligatoire.</p> | |
| <h2>II.6 Aspects économiques et financiers</h2> | |
| Gamme de coûts | <p>L'un des principaux avantages des zones humides construites est leur faible coût par rapport à d'autres solutions. La gestion des technologies de traitement des eaux usées restera toujours plus onéreuse que la gestion des zones humides construites.</p> <p>Le coût des zones humides construites peut se répartir comme suit : excavation, liner, plantes, gravier, structures de contrôle et de répartition, et barrières.</p> <p>Dans son rapport sur les processus, les performances, la conception et le fonctionnement des zones humides construites (Kadlec et al., 2000), le groupe de l'IWA (association internationale de l'eau) spécialisé dans l'utilisation de macrophytes pour le contrôle de la pollution de l'eau a généré une analyse complète des économies liées aux zones humides construites. Il a collecté des données sur les dépenses en capital pour la construction de plusieurs dizaines de zones humides et en a tiré les conclusions suivantes. Le coût de construction moyen des zones humides à surface d'eau libre a été de 58 000 €/ha⁻¹ (notez que le prix est exprimé en dollars US pour l'année 2000), même si cette valeur s'est étendue de 10 000 à 150 000 €/ha⁻¹. Le coût de construction moyen des zones humides à surface souterraine a été de 388 000 dollars/ha⁻¹, même si cette valeur s'est étendue de 80 000 à 2 000 000 dollars/ha⁻¹.</p> <p>Les coûts opérationnels et de maintenance des zones humides construites comprennent l'énergie de pompage, la surveillance de la conformité, la maintenance des remblais et le remplacement et la réparation des équipements. La somme de ces activités est relativement peu onéreuse. Les coûts annuels sont estimés entre 2 500 et 5 000 dollars/ha⁻¹/an⁻¹.</p> |
| Origine du financement (public, privé, public/privé, autre) | <p>L'origine des eaux usées traitées par une zone humide construite établit l'origine des fonds. Si une zone humide construite traite des eaux provenant d'un quartier voisin ou de toute une ville, les fonds doivent provenir d'institutions publiques. Si une zone humide construite est mise en œuvre à des fins privées, la communauté ou les utilisateurs privés doivent couvrir le financement.</p> |

II.7 Associations possibles avec d'autres types de solutions (autres solutions écologiques ou conventionnelles)

Les trois configurations décrites dans la section I.1 sont les variantes les plus basiques. Elles ont été utilisées pendant plusieurs décennies mais de nouvelles données et avancées continuent de se manifester dans ce domaine, mettant en avant la capacité de purification des zones humides construites à surface d'eau libre, des zones humides construites à surface souterraine horizontale et des zones humides construites à surface souterraine verticale. Parmi ces nouvelles données figurent la mise en place de conditions thermiques adaptées, la recirculation des effluents, l'approvisionnement en sources de carbone externes ou la récolte de biomasse. D'autres modifications ont également été apportées aux zones humides construites classiques en vue d'augmenter leur efficacité. Ex : elles ont été combinées à d'autres technologies (zones humides construites aérées artificiellement, zones humides générant de l'électricité (Fig.7)), adaptées à de nouvelles configurations (vastes zones humides construites hybrides, zones humides construites à couloir d'écoulement circulaire, zones humides construites à surface souterraine à défecteur) ou à d'autres systèmes de traitement des eaux usées (zone humide construite à pile microbienne, zone humide construite à réacteur biologique (Fig. 8)).

Toutes ces stratégies ont permis d'améliorer l'efficacité et d'élargir la disponibilité de ces systèmes.

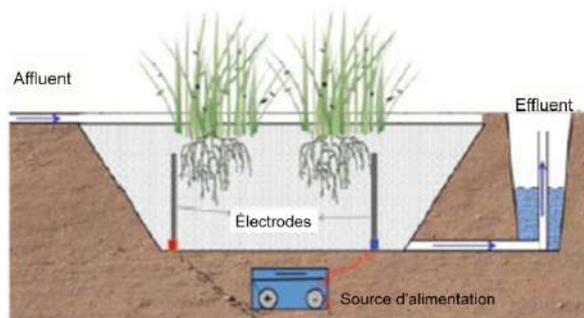


Figure 7 (Ju et al. 2014)

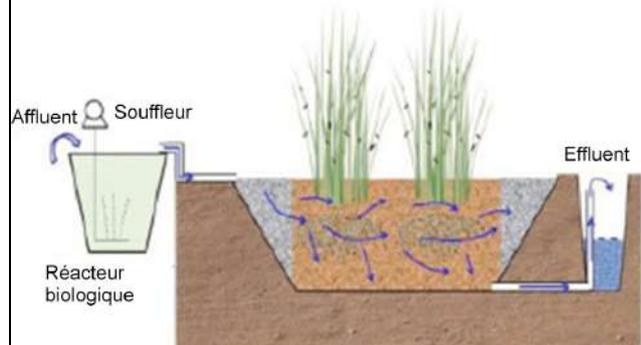


Figure 8 (Bilgin et al. 2014)

III/ Éléments clés et comparaison avec des alternatives

| III.1 Facteurs de réussite et de limite | |
|--|--|
| Facteurs de réussite | <p>Tous les paramètres suivants doivent être optimisés pour réaliser une zone humide construite efficace :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Choix des plantes : constitution des plantes, tolérance aux conditions d'hyper-eutrophie et d'anoxie, capacité d'absorption des polluants, adaptation aux climats extrêmes. • Choix de substrat : il doit fournir un milieu de croissance convenable pour les plantes, permettre le déplacement des eaux usées et absorber efficacement la plus grande variété possible de polluants. • Optimisation de la conception et des opérations : outre le choix de l'hydrologie, d'autres paramètres comme la profondeur de l'eau, la charge hydraulique et le temps de rétention, ou le mode d'alimentation, sont essentiels. |
| Facteurs de limite | <p>Les conditions terrestres pour les zones humides construites constituent le facteur le plus restrictif pour leur application étendue, notamment dans ces régions où les ressources terrestres sont rares et la densité de la population est élevée. La conception des zones humides construites, leur gestion (notamment pour les zones humides construites à surface souterraine verticale et horizontale) et la capacité de ces installations à surmonter des situations de pollution et de climat extrêmes constituent d'autres facteurs restrictifs pour l'efficacité de cette SfN.</p> <p>D'un point de vue social, nous devons prendre en compte que la mise en place des zones humides construites, en particulier celles qui comprennent une surface d'eau libre, change considérablement l'aspect des lieux urbains. En outre, pour obtenir l'acceptation du plus grand nombre, les progrès doivent être correctement présentés à la population concernée.</p> |
| III.2 Comparaison avec des alternatives | |
| Équivalent de solutions anciennes ou conventionnelles | <p>Le procédé des boues activées est la technologie la plus courante dans le domaine du traitement des eaux usées. En parallèle au développement des systèmes de zones humides construites, d'autres technologies ont émergées au cours des dernières décennies. Leur objectif est d'améliorer les performances proposées par le processus de boues activées. Certaines technologies comme l'ozonation ou la chloration se concentrent sur la dégradation tandis que d'autres, comme les carbones activés biologiquement ou les bioréacteurs à membrane, proposent des traitements plus complets.</p> <p>Concernant les solutions précédentes, les zones humides construites sont sans nul doute les solutions plus durables et font partie des technologies les plus rentables en termes de traitement des eaux usées. De plus, si elles sont correctement conçues, elles sont suffisamment efficaces pour rivaliser avec les autres solutions.</p> |
| SfN similaire | <ul style="list-style-type: none"> • Noues : aucun traitement des eaux usées • Jardins de pluie/d'infiltration : concentrées sur l'écoulement des eaux usées • Surfaces désimperméabilisées (et systèmes associés) • Utilisation de terrasses (basée sur les principes des terrasses de culture) <p>Aucune de ces solutions ne se concentre sur la purification des eaux polluées, contrairement aux zones humides construites pour la phytoremédiation, mais les applications à pleine échelle restent limitées pour cette technologie.</p> |

IV/ Références

IV.1 Références scientifiques et plus opérationnelles

- BILGIN, Melayib, SIMSEK, Ismail, TULUN, Sevket, 2014, *Treatment of domestic wastewater using a lab- scale activated sludge/vertical flow subsurface constructed wetlands by using Cyperus alternifolius*, Ecological Engineering, Vol. 70, pages 362-365.
- DIEMONT, Stewart A.W., 2006, *Mosquito larvae density and pollutant removal in tropical wetland treatment systems in Honduras*, Environmental International, Vol. 32, pages 332-341.
- JU, Xinxin, WU, Shubiao, ZHANG, Yansheng, DONG, Renjie, 2014, *Intensified nitrogen and phosphorus removal in a novel electrolysis-integrated tidal flow constructed wetland system*, Water Research, Vol. 59, pages 37-45
- KADLEC Robert H., KNIGHT, Robert L., VYMAZAL, Jan, BRIX, Hans, COOPER, Paul, HABERL, Raimund (IWA Specialist Group in Use of Macrophytes in Water Pollution Control), 2000, *Constructed wetlands for pollution control. Processes, performance, design and operation*, IWA Publishing, 171 pages.
- KADLEC Robert H. and WALLACE Scott D., 2009, *Treatment wetlands*, Taylor & Francis Group, 366 pages.
- PRASSE, Carsten, STALTER, Daniel, SCHULTE-OEHLMANN, Ulrike, OEHLMANN, Jörg, TERNES, Thomas A., 2015, *Spoilt for choice: A critical review on the chemical and biological assessment of current wastewater treatment technologies*, Water Research, Vol. 87, pages 237-270.
- THORSLUND, Josefin, et al., 2017, *Wetlands as large-scale solutions: Status and challenges for research, engineering and management*. Ecological Engineering, Vol. 108, pages 489-497.
- VYMAZAL, Jan, 2011, *Constructed wetlands for wastewater treatment: Five decades of experience*, Environmental Science and Technology, Vol. 45, pages 61-69.
- WANG, Mo, ZHANG, Dong Qing, DONG, Jian Wen, TAN, Soon Keat, 2017, *Constructed wetlands for wastewater treatment in cold climate- A review*, Journal of Environmental Science, Vol. 57, pages 293- 311.
- WU, Haiming, FAN, Jinlin, ZHANG, Jian, NGO, Huo Hao, GUO, Wenshan, LIANG, Shuang, HU, Zhen, LIU, Hai, 2015, *Strategies and techniques to enhance constructed wetland performance for sustainable wastewater treatment*, Environmental Science Pollution Research, Vol. 22, pages 14637-14650.
- WU, Haiming, ZHANG, Jian, NGO, Huo Hao, GUO, Wenshan, HU, Zhen, LIANG, Shuang, FAN, Jinlin, LIU, Hai, 2015, *A review on the sustainability of constructed wetlands for wastewater treatment: Design and operation*, Bioresource Technology, Vol. 175, pages 594-601.
- ZHANG, Baiyu, ZHENG, J.S., SHARP, Glenn R., 2010, *Phytoremediation in engineered wetlands: Mechanisms and applications*, 2010, Procedia Environmental Sciences, Vol. 2, pages 1315-1325.

IV.2 Sources utilisées dans cette fiche de renseignements

<https://sswm.info/>

<https://www.domusweb.it/>

<https://cgi.tu-harburg.de/>

<https://nawatech.net/>

<http://ecompendium.sswm.info/>

V/ Auteur(s)

| Nom | Institution/entreprise | Rédacteur/Expert |
|------------------|------------------------|------------------|
| Nicolás MARTÍN | CARTIF | Rédacteur |
| Marta de Regoyos | Acciona Ingeniería | Expert |
| Marjorie Musy | Cerema | Expert |