

LES CAHIERS

IPEMED – LA VERTICALE

N° 37 – AVRIL 2020

LES CAHIERS IPEMED – LA VERTICALE s'inscrivent dans la continuité de nos précédentes publications Palimpsestes

Projet ERANETMED2 72-300 "WABA" – WP 5

Traitement des eaux usées par une association microalgues-bactéries dans les zones rurales méditerranéennes

RAPPORT FINAL

Rastoin J.-L., Rebaï N., Robin K., Hervé-Gangloff M.

Paris, 30 janvier 2020



Projet ERANETMED2 72-300 “WABA” – WP 5
**Traitement des eaux usées par une association microalgues-bactéries
dans les zones rurales méditerranéennes**

Préambule

À la suite de son étude parue en 2016 sur le secteur des microalgues en Méditerranée¹, l’IPEMED a rejoint un consortium composé du Commissariat à l’Énergie Atomique (CEA, France), de l’Université de Cordoue (Espagne) et de la fondation MAScIR (Maroc), pour la réalisation d’un projet de recherche ERANETMED de l’Union européenne destiné à étudier la possibilité d’utiliser des souches spécifiques de microalgues et bactéries pour la bio-dépollution des eaux usées en milieu rural et l’utilisation de la biomasse obtenue pour la production de biofertilisants et de biostimulants (projet WABA)².

Le WP 5 pris en charge par IPEMED a été conduit en 2018 et 2019 successivement par Kelly Robin, Morgane Hervé-Gangloff et Nasser Rebaï, chefs de projet à IPEMED, avec la collaboration du Pr Jean-Louis Rastoin, Montpellier SupAgro, expert associé IPEMED. Le WP 5 se matérialise par 3 rapports :

- 1/ Le contexte socio-économique et environnemental de l’assainissement des eaux usées dans les zones rurales des pays méditerranéens
- 2/ Évaluation du potentiel des STations d’ÉPuration des eaux usées (STEP) avec microalgues par des experts internationaux
- 3/ Étude de cas sur la STEP de Combaillaux (Région Occitanie, France)

IPEMED tient à remercier bien vivement les nombreux spécialistes, scientifiques et responsables des secteurs public et privé qui ont bien voulu contribuer à ce projet de recherche.

La désormais incontournable transition socio-écologique va nécessiter de profondes innovations dans nos modèles de production et de consommation, particulièrement dans les filières agricoles et alimentaires du monde méditerranéen, et donc impacter fortement les espaces ruraux. Les microalgues devraient constituer dans cette perspective un élément important de la nouvelle bioéconomie circulaire à mettre en place.

Jean-Louis Guigou
Président

¹ <http://www.ipemed.coop/fr/publications-r17/etudes-analyses-c108/le-secteur-des-micro-algues-en-mediterranee-a2835.html>

² Le projet WABA est coordonné par Alexandra Dubini, université de Cordoue.
<http://www.uco.es/internacional/proyectosinternacionales/waba/>

Synthèse

Rapport 1 - Les pays méditerranéens, notamment ceux de la rive sud, doivent faire face aux changements globaux contemporains (réchauffement climatique, croissance urbaine) et construire des systèmes alimentaires durables. Ainsi, la gestion des ressources hydriques représente pour eux un défi majeur à relever, et le traitement des eaux usées un objectif stratégique pour y parvenir. Dans ce contexte, le développement de Stations d'Épuration des eaux usées (STEP) avec microalgues pourrait être une voie à suivre. En effet, de multiples études dans les champs de l'ingénierie et de la biologie soulignent le potentiel innovant des microalgues pour le traitement des eaux usées. Toutefois, le manque de connaissance sur le potentiel économique de cette technologie ne permet pas de l'affirmer définitivement. La réalisation de projets de recherche portant spécifiquement sur le potentiel économique des STEP avec microalgues devrait donc constituer, à l'avenir, une priorité pour les pays méditerranéens.

Rapport 2 – Ce rapport cherche à évaluer dans quelle mesure le développement de Stations d'Épuration des eaux usées (STEP) avec microalgues permettrait aux pays méditerranéens, qui doivent faire face aux changements globaux contemporains (réchauffement climatique, croissance urbaine), de mettre en place des systèmes innovants de gestion durable de leurs ressources hydriques. Pour cela, l'IPEMED a mené une enquête de type qualitatif auprès de 19 experts internationaux spécialistes du traitement des eaux usées. La grande variété des origines géographiques des experts a permis de diversifier les points de vue et de disposer d'éléments d'analyse plus complets sur le potentiel réel du développement de STEP avec microalgues dans des pays aux réalités environnementales et aux niveaux d'équipement très différents. D'un point de vue général, les avis des experts internationaux s'accordent sur le fait que l'usage des microalgues pour le traitement des eaux usées présente certains avantages, notamment sur le plan environnemental. Toutefois, leurs avis mettent également en évidence que le développement de STEP avec microalgues se heurte à différents problèmes. Il est séduisant, en effet, de penser à cette technologie « verte » pour favoriser la transition écologique du traitement des eaux usées et, au-delà, celle des sociétés contemporaines, notamment en Méditerranée. Cependant, les experts sont en attente d'une évaluation des performances techniques et socio-économiques par une expérimentation à plus grande échelle de la technologie de dépollution à base de microalgues.

Étude de cas - La STEP de Combaillaux, située en France en zone de piémont méditerranéen, a été installée en 2004, en utilisant la technologie de filtration des eaux usées par un substrat d'écorces végétales contenant des vers de terre (lombrics *Eisenia andrei*). Elle est dimensionnée pour 2 200 habitants. Les études comparatives menées avec les autres procédés d'épuration montrent une grande efficacité de traitement de ce procédé pour un coût d'investissement et de fonctionnement sensiblement inférieur. Son caractère innovant et la rigidité des réglementations limitent son extension, ce qui suggère une autre approche pour les microalgues. Notamment en concevant un programme spécifique pour les zones rurales encourageant des STEP de petites dimensions favorisant la proximité.



Projet ERANETMED2 72-300 “WABA”
**Traitement des eaux usées par une association microalgues-bactéries dans
les zones rurales méditerranéennes**

RAPPORT 1

Le contexte socio-économique et environnemental de l’assainissement des eaux usées dans les zones rurales des pays méditerranéens

Jean-Louis RASTOIN, jean-Louis.rastoin@supagro.fr
Nasser REBAI, nasser.rebai@ipemed.coop

16/01/2020

Résumé

Les pays méditerranéens, notamment ceux de la rive sud, doivent faire face aux changements globaux contemporains (réchauffement climatique, croissance urbaine) et construire des systèmes alimentaires durables. Ainsi, la gestion des ressources hydriques représente pour eux un défi majeur à relever, et le traitement des eaux usées un objectif stratégique pour y parvenir. Dans ce contexte, le développement de Stations d’Épuration des eaux usées (STEP) avec microalgues pourrait être une voie à suivre. En effet, de multiples études dans les champs de l’ingénierie et de la biologie soulignent le potentiel innovant des microalgues pour le traitement des eaux usées. Toutefois, le manque de connaissance sur le potentiel économique de cette technologie ne permet pas de l’affirmer définitivement. La réalisation de projets de recherche portant spécifiquement sur le potentiel économique des STEP avec microalgues devrait donc constituer, à l’avenir, une priorité pour les pays méditerranéens.

Introduction

Les pays méditerranéens, notamment ceux de la rive sud, sont marqués par de fortes inégalités territoriales. D'une part, un littoral qui concentre l'essentiel de l'activité économique, des infrastructures et de la population, et, d'autre part, un espace rural souvent enclavé, sous-équipé, aux ressources naturelles rares, marqué par de plus hauts niveaux de pauvreté. Dans un contexte de réchauffement climatique, et alors que l'Objectif de Développement Durable n° 6 des Nations Unies appelle à « *garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable*³ », une gestion optimale de l'eau constitue un impératif qui appelle un nouveau modèle technico-économique et de gouvernance des ressources hydriques. Ainsi, et au regard des enjeux sociaux et environnementaux en Méditerranée, la question du traitement des eaux usées [Cf. Encadré n° 1] prend aujourd'hui une grande importance.

Encadré 1 – Technologies de traitement des eaux usées

Le traitement des eaux usées vise à réduire au maximum les pollutions par des agents pathogènes bactériens, le carbone, l'azote et le phosphore. Les STations d'Épuration (STEP) sont dimensionnées pour traiter une certaine charge d'éléments polluants et assurer un rejet de matières conforme à la réglementation en vigueur dans le pays concerné⁴.

Après des pré-traitements (dégrillage, tamisage, dessablage, dégraissage), on procède à des traitements primaires (aération, brassage, décantation) destinés à faire une épuration grossière de l'eau. Puis, des traitements secondaires par procédés physico-chimiques (floculation et coagulation) ou biologiques sont réalisés.

Actuellement, 5 technologies biologiques de dépollution sont utilisées dans les STEP :

- **Boues activées** (dégradation de la matière organique par des bactéries digérées par des micro-organismes protozoaires).
- **Lagunage** (utilisation de la déseutrophisation dans des bassins de transit des eaux usées).
- **Lit bactérien** (filtration sur substrat de roches volcaniques, pouzzolane ou coke métallurgique hébergeant des bactéries)
- **Lombri-filtration** (filtration sur substrat de copeaux de bois hébergeant des lombrics).
- **Microalgues** (digestion par une biomasse algale sélectionnée et élevée dans des bassins).

Il est à préciser que les deux dernières technologies sont encore au stade expérimental.

³ <https://www.agenda-2030.fr/odd/odd-6-garantir-laccès-de-tous-leau-et-lassainissement-et-assurer-une-gestion-durable-des>

⁴ Pour la France, voir l'étude de cas de la STEP de Combaillaux (département de l'Hérault) présentée dans ce même Work Package.

Répondre aux besoins en eau d'une population croissante⁵

La région méditerranéenne, qui compte 24 pays, et plus précisément 11 Pays du Sud et de l'Est Méditerranéen (PSEM), 9 pays de l'Union européenne, et 4 autres dans les Balkans, est marquée par des écarts importants de croissance démographique. D'après des projections récentes (Le Mouel et Schmitt, 2017), la population méditerranéenne de l'UE et des Balkans devrait se maintenir autour de 200 millions d'habitants, entre 2018 et 2050, tandis que celle des PSEM devrait passer de 325 à 450 millions d'habitants sur la même période. En ce qui concerne précisément la population rurale, celle-ci devrait régresser dans tous les pays.

Dans le scénario tendanciel, elle devrait être de 148 millions de personnes en 2050, contre 172 millions en 2018. Cela signifie que, durant les trois prochaines décennies, l'exode rural devrait s'accroître tandis que dans le même temps l'emploi urbain devrait décliner, notamment en raison de la robotisation croissante des tâches dans le secteur industriel.

Toutefois, un scénario fondé sur une transition écologique de l'agriculture et de l'alimentation, sur les principes d'une bioéconomie circulaire territorialisée, permettrait d'atteindre 186 millions d'emplois ruraux et, par conséquent, la création nette de 38 millions d'emplois par rapport à l'hypothèse tendancielle (Rastoin *et al.*, 2016).

Concernant les ressources en eau, celles-ci sont abondantes en Europe méditerranéenne et en Turquie, alors que les PSEM sont en dessous du stress hydrique (1 000 m³/habitant/an). Dans la plupart des pays méditerranéens, l'agriculture reste le principal secteur d'utilisation de l'eau (plus de 60 % du total prélevé). Du point de vue de l'infrastructure, les pays méditerranéens sont équipés de près de 15 000 STEP, dont 87 % se trouvent dans les pays européens. Le nombre théorique moyen d'habitants par station est de 15 900 dans les pays euro-méditerranéens, et de 170 000 dans les PSEM, avec de gros écarts entre pays. Ainsi, l'Italie compte en moyenne une STEP pour 22 000 habitants tandis que le Maroc compte une STEP pour 471 000 habitants. On ne dispose malheureusement pas de statistiques détaillant les équipements en STEP par zone urbaine ou rurale dans la banque de données Aquastat de la FAO. Une indication est cependant disponible pour l'Égypte, avec un taux d'équipement en STEP, en 2016, de 93 % dans les villes, et de seulement 15 % dans l'espace rural (Wahaab, 2018).

Dès lors, améliorer de façon durable le traitement des eaux usées en milieu rural apparaît un objectif important, notamment sur le plan de la santé, dans la mesure où de très nombreuses maladies infectieuses sont liées à l'absence de dispositif performant de gestion de ces eaux. Ainsi, selon l'OMS, un tiers de la population mondiale n'a pas accès à des installations sanitaires (principalement en zone rurale des pays du Sud) et les maladies diarrhéiques ont provoqué 116 000 décès dans les pays de la région Moyen-Orient-Afrique du Nord en 2016 (WHO & UNICEF, 2017).

Les microalgues pour répondre aux besoins en eau en Méditerranée ?⁶

Dans ce contexte d'espace rural marginalisé, de pauvreté, et de déficit d'innovations adaptées, la technologie de traitement des eaux usées par microalgues est prometteuse. Si elle était en phase expérimentale, il y a encore peu de temps (Rastoin, 2016), il convient de souligner que le nombre d'entreprises, de tailles variables, spécialisées dans la production de microalgues, a nettement augmenté ces dernières années, en France comme dans plusieurs autres pays

⁵ Cf. Annexes 1 à 11.

⁶ Cf. Annexes 12 à 15.

(Persistence Market Research, 2018). Cela constitue un indice intéressant sur le potentiel économique de cette technologie.

Cependant, les informations disponibles sur les coûts d'investissement et de fonctionnement qu'elle implique sont lacunaires. À ce jour, alors que plusieurs dizaines d'articles et de travaux universitaires dans les champs de l'ingénierie et de la biologie sont référencés sur l'analyse des propriétés et des effets des microalgues, les analyses sur le potentiel économique du développement de structures de traitement des eaux usées par microalgues ne font l'objet, en revanche, que de trop rares développements, dans des publications parfois assez anciennes (Bastian and Reed, 1979 ; O'Brien, 1981 ; Oron *et al.*, 1985 ; Hussein *et al.*, 2004 ; Deng *et al.*, 2006). Certes, il pourrait être rappelé que des travaux importants sur les intérêts multiples de l'usage de microalgues pour le traitement des eaux usées (Larsdotter, 2006 ; Alam M., Wang, 2019), et notamment dans les pays en développement (Al Okoh *et al.*, 2007 ; Abdel-Raouf *et al.*, 2012), ont abordé la question économique, mais leurs contributions sur ce point précis sont demeurées très générales et donc superficielles. Il n'existe ainsi que quelques analyses, circonscrites à de petits territoires non méditerranéens, mais certaines d'entre elles apportent cependant des indications intéressantes.

À titre d'exemple, une étude menée en France a mis en évidence qu'en 2010, le traitement des eaux usées par microalgues représentait un coût d'investissement de 15 €/équivalent habitant (EH) et un coût annuel d'exploitation de 5,5 à 9,20 €/équivalent habitant, contre 250 à 330 €/EH d'investissement et 17 à 23 €/EH d'exploitation pour le procédé des boues activées par membrane (DREAL-Bretagne, 2012). De même, une étude conduite aux États-Unis a montré que l'investissement et la maintenance étaient estimés à 300 k\$ (228 €) /an/MGD⁷ traité pour le procédé microalgues, contre près d'1 M\$ pour le procédé A2/O⁸, tandis que le bilan de gaz à effet de serre est 3 fois plus favorable (Lundquist *et al.*, 2015). Enfin, une analyse produite en Nouvelle-Zélande chiffre le coût de construction d'une STEP expérimentale de 5 ha à Christchurch à 9,6 NZ \$/m² pour le BTP et 17,1 NZ \$/m² pour les équipements, soit 28,7 NZ \$/m² au total, l'équivalent de 15 € environ (Craggs *et al.*, 2012)⁹.

Perspectives¹⁰

Les analyses économiques existantes sur le développement des STEP avec microalgues apportent des éléments intéressants, mais, comme il a déjà été dit, ils demeurent, pour le moment trop parcimonieux. La robustesse économique des STEP avec microalgues reste en effet à établir. C'est pourquoi il convient de mener des études de cas approfondies, dans différents contextes nationaux. La réalisation de projets de recherche portant spécifiquement sur le potentiel économique des STEP avec microalgues devrait donc constituer une priorité scientifique afin de confirmer si cette technologie peut contribuer à relever les multiples défis auxquels les pays méditerranéens seront confrontés dans les prochaines années. Le développement de STEP avec microalgues pourrait également constituer l'objet de réflexions en sciences sociales qui porteraient sur le rôle de ces technologies pour améliorer la gouvernance des ressources hydriques dans les territoires ruraux. Enfin, l'augmentation du nombre d'entreprises ayant investi dans le développement de technologies de traitement des eaux par microalgues ces dernières années, en Europe comme dans le reste du monde, constitue un signal fort du potentiel économique de ces structures. Il confirme le besoin de continuer à

⁷ MGD: Million Gallons by Day (million de gallons par jour).

⁸ A2/O: Anaerobic/anoxic/oxic, procédé d'épuration.

⁹ Cf. Annexe 13.

¹⁰ Cf. Annexes 16 et 17.

mener des études afin de disposer d'informations robustes que les gouvernements des États méditerranéens pourraient mobiliser pour encourager le développement de STEP avec microalgues.

Plus globalement, on peut considérer que les microalgues, du fait de leur potentiel de production et de leurs nombreuses applications outre le traitement des eaux usées (alimentation humaine et animale, bioénergie, molécules utiles dans l'industrie chimique), pourraient constituer de multiples opportunités de création de clusters en zone rurale en phase avec des marchés émergents¹¹. La ferme LDC implantée en 2017 en Bretagne (France) en est une bonne illustration¹².

Conclusion

Dans les pays méditerranéens, où l'urbanisation croissante, la demande sociale et les transformations environnementales induites par le réchauffement climatique imposent de repenser la gestion des ressources hydriques, en particulier dans les zones rurales, le développement de STEP avec microalgues pourrait permettre d'atteindre les Objectifs de Développement Durable de l'ONU. À ce jour, de multiples études dans les champs de l'ingénierie et de la biologie soulignent le potentiel innovant des microalgues pour le traitement des eaux usées. On peut ainsi émettre l'hypothèse que l'équipement des zones rurales méditerranéennes en STEP dotées de technologies innovantes avec microalgues, relativement peu exigeantes en capitaux, et contribuant au développement durable, pourrait favoriser une décongestion des grandes villes par une stratégie de bioéconomie circulaire territorialisée.

Encadré 2 – La bioéconomie circulaire territorialisée

La bioéconomie (Georgescu-Roegen, 1977) est l'exploitation de ressources naturelles renouvelables, dont la biomasse (végétaux, animaux, micro-organismes incluant les microalgues) à des fins économiques (principalement la production d'énergie, comme la méthanisation de déchets) et de co-produits (alimentaires ou non-alimentaires tels que les composants de substitution à la chimie de synthèse basée sur le carbone fossile). L'économie circulaire est la valorisation et l'élimination des déchets d'une production primaire telle que l'agriculture, ou secondaire telle que l'industrie. La territorialisation signifie que l'on privilégie la proximité dans l'utilisation de la biomasse (Rastoin, 2019).

Selon un récent rapport d'évaluation ex post du projet FISONG [Facilité d'innovation sectorielle pour les ONG] financé par l'AFD [Agence française de développement] : « *Les progrès en matière d'assainissement sont insuffisants pour espérer un accès universel aux services d'assainissement en 2030. Innover est une nécessité. Cependant, l'innovation sociale est un processus complexe, qui requiert du temps et une approche méthodique* » (Ronsse, 2019).

La technologie d'assainissement des eaux usées par les microalgues pourrait constituer l'une de ces innovations pour réduire les inégalités régionales et celles entre villes et campagnes. Pour cela, de nouvelles recherches sur le potentiel économique des STEP avec microalgues pourraient générer des informations utiles pour la mise en place de politiques publiques

¹¹ Cf. Annexe 18

¹² Cf. Annexe 19

innovantes décentralisées, pour l'environnement, l'économie et la sécurité alimentaire en Méditerranée.

C'est ainsi qu'un projet de recherche « WABA 2 », spécifiquement orienté sur l'évaluation du potentiel socio-économique des STEP en zone rurale, est recommandé. D'un point de vue méthodologique, il pourrait reposer sur un travail d'enquête à mener dans plusieurs pays méditerranéens aux caractéristiques sociales et économiques variées et inégalement dotés en STEP. L'objectif serait d'aller à la rencontre des institutions publiques chargées de la gestion des eaux et de rencontrer dans le même temps les entrepreneurs privés impliqués dans la production de microalgues. Le recueil d'informations économiques et d'avis d'experts sur le potentiel et les limites du traitement des eaux usées par microalgues pourrait donner lieu à la production d'un diagnostic précis des besoins et des moyens à mettre en œuvre pour le développement de cette technologie, afin de répondre aux enjeux sociaux et environnementaux dans les pays méditerranéens.

Références bibliographiques

Abdel-Raouf A., Al-Homaidan I., Ibraheem B., 2012, Abdel-Raouf^aA.A.Al-Homaidan^bI.B.M.Ibraheem^{bc} “Microalgae and wastewater treatment”. *Saudi Journal of Biological Science*, 19 (3) 257-275.

Alam M., Wang Z., 2019. *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. Singapore: Springer, 655 p.

Bastian R.K., Reed S.C., 1979. *Aquaculture systems for wastewater treatment*. Seminar Proc. And Engin. Assessment. U.S. EPA, Washington D.C.

Craggs R., Sutherland D., Campbell H., 2012. “Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production”. *Journal of Applied Phycology*, 24: 329–337

Deng L., Su Y., Su H., Wang X., Zhu X., 2007. “Sorption and desorption of lead [Pb] from wastewater by green algae *Cladophora fascicularis*”. *Journal of Hazardous Materials*, 143 (1–2): 220–225.

DREAL-Bretagne, 2012. *Études d'impact des projets : Stations d'épuration et choix des filières de traitement*. Rennes, 13 p.

Georgescu-Roegen N., 1977, “Bioeconomics : a new look at the nature of economic activity”, in Louis Junker (ed.), *The Political Economy of Food and Energy*, Ann Arbor: University of Michigan. Michigan Business Papers, n°62, 105–134.

Hussein H., Ibrahim S.F., Kandeel K., Moawad H., 2004. “Biosorption of heavy metals from wastewater using *Pseudomonas* sp Electron”. *Journal of Biotechnology*, 7 (1): 0717–3458

Larsdotter K., 2006. “Wastewater treatment with microalgae—a literature review”. *Vatten*, 62 : 31-8

Le Mouel C., Schmitt B., 2017. *La dépendance alimentaire de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient à l'horizon 2050*. Paris: Quæ, 144 p.

Lundquist T., Woertz I., Hutton M., Spierling R., Blackwell S., Crowe B., 2015. *Wastewater Reclamation and Biofuel Production Using Algae*, Seminaire Bioenergy, Washington DC.

O'Brien W. J., 1981, "Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment". *Journal of the Environmental Engineering Division*, 107:618–698.

Okoh A., Odjadjare E.E., Igbinosa E.O., Osode A.N., 2007, Wastewater treatment plants as a source of microbial pathogens in receiving watersheds. *African Journal of Biotechnology*, 6 (25) : 2932-2944.

Oron G., L. R. Wildschut, D. Porath, 1985. "Wastewater recycling by Duckweed for protein production and effluent renovation". *Water Science and Technology*, 17 (4–5): 803–818.

Pearce-Oroz G., 2011. *Rural Water Supply and Sanitation Challenges in Latin America for the Next Decade*. Lima: World Bank, 32 p.

Persistence Market Research, 2018. *Microalgae Market: Global Industry Analysis [2012–2016] and Forecast [2017–2026]*. Persistence Market Research: New York, 170 p.

Rastoin, J. L., 2016. *Le secteur des microalgues en Méditerranée : Perspectives et contribution au développement durable*. Paris: IPEMED, 87 p.

Rastoin J.-L., Abis S., Allaouat B., Benabderrazek H., Cgeriet F., Ferroukhi S.A, Hainzelin E., Hammoudi A., Koné S., Martin-Prével Y., 2016, *Africa-Mediterranean-Europe: Towards sustainable and shared food security and sovereignty*. Paris: IPEMED, Palimpseste n° 12.

Rastoin J.— L., 2019, « Le cluster de bioéconomie circulaire territorialisée, instrument d'une nouvelle dynamique des systèmes alimentaires et des espaces ruraux ». *Systèmes alimentaires -Food Systems*, 4 : 17-24

Ronsse E., 2019, *Évaluation et capitalisation des innovations issues de la FISONG pour l'assainissement [2012-2017]*. Rapport de synthèse, Évaluation Ex-post n° 80. Paris : AFD, 28 p.

Wahaab Rifaat A., 2018. « L'assainissement en Égypte : enjeux et perspectives ». In: *L'assainissement et ses enjeux*. Notes techniques n° 42, 36-40. Paris : AFD.

World Health Organization [WHO] and the United Nations Children's Fund [UNICEF], 2017. *Progress on drinking water, sanitation and hygiene: 2017 update and SDG baselin. Annexes*

Rapport 1

Le contexte socio-économique et environnemental de l'assainissement des eaux usées dans les zones rurales des pays méditerranéens **ANNEXES (1-19)**

Jean-Louis.Rastoin@supagro.fr



IPEMED

- INSTITUT DE PROSPECTIVE ÉCONOMIQUE DU MONDE MÉDITERRANÉEN -

Annexe 1

ODD 6 : Eau et assainissement

ONU, Assemblée générale, 2015, *Transformer le monde : le Programme de développement durable à l'horizon 2030*, A/70/L.1, New York



ODD n°6 : « Garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable »



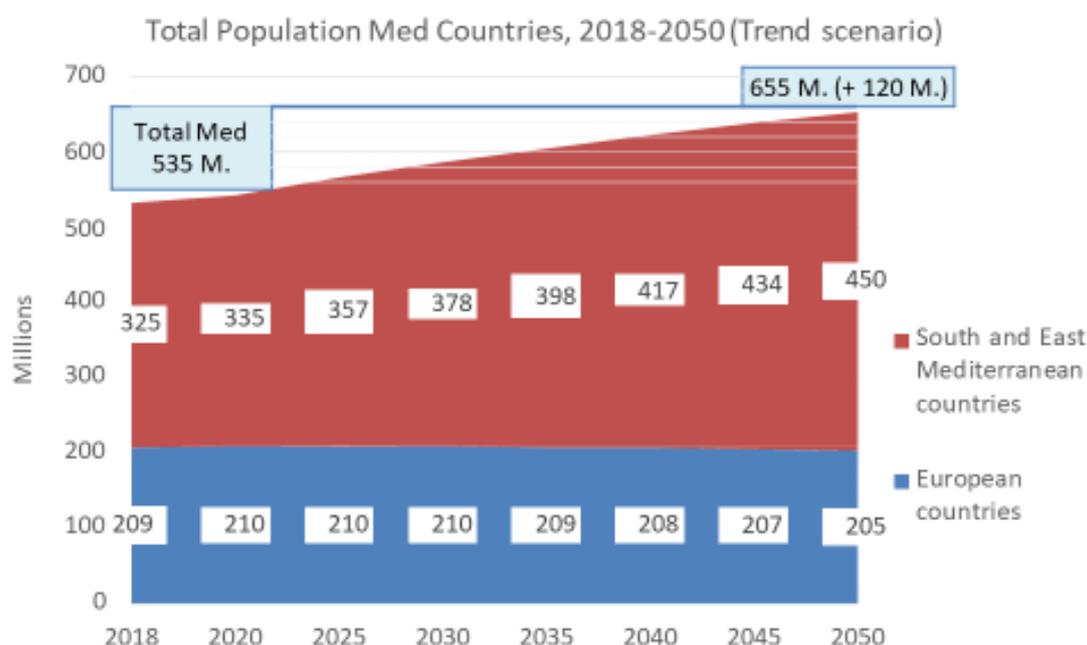
Annexe 2

De fortes disparités économiques

Pays et zones	PIB par habitant (USD)	PIB (MDS USD)	Population totale (1000 hab)	Population rurale/totale	VA Agriculture (% PIB)
France	37 581	2 420	64 395	20%	1,7
Israël	36 706	296	8 064	10%	5,0
Italie	30 269	1 810	59 798	29%	2,3
Europe médit. (13)	28 652	5 986	208 923	25%	2,2
Espagne	26 018	1 200	46 122	19%	2,5
Méditerranée (24)	15 150	7 808	515 354	33%	3,8
Sud & Est médit. (11)	5 945	1 822	306 431	38%	9,0
Maroc	2 909	100	34 378	41%	13,0
Palestine	2 716	13	4 668	27%	4,5
Syrie	2 080	40	18 502	31%	17,9

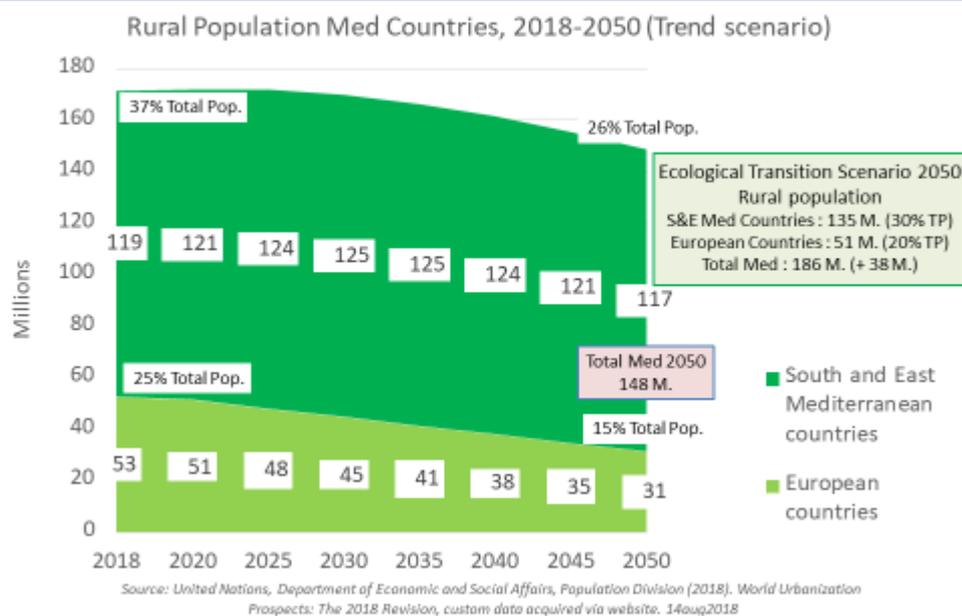
Source : www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=fr 15August2018

Annexe 3



Source: United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2018). World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, custom data acquired via website. 14aug2018

Annexe 4



Annexe 5 : Exode agricole (et rural) dans les PSEM, 2015-2035
(Hypothèse d'une division par 2 du ratio PAA/PAT)

Pays et zone	2015		Variation 2015-35 (H. : %PAA/2)	
	Population active agricole (Milliers)	Part dans la population active totale	Population active agricole (Milliers)	%
Egypt, Arab Rep.	8 011	26%	-2 056	-26%
Turkey	5 978	20%	-1 369	-23%
Morocco	4 460	36%	-1 281	-29%
Algeria	1 119	9%	-262	-23%
Tunisia	615	15%	-273	-44%
PSEM	21 834	21%	-5 555	-25%
World	851 461	25%	-300 363	-35%

Source des données de base : WDI, WB, oct. 2017

Annexe 6

Estimated deaths by cause, Eastern Mediterranean Region*

Death causes	2016	2000-2016 Change	
	Thousand	Thousand	%
All causes	4 122	734	22%
Noncommunicable diseases	2 607	815	45%
Communicable diseases	1 026	-270	-21%
Injuries	225	148	193%
Direct or indirect Foodborne diseases (FBD)			
Cardiovascular diseases	1 317	378	40%
Malignant neoplasms	410	151	58%
Diabetes mellitus	131	65	99%
Diarrhoeal diseases	116	-71	-38%
Nutritional deficiencies	19	-2	-11%
Drug & Alcohol use disorders	9	1	21%
Foodborne diseases	2 002	521	35%
FBD/Total	49%		
Total Population (Millions)	664	193	41%

Source: WHO, GHO Database, 16 August 2018

* 21 countries
North Africa
& Middle East

Water
Sanitation

Annexe 7

Usages de l'eau dans le monde, 2005

Eau mobilisée par l'homme ("eau bleue" : captage rivières & nappes)		
Eau prélevée pour l'irrigation	2 664 km ³	70%
Eau pour usages domestiques	381 km ³	10%
Eau pour l'industrie et l'énergie thermo-électrique	785 km ³	20%
Total eau mobilisée par l'homme	3 830 km ³	100%
Eau utilisée par l'agriculture (évapotranspiration)		
Arrosage naturel par les pluies ("eau verte")	5 560 km ³	78%
Irrigation	1 570 km ³	22%
Total eau utilisée par l'agriculture	7 130 km ³	100%

Source: Water for food, water for life, IWMI, 2007 & CGAAR, 2012

JL Rastoin-HydroGala-180517

Annexe 8 : Ressources et prélèvements en eau dans la région méditerranéenne, 2014

Pays et zones	Ressources en eau renouvelables par habitant (m3/hab/an)	Indice de dépendance extérieure (%)	Prélèvements/Ressources renouvelables (%)
Europe méditerranéenne	4 194	21,4	16,6
France	3 277	5,2	14,3
Italie	3 199	4,6	28,1
Turquie	2 690	1,5	19,9
Espagne	2 418	0,3	33,5
Total Méditerranée	2 358		25,9
Pays Sud & Est Médit.	1 112	30,3	49,8
Maroc	844		36,0
Égypte	637	96,9	
Tunisie	410	9,1	
Algérie	294	3,6	

Source: www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=fr 15August2018

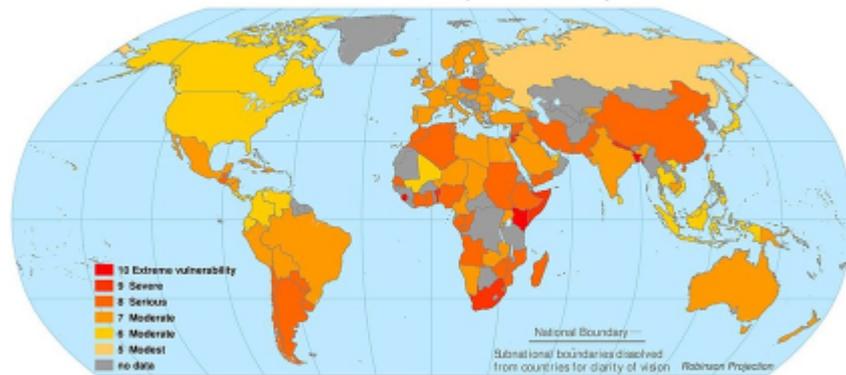
Annexe 9 : Répartition des usages de l'eau (1998 à 2015, selon pays)

Pays et zones	Prélèvement d'eau annuel en % du total			Prélèvement d'eau total (somme des secteurs) (10 ⁹ m3/an)
	Agriculture	Usages industriels	Municipalités	
Maroc	88	2	10	10,4
Égypte	86	3	12	78,0
Pays Sud & Est Médit.	81	5	14	169,5
Tunisie	80	5	15	3,3
Turquie	75	10	15	42,0
Espagne	68	18	14	37,4
Total Méditerranée	63	18	15	313,9
Algérie	59	5	36	8,4
Pays Europe Médit.	41	33	17	144,3
Italie	24	30	18	53,8
France	10	71	18	30,2

Source: www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=fr 15August2018

Le changement climatique en Méditerranée : vers une zone aride et semi-aride ?

Global Distribution of Vulnerability to Climate Change
Combined National Indices of Exposure and Sensitivity



Scenario A2-550 in Year 2050 with Climate Sensitivity Equal to 5.5 Degrees C
Annual Mean Temperature with Extreme Events Calibration

<http://icesin.columbia.edu/data/climate/>



©2008 Wesleyan University and Columbia University

Annexe 11

Traitement des eaux usées (2006-2012, selon pays)

Pays et zones	Nombre de stations d'épuration d'eaux usées municipales	Nombre théorique moyen d'habitants par station	Eaux usées municipales produites (10 ⁹ m ³ /an)	% Eaux usées traitées	Utilisation directe d'eaux usées municipales traitées (%)
Italie	2 717	22 009	3,9	99	1
Espagne	2 041	22 598	3,2	99	16 Pays
Pays Europe Médit.	13 072	15 903	12,4	98	9
France	3 275	19 663	4,0	94	11
Turquie	604	130 242	4,3	81	1
Tunisie	109	103 248	0,3	79	30
Total Méditerranée	14 875	34 575	28,5	76	17
Pays Sud & Est Médit.	1 803	169 956	16,1	59	27
Égypte	382	239 550	7,1	57	32
Algérie	138	287 442	0,8	40	0
Maroc	73	470 932	0,7	24	42

Source: www.fao.org/nr/water/aquastat/data/query/index.html?lang=fr 15 August 2018

Annexe 12 : Sous-équipement en STEP des zones rurales en Méditerranée



Source : Rifaat Abdel WAHAAB, Holding Company of Water and Wastewater, Egypte, 2018, *L'assainissement et ses enjeux, Notes techniques, n°42, AFD, Paris*

Annexe 13 : Construction costs of the 5-ha Christchurch demonstration wastewater treatment high rate algal pond system, NZ,2009

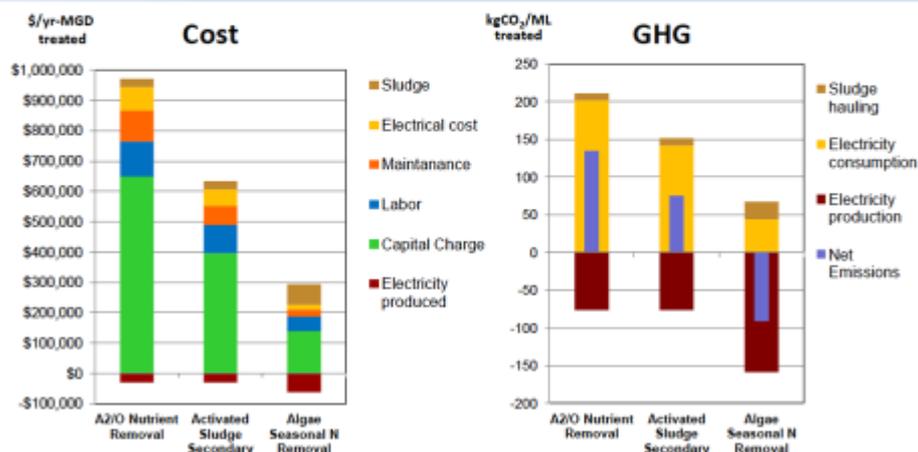
	Cost NZ \$	Cumulative cost NZ \$	Cumulative cost NZ \$ ha ⁻¹	Cumulative cost NZ \$ m ⁻²
Pond				1 NZ\$ = 0,57 €)
Earthwork	\$108,000.00			
Embankment protection	\$51,000.00			Investment = 9,6 NZ\$/m2
End baffles	\$26,000.00	\$185,000.00	\$37,000.00	\$3.70
Mixing				
Paddlewheels (inc VSD)	\$87,000.00			
Paddlewheel stations	\$23,000.00	\$295,000.00	\$59,000.00	\$5.90
CO ₂ addition				
CO ₂ sumps with baffles	\$90,000.00			Devices = 17,1 NZ\$/m2
CO ₂ spargers	\$22,000.00	\$407,000.00	\$81,400.00	\$8.14
pH control and valves	\$41,000.00	\$448,000.00	\$89,600.00	\$8.96

Source: Rupert Craggs & Donna Sutherland & Helena Campbell, 2012, Hectare-scale demonstration of high rate algal ponds for enhanced wastewater treatment and biofuel production, *J Appl Phycol* (2012) 24:329–337

Annexe 15 :

Algae wastewater treatment is low cost and energy efficient. Algae nutrient removal is seasonal.

Save 50% total cost. Save 67% electricity (w/out biogas)



Lundquist T, Ian Woertz, Matt Hutton, Ruth Spierling, Shelley Blackwell, Braden Crowe, 2015, *Wastewater Reclamation and Biofuel Production Using Algae*, Bioenergy | June 24, 2015 | Washington DC

Annexe 14 : Estimation du coût des traitements biologiques des eaux usées, France, 2010

Filières	Investissement (€ HT / Equivalent habitant)	Coût d'exploitation (€ HT/Equivalent habitant/an)
Boues activées	200 à 300	15 à 20
Boues activées à membrane	250 à 330	17 à 23
Lagunage algal	15	5,5 à 9,2

Source : DREAL-Bretagne, 2012, Etudes d'impact des projets : Stations d'épuration et choix des filières de traitement

Annexe 16 : Recommandations

Rifaat Abdel WAHAAB, *Holding Company of Water and Wastewater (HCWW)*, Egypte

- Evaluer tout projet en zone rurale et les intégrer dans le plan national stratégique d'assainissement ;
- Standardiser les équipements d'assainissement pour bénéficier des économies d'échelle et réduire les délais de construction ;
- Créer une institution de gestion centralisée des systèmes décentralisés d'assainissement ;
- Intégrer et contrôler le secteur privé dans les projets de STEP ;
- Gestion des boues de station d'épuration : une nécessité pour la protection de l'environnement et de la santé ;
- Biogaz : source très intéressante d'énergie verte qui pourrait avoir un impact positif sur la réduction des émissions de GES

• *Source : Ibid*

Annexe 17: World Bank' Water & Sanitation Program: Five cross-cutting trends

- (i) Recognition that the demand is diversified;
- (ii) The importance of water resources management;
- (iii) The importance of inter-sector coordination;
- (iv) Financial management of the services over the medium and long term;
- (v) The use of public-private-social partnerships as a tool for enhancing synergy.

Source: Glenn Pearce-Oroz, 2011, Rural Water Supply and Sanitation Challenges in Latin America for the Next Decade, WSP, World Bank, Lima: 32 p.

Annexe 18

Fields of application of microalgae

Field	Microalgae	
	Strengths	Weaknesses
Agriculture	1) <i>C Fossil substitution by biological C & animal by plant</i> 2) <i>High surface productivity</i> 3) <i>Co-products (diversification),</i> 4) <i>Territorial development: economic activity and employment</i>	1) <i>Investment and operating costs</i> 2) <i>Production Smoothing</i> 3) <i>Regulatory constraints and patents</i> 4) <i>Risks of toxicity or competition that could compromise the "useful" production</i>
Food and Feed		
Health		
Cosmetic		
Industrial additives		
Fuels		
Waste management		

Source : Rastoin, J.L., 2016, *Le secteur des microalgues en Méditerranée : Perspectives et contribution au développement durable*, Collection Etudes & Analyses, IPEMED, Paris : 87 p.

Waba-Cordoba-051018-JLR

30

Annexe 19

René-Jean Guillard's LDC Algae project, Plouguenast, Côtes-d'Armor (Brittany), France.

La ferme micro-algues LDC Algae : comment ça marche ?

Operational in 2017
40 jobs in 2019



Waba-Cordoba-051018-JLR

31



Projet ERANETMED2 72-300 “WABA”

Traitement des eaux usées par une association microalgues-bactéries dans les zones rurales méditerranéennes

RAPPORT 2

Évaluation du potentiel des STations d’ÉPuration des eaux usées (STEP) avec microalgues par des experts internationaux

Nasser REBAI, nasser.rebai@ipemed.coop

22/01/2020

Résumé

Dans le cadre du projet WABA, l’Institut de Prospective Économique du Monde Méditerranéen (IPEMED) a cherché à évaluer dans quelle mesure le développement de STations d’ÉPuration des eaux usées (STEP) avec microalgues permettrait aux pays méditerranéens, qui doivent faire face aux changements globaux contemporains (réchauffement climatique, croissance urbaine), de mettre en place des systèmes innovants de gestion durable de leurs ressources hydriques. Pour cela, l’IPEMED a mené une enquête de type qualitatif auprès de 19 experts internationaux spécialistes du traitement des eaux usées. La grande variété des origines géographiques des experts a permis de diversifier les points de vue et de disposer d’éléments d’analyse plus complets sur le potentiel réel du développement de STEP avec microalgues dans des pays aux réalités environnementales et aux niveaux d’équipement très différents. D’un point de vue général, les avis des experts internationaux s’accordent sur le fait que l’usage des microalgues pour le traitement des eaux usées présente certains avantages, notamment sur le plan environnemental. Toutefois, leurs avis mettent également en évidence que le développement de STEP avec microalgues se heurte à différents problèmes. Il est séduisant, en effet, de penser à cette technologie « verte » pour favoriser la transition écologique du traitement des eaux usées et, au-delà, celle des sociétés contemporaines, notamment en Méditerranée. Cependant, les experts sont en attente d’une évaluation des performances techniques et socio-économiques par une expérimentation à plus grande échelle de la technologie de dépollution à base de microalgues.

Introduction

Bien que l'accès à l'eau potable et à l'assainissement soit un droit humain, reconnu en 2010 par l'Assemblée générale de l'ONU¹³, sa mise en pratique demeure parfois limitée dans les Pays du Sud et de l'Est de la Méditerranée (PSEM)¹⁴. Certes, plusieurs d'entre eux ont amélioré leurs infrastructures au cours des dernières années, cela permettant à une grande part de la population d'accéder aujourd'hui à l'eau potable (Al Baz, 2016). Toutefois, on estime que 45 millions de personnes en Afrique du Nord et au Moyen-Orient, soit 16 % de la population totale de la région, ne bénéficie pas encore d'un accès convenable à l'eau potable. À une échelle plus fine, on observe d'ailleurs des inégalités plus grandes, les zones rurales étant moins bien équipées pour la gestion des eaux usées et les populations qui y vivent ayant de plus grandes difficultés, logiquement, à accéder à une eau potable nécessaire aux activités domestiques et agricoles (*ibid.*). Il convient d'ajouter que la région méditerranéenne ne dispose que de 3 % des ressources en eau douce et de 1,2 % des ressources en eau naturelle renouvelable de la planète. Enfin, ses ressources hydriques sont en grande partie transfrontalières, 66 % des eaux de surface en Méditerranée provenant de sources externes à la région.

Marquée par un stress hydrique chronique, la région méditerranéenne concentre ainsi près de 60 % de la population mondiale faiblement pourvue en eau, c'est-à-dire disposant de moins de 1 000 m³ d'eau/habitant/an. Dans un contexte de réchauffement climatique et de croissance urbaine rapide, et alors que l'Objectif de Développement Durable (ODD) n° 6 des Nations Unies appelle à « garantir l'accès de tous à des services d'alimentation en eau et d'assainissement gérés de façon durable¹⁵ », une gestion optimale de l'eau constitue par conséquent un impératif qui doit conduire à la mise en œuvre d'un nouveau modèle technico-économique et de gouvernance des ressources hydriques dans les PSEM. La gestion des eaux usées constitue dès lors une piste à privilégier pour que les pays méditerranéens les plus vulnérables au stress hydrique relèvent les défis sociaux et environnementaux des années à venir.

1. Le traitement des eaux usées en Méditerranée : cadre, problématiques, perspectives

Au début de la décennie 2010, on estimait à 8 134 km³ le volume d'eaux usées produites dans l'ensemble des PSEM hors Israël (Abdel Dayem *et al.*, 2011). Selon la Banque Mondiale, l'accès des populations à un assainissement amélioré a connu une croissance notable lors des deux dernières décennies en Méditerranée, atteignant en 2015 près de 91 % pour les PSEM et 97 % pour les pays européens méditerranéens¹⁶, bien au-dessus de la moyenne mondiale (67 %). Ainsi, près de 63 % des localités littorales du bassin méditerranéen de plus de 2000 habitants étaient équipées en 2013 de STations d'Épuration des eaux usées (STEP)¹⁷, 67 % effectuant un traitement secondaire et 18 % uniquement un traitement primaire. En revanche, le raccordement

¹³ En 2010, les Nations Unies reconnaissent que « le droit à l'eau potable et à l'assainissement est un droit fondamental, essentiel à la pleine jouissance de la vie et à l'exercice de tous les droits de l'homme » (résolution de l'Assemblée générale de l'Organisation des Nations-unies en date du 28 juillet 2010).

¹⁴ Les PSEM regroupent le Maroc, l'Algérie, la Tunisie, la Libye, l'Égypte, Israël, la Jordanie, le Liban, la Syrie et la Turquie.

¹⁵ <https://www.agenda-2030.fr/odd/odd-6-garantir-lacces-de-tous-leau-et-l-assainissement-et-assurer-une-gestion-durable-des>

¹⁶ Ce chiffre inclut le Portugal, l'Espagne, la France, l'Italie, Malte, La Grèce et Chypre.

¹⁷ Information produite par l'ONG norvégienne Grid-Arendal (www.grida.no/respources/5908).

aux STEP demeure plus limité dans les régions intérieures. De plus, la totalité des eaux usées et des eaux de ruissellement produites en milieu urbain n'est pas nécessairement collectée, faute d'infrastructures, en raison d'un taux important de perte sur le réseau, ou encore de déversements illégaux d'effluents non traités.

D'un point de vue statistique, il est difficile d'accéder à des données exactes, actualisées et harmonisées sur le volume d'eaux usées produites, le taux de collecte des eaux usées ou encore le taux de traitement des eaux usées collectées dans les PSEM. Selon les estimations, le taux de traitement diffère selon les pays. Alors que des PSEM atteignent des niveaux comparables à certains pays de la rive nord de la Méditerranée¹⁸, comme Israël (93 %) ou la Jordanie (88 %), et que d'autres ont des niveaux de traitement satisfaisants, à l'instar de l'Égypte et la Tunisie (79 %), des pays accusent un réel retard, comme la Syrie (40 %), le Maroc (20 %), la Libye (7 %) ou le Liban (2 %) notamment (Al Baz, 2016).

Ces chiffres indiquent qu'au niveau des PSEM les structures qui permettraient de tirer profit d'une source d'eau encore peu conventionnelle sont encore relativement peu développées et, par conséquent, que la part des eaux usées réutilisées dans la région reste faible. Ce constat est tout à fait paradoxal. D'une part, parce que les PSEM sont à l'échelle mondiale ceux qui connaîtront les effets les plus durs du réchauffement climatique dans les prochaines années. D'autre part, parce que d'importantes innovations technologiques pour le traitement des eaux usées ont eu lieu ces dernières années¹⁹ et que, dans ce contexte, le traitement des eaux usées par microalgues s'est distingué comme étant l'un des procédés les plus prometteurs. En effet, même s'il n'était qu'en phase expérimentale il y a encore peu de temps (Rastoin, 2016), le nombre d'entreprises, de tailles variables, spécialisées dans la production de microalgues, a nettement augmenté ces dernières années, en France comme dans plusieurs autres pays (Persistence Market Research, 2018), et constitué un indice plus qu'intéressant sur le potentiel économique de cette technologie.

L'Institut de Prospective Économique du Monde Méditerranéen (IPEMED) s'est donc donné pour but de contribuer à combler ce manque en réalisant une évaluation exploratoire du potentiel de développement des STEP avec microalgues. L'hypothèse de l'IPEMED est que ce procédé pourrait faire l'objet d'un développement dans les PSEM où il est attendu qu'une transition technologique du traitement des eaux usées permette ces prochaines années de relever les défis du réchauffement climatique, de l'emploi rural et de la sécurité alimentaire. Il était donc nécessaire de rechercher et de mobiliser des informations, pour l'heure sporadiques, de manière à jeter les bases d'un travail de prospective économique rigoureux sur les potentialités économiques des STEP avec microalgues, notamment pour la région méditerranéenne.

2. Mobiliser les connaissances d'experts internationaux pour évaluer le potentiel des STEP en milieu rural

Pour ce faire, dans le cadre du projet WABA, l'IPEMED a mené un travail spécifique d'enquête auprès d'experts internationaux. L'absence de données scientifiques sur les potentialités économiques des STEP avec microalgues étant un frein pour engager la transition

¹⁸ Si certains pays euro-méditerranéens arrivent à traiter l'intégralité (ou presque) de leurs eaux usées en milieu urbain, comme Malte (99%), l'Espagne (95%) et la Grèce (93%), d'autres se positionnent à des niveaux satisfaisants, à l'instar de la France (80,5%), tandis que certains peinent à réaliser les objectifs définis par la Commission Européenne, comme l'Italie et le Portugal (60%) faisant moins bien que la Turquie (64%).

¹⁹ Cf. Etude de cas « STEP de Combaillaux » produite par l'IPEMED et incluse dans ce même rapport du WP5.

technologique du traitement des eaux usées dans les PSEM, l'IPMED a fait le choix de se tourner vers des spécialistes du traitement des eaux et de la production de microalgues pour obtenir de leur part un partage d'expérience, voire de données économiques empiriques. L'enquête réalisée devait répondre à 3 objectifs :

- Avoir une vue d'ensemble du traitement des eaux usées, notamment dans les zones rurales, et de la rentabilité des processus de bio-assainissement des eaux usées rurales utilisant des consortiums de bactéries et de microalgues ;
- Estimer les impacts économiques, sociaux et environnementaux (avantages et inconvénients) de l'installation de procédés de traitement des eaux usées utilisant des microalgues dans les zones rurales ;
- Identifier les avantages économiques, sociaux ou environnementaux et les facteurs de blocage de la transformation des effluents traités par les microalgues en engrais pour l'agriculture.

Ainsi, l'IPMED a sollicité en 2019 plus de 160 experts internationaux référencés dans des bases de données de production scientifique (Google Scholar, SCOPUS, SCIMAGO), afin qu'ils répondent à une courte enquête en ligne²⁰. De même, un travail de référencement rapide sur internet des entreprises spécialisées dans la production de microalgues, en France, en Allemagne, en Espagne, aux États-Unis et en Tunisie) a permis d'identifier personnalités (ingénieurs ou entrepreneurs) susceptibles de répondre aux questions de l'enquête WABA. Dès le début, le choix a été fait d'appeler à la participation de spécialistes originaires de nombreux pays aux réalités environnementales et aux niveaux de développement très différents afin de disposer d'éléments d'analyse plus complets sur le potentiel économique des STEP avec microalgues. Il a donc été jugé pertinent de solliciter des experts de pays où les niveaux d'équipement en STEP en milieu rural et de volume de traitement des eaux usées sont élevés, ainsi que des spécialistes de pays aux niveaux de développement comparables à ceux des PSEM. De cette manière, il allait être possible de confronter des avis construits à partir d'expériences professionnelles forgées dans des contextes très différents afin de disposer, pour le projet WABA, d'une meilleure vue des avantages et des désavantages techniques, économiques et environnementaux des STEP avec microalgues²¹.

Au final, 19 experts ont accepté de participer à l'enquête proposée par l'IPMED²² (cf. Graphique n° 1). Si, à première vue, ce chiffre peut sembler modeste, il est nécessaire de préciser que l'enquête réalisée n'avait pas pour finalité de construire une base de données statistiques sur les STEP avec microalgues dans le monde. Au contraire, le panel d'étude s'est avéré satisfaisant pour disposer d'éléments d'analyse qualitatifs au sujet du potentiel de développement des STEP avec microalgues, et ce, d'autant plus que des experts de 15 pays ont participé à l'enquête. Cette diversité d'origines géographiques a, comme indiqué plus haut, permis de confronter des points de vue sur des aspects techniques, économiques et environnementaux qui, au final, rendent l'analyse à suivre plus intéressante encore. En ce qui concerne l'origine géographique des experts, 5 d'entre eux étaient originaires de 4 PSEM (Algérie, Égypte, Maroc, Tunisie), tandis que 7 autres venaient de pays aux niveaux de

²⁰ Cf. Annexe 1 – Modèle de l'enquête WABA de 2019.

²¹ La méthodologie utilisée est de type « Delphi simplifié », c'est-à-dire une interrogation d'experts par questionnaire sur un sujet prédéfini (ici les technologies de traitement des eaux usées, avec un focus sur les microalgues), sans recherche d'un consensus, puis synthèse des résultats faisant apparaître des convergences et des divergences entre experts et servant à élaborer un diagnostic rapide. Les points de vue des experts sont le reflet de leurs recherches, mais n'ont pas valeur de démonstration scientifique.

²² Cf. Annexe 2 – Liste des experts ayant répondu à l'enquête WABA de 2019. Nous tenons à remercier bien vivement les 19 experts qui ont bien voulu apporter leur précieuse collaboration au projet WABA.

développement économique élevés (Allemagne, Espagne, États-Unis, France, Portugal) ou faisant partie de l'UE (Grèce, Roumanie). Enfin, 4 experts étaient originaires de pays aux niveaux de développement comparables aux PSEM (Équateur, Kazakhstan, Malaisie, Mexique), et portaient ainsi des avis qui allaient permettre une plus grande mise en perspective des problématiques liées au développement des STEP avec microalgues.

3. L'œil des experts : avantages et limites du développement des STEP avec microalgues en milieu rural

Pour la suite de ce rapport, l'analyse des résultats de l'enquête se structurera en deux parties. La première donnera une vue d'ensemble des technologies employées au niveau international pour le traitement des eaux usées. La seconde s'intéressera plus spécifiquement aux performances globales des STEP avec microalgues.

3.1. Vue d'ensemble du traitement des eaux usées et de l'importance du procédé de traitement par microalgues²³

Les résultats de la première partie de l'enquête permettent de disposer d'une vue d'ensemble des équipements et des procédés utilisés pour le traitement des eaux usées dans les différents pays des experts sollicités.

3.1.1. Des écarts d'équipement entre pays à la fois prévisibles et inattendus

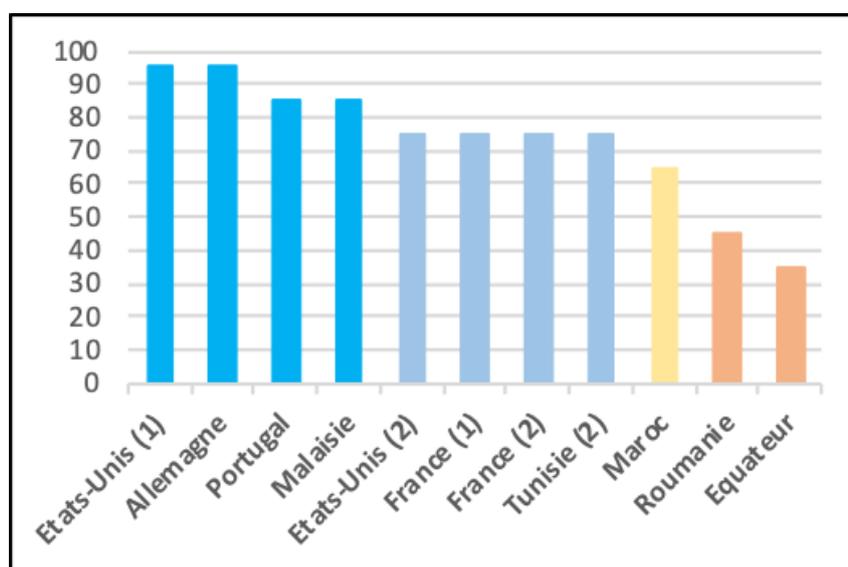
Un premier élément intéressant est de constater, au regard des chiffres transmis par les experts, l'existence de **3 groupes de pays aux niveaux d'équipement différents**. En effet, on retrouve un premier groupe de 3 pays (Allemagne, Malaisie et Portugal) où les experts estiment que plus de 80 % des villes sont équipées en STEP. Un deuxième groupe est composé de 3 pays (France, Maroc et Tunisie) qui, d'après les experts, comptent plus de 60 % de leurs villes équipées en STEP. Entre ces deux groupes, un fait marquant est à mettre en évidence : les deux experts étasuniens qui ont répondu à l'enquête ont des avis différents. Pour le premier, les États-Unis comptent plus de 90 % de villes équipées en STEP, tandis que pour le second, entre 70 et 80 % des villes étasuniennes en sont équipées. Enfin, un troisième groupe est composé de deux pays (Équateur et Roumanie) où les experts estiment que moins de 50 % des villes sont équipées en STEP (Cf. Graphique n° 2).

Ces premiers chiffres indiquent que d'après les experts, **les écarts de niveaux d'équipement entre pays ne correspondent pas nécessairement à une séparation grossière entre pays « développés » et pays « en développement »**. Le niveau d'équipement de la Malaisie, d'après l'expert malaisien consulté, est de ce point de vue assez remarquable. Autre exemple, la France et la Tunisie disposent d'après les experts des deux pays de taux d'équipement en STEP comparables. Fait notable également, la Roumanie, membre de l'Union européenne (UE), compte moins de 50 % de villes équipées en STEP, d'après l'expert roumain sollicité.

²³ Cf. Annexes 3,4 5 et 6 pour le détail des avis des experts sur le traitement des eaux usées et le procédé de traitement par micro-algues.

Graphique n° 1

Taux d'équipement en STEP des villes des pays des experts de l'enquête WABA



Source : réponses des experts à l'enquête WABA 2019.

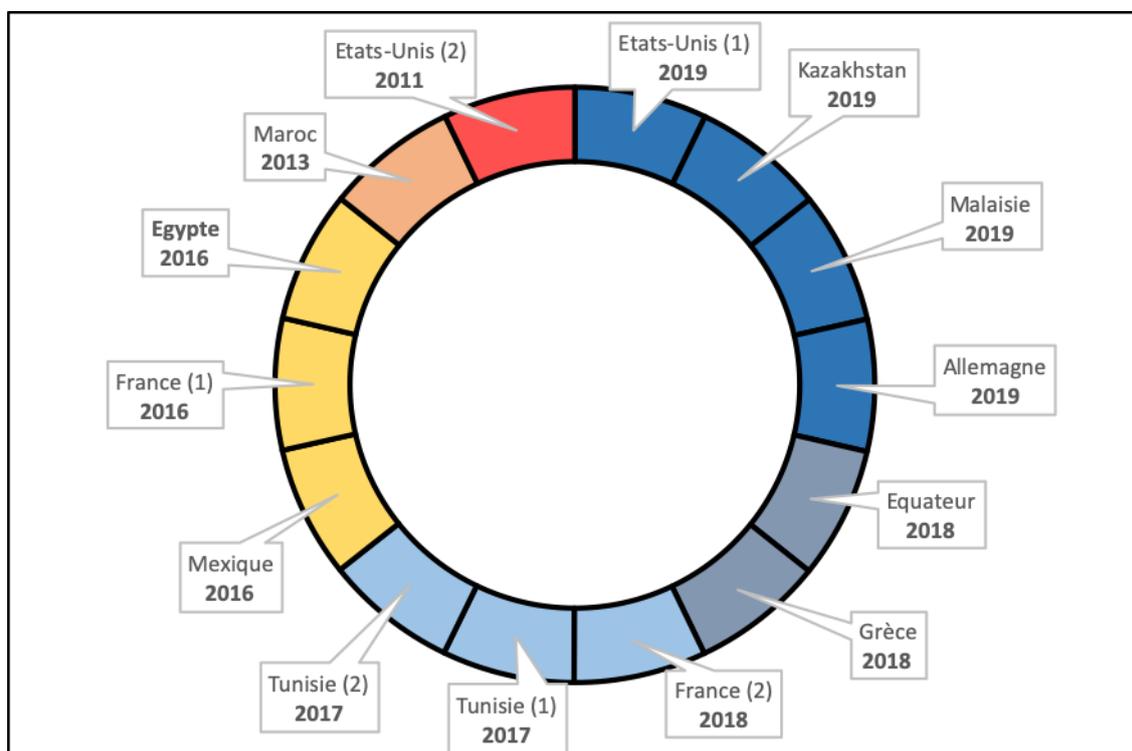
Par ailleurs, **14 (74 %) experts signalent que les données disponibles concernant les STEP ont été actualisées plus ou moins récemment**. Pour 7 (37 %) experts (Allemagne, Équateur, Grèce, Kazakhstan, Malaisie, Tunisie-1, Tunisie-2) les informations ont été mises à jour après 2017, il y a donc moins de 3 ans, tandis que pour 3 autres (Égypte, Maroc, Mexique), les données relatives aux STEP, plus anciennes, ont été actualisées entre 2013 et 2016 (cf. Graphique n° 3). De nouveau, entre ces deux groupes, un fait marquant est à mettre en évidence : les deux experts étasuniens, de même que deux des 3 experts français (France-1 et France-2) expriment des avis différents. Pour les experts étasuniens, les informations disponibles concernant les STEP aux États-Unis ont été actualisées en 2011 (États-Unis-2) ou en 2019 (États-Unis-1). En ce qui concerne les experts français, leurs avis sont moins tranchés : les informations disponibles concernant les STEP en France ont été actualisées en 2016 (France-1) ou en 2018 (France-2).

Ainsi, une nouvelle fois, **les écarts entre pays en matière de disponibilité d'informations récentes relatives aux STEP ne correspondent pas forcément à une séparation simplificatrice entre pays « développés » et pays « en développement »**. À titre d'exemple, L'Équateur ou la Tunisie disposent d'informations très récentes, d'après les experts équatoriens et tunisiens.

Ces premières informations, certes d'ordre général, renseignent néanmoins sur le caractère varié, et parfois inattendu, de l'équipement en STEP de plusieurs pays aux caractéristiques environnementales et aux niveaux de développement différents. S'il est intéressant de signaler, déjà, quelques contradictions entre experts d'un même pays, il est également important de remarquer, dès le début de cette enquête, que ces éléments de cadrage auraient pu être plus complets si tous les experts sollicités avaient transmis une réponse.

Graphique n° 2

Date de mise à jour des données disponibles relatives aux STEP dans les pays des experts sollicités pour l'enquête WABA



Source : réponses des experts à l'enquête WABA 2019.

En réalité, seuls **11 (58 %) des 19 experts consultés ont répondu à la première question de l'enquête, à la fois élémentaire et fondamentale, sur le niveau d'équipement des pays en STEP**. En revanche, l'absence de réponse de la part de 8 (42 %) experts (Algérie, Égypte, Espagne, France-3, Grèce, Kazakhstan, Mexique, Tunisie-1) interroge sur leurs connaissances réelles, ou sur leur capacité à accéder à des informations complètes et fiables sur leurs pays, où parfois les données peuvent être anciennes, défaillantes ou communiquées par les pouvoirs publics. Mais elle renvoie également à la **difficulté d'identifier et de mobiliser des spécialistes pour la réalisation d'enquêtes**. Cette difficulté est confirmée alors que 5 experts (Algérie, Espagne, France-3, Portugal, Roumanie) n'ont pas non plus répondu à la question sur la date d'actualisation des informations relatives aux STEP dans leurs pays.

3.1.2. Variabilité des niveaux de diversification des modes de traitement des eaux usées dans les zones rurales²⁴

En ce qui concerne l'inventaire général des procédés de traitement des eaux usées dans les STEP en zones rurales²⁵, les réponses des experts permettent de distinguer **2 groupes de pays aux**

²⁴ Cf. Annexe 5 – Niveaux de diversification technologique des STEP dans les pays des experts sollicités pour l'enquête WABA.

²⁵ Cf. Annexe 1 – Modèle de l'enquête WABA de 2019.

niveaux de diversification technologique distincts²⁶. Ainsi, 11 (58 %) experts (Algérie, Allemagne, Égypte, Espagne, États-Unis-1, États-Unis-2, Grèce, Kazakhstan, Portugal, Tunisie-1, Tunisie-2) indiquent qu'entre 0 et 3 procédés de traitement des eaux sont absents des zones rurales de leurs pays. Puis, 5 (26 %) experts signalent (Équateur, Malaisie, Maroc, Mexique, Roumanie) que plus de 3 procédés de traitement des eaux sont absents des zones rurales de leurs pays. Entre ces deux groupes, il apparaît nécessaire de signaler les avis divergents des experts français. Si deux d'entre eux (France-1 et France-3) affirment qu'entre 1 et 2 procédés de traitement des eaux sont absents, le troisième (France-2) exprime un avis différent et mentionne que 4 technologies sont absentes des STEP des zones rurales françaises.

Une nouvelle fois, il est intéressant de constater que **les écarts entre pays en matière de diversification technologique des modes de traitement des eaux usées ne correspondent pas obligatoirement à une distinction entre pays « développés » et pays « en développement »**. Ainsi, les experts d'Algérie, d'Égypte et de Tunisie indiquent une diversification importante des technologies présentes dans les STEP des zones rurales de leurs pays. À l'inverse, il est plus qu'intéressant de remarquer que la Roumanie se caractérise par une diversification assez faible des modes de traitement des eaux usées dans ses campagnes. Au regard des éléments présentés plus haut sur les niveaux d'équipement en STEP dans les différents pays étudiés, il est possible de dire que la Roumanie, membre de l'Union européenne, est d'un point de vue général un pays plutôt mal équipé pour le traitement des eaux usées, au même titre que l'Équateur, qui présente également un niveau d'équipement en STEP et une diversification des technologies dans les STEP en milieu rural plutôt bas. Il est également possible d'affirmer que le Maroc entre dans le groupe des pays plutôt mal équipés pour le traitement des eaux usées, même si, d'après l'expert sollicité, la part des villes marocaines dotées de STEP est légèrement supérieure à celles des villes roumaines et équatoriennes. À l'inverse, d'après les informations transmises par les experts, l'Allemagne et le Portugal apparaissent comme des pays plutôt très bien équipés, avec un nombre de villes dotées en STEP et une diversification des technologies dans les STEP des zones rurales plutôt très élevés. Enfin, il est intéressant de souligner le cas particulier de la Malaisie qui, d'après l'expert sollicité, dispose d'un niveau d'équipement en STEP plutôt très élevé en ville, mais qui, en revanche, au niveau rural, se caractérise par une diversification technologique plus faible que les autres pays marqués par de bons niveaux d'équipement.

3.1.3. Développement limité de la technologie par microalgues au niveau international²⁷

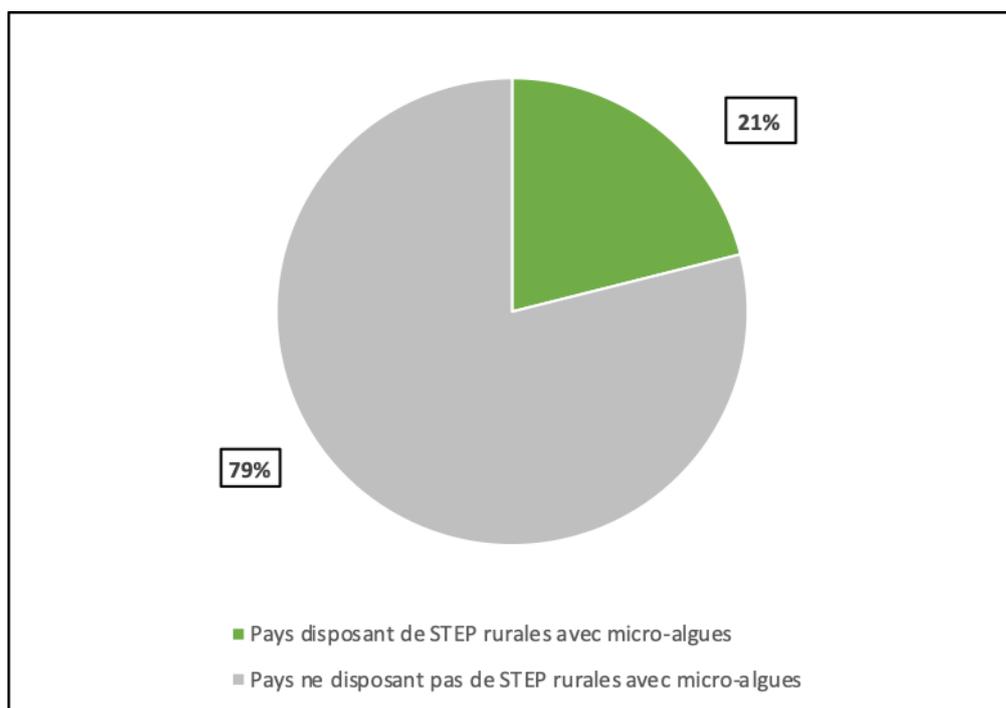
Au-delà des écarts de niveau d'équipement constatés, un fait majeur est à souligner. **Sur les 15 pays représentés** par les 19 experts ayant répondu à l'enquête WABA, **4 (21 %) d'entre eux seulement** (Allemagne, Égypte, États-Unis, Mexique) **disposent de STEP avec microalgues en milieu rural en 2019**²⁸. **Cette technologie apparaît donc faiblement développée au niveau international**, même dans des pays comme la France, le Portugal où la Tunisie, décrits par les experts comme convenablement équipés pour le traitement des eaux usées.

²⁶ Cf. Annexe 5 – Niveaux de diversification technologique des STEP dans les pays des experts sollicités pour l'enquête WABA.

²⁷ Cf. Annexe 5 – Niveaux de diversification technologique des STEP dans les pays des experts sollicités pour l'enquête WABA.

²⁸ Les deux experts étasuniens s'accordent à dire en effet que des STEP avec microalgues existent dans leur pays. Pour le reste des réponses, voir l'Annexe 5 – Niveaux de diversification technologique des STEP dans les pays des experts sollicités pour l'enquête WABA.

Graphique n° 3
Part des pays analysés dans l'enquête WABA disposant de STEP avec microalgues en 2019



Source : réponses des experts à l'enquête WABA 2019.

Logiquement, peu de réponses ont été données par les experts lorsqu'il leur a été demandé de formuler une brève évaluation de l'efficacité technique et économique des STEP avec microalgues **dans leurs pays**. L'un des experts étasuniens a d'ailleurs précisé qu'il ne « [savait] pas quoi répondre », quand l'autre n'a rien exprimé, sinon qu'il disposait de données, qu'il n'a cependant pas transmises. De son côté, l'expert allemand précise synthétiquement, mais efficacement que l'intérêt économique d'une STEP avec microalgues reste à démontrer. Pour sa part, l'expert mexicain n'a rien mentionné tandis que l'expert égyptien s'est contenté d'affirmer que l'efficacité des STEP avec microalgues dans son pays était « bonne », sans plus de précision. Chose curieuse, mais non moins intéressante, l'expert du Kazakhstan, et l'un des deux experts tunisiens (Tunisie-1), qui avaient précisé que leurs pays n'étaient pas équipés en STEP avec microalgues, ont tous deux exprimés des avis qu'il nous semble utile de mettre en évidence. Ainsi, l'expert kazakh précise dans sa réponse que « les technologies d'utilisation des microalgues pour les systèmes de traitement des eaux usées dans les zones rurales étaient actuellement [en 2019] à l'étude dans son pays et que les universités travaillaient sur ce sujet », mais qu'en revanche, les « agriculteurs n'étaient pas concernés »²⁹. Cette réponse permet de rapprocher le Kazakhstan des pays disposant de STEP avec microalgues en milieu rural en 2019. L'expert Tunisie-1 exprime pour sa part qu'il « pourrait être intéressant [de promouvoir les STEP avec microalgues] compte tenu du grand nombre d'entreprises qui développent cette technologie en Tunisie ». Cette précision est à mettre en lumière dans la mesure où elle fait écho aux éléments mis en exergue dans la première partie de ce rapport, sur les besoins des

²⁹ « Technologies for the use of microalgae for sewage treatment systems in rural areas are under discussion. Universities are working on this topic. But farmers are not ».

PSEM, le caractère innovant des microalgues et le paradoxe de cette technologie qui fait encore l'objet de connaissances réduites, notamment sur le plan de son potentiel économique.

En comparaison, d'après les réponses des experts, certains procédés sont très bien développés au niveau international en 2019, comme le traitement des eaux usées par lagunage, présents dans les pays de tous (100 %), ou le traitement par zones humides, également présent dans 13 (89,5 %) des pays étudiés dans l'enquête WABA de 2019³⁰. De même, les réponses des experts au sujet des autres technologies de traitement des eaux usées (avec filtre anti-ruissellement, avec filtre à sable biologique ou avec bioréacteurs à membrane) indiquent que celles-ci sont moyennement ou relativement bien développées au niveau international, et plus répandues, logiquement, que celle des microalgues³¹.

Tableau n° 1
Présence des différents types de procédé de traitement des eaux usées dans les STEP
des pays analysés dans l'enquête WABA

Procédé	Part des pays disposant du procédé (%)
Boues activées	68
Filtre anti-ruissellement	63
Filtre à sable biologique	74
Zones humides construites	90
Bioréacteurs à membrane	68
Lagunes	100
Microalgues	21

Source : réponses des experts à l'enquête WABA 2019.

Enfin il est nécessaire de **préciser que le développement du procédé de traitement des eaux usées par microalgues est d'autant plus limité qu'il n'existe à l'heure actuelle que sous forme de prototype en Allemagne et en Égypte**, d'après les précisions des experts. De son côté, l'un des deux experts étasuniens (États-Unis-2 ?) précise que l'entreprise dans laquelle il est employé a développé 20 STEP avec microalgues aux États-Unis, et 2 de plus au Mexique.

3.2. Impacts économiques, sociaux et environnementaux du développement de STEP avec microalgues³²

À ce stade, il est donc intéressant de savoir pourquoi le procédé de traitement des eaux usées par microalgues n'est pas plus développé au niveau international. La deuxième partie de ce rapport propose ainsi de réunir et d'analyser les avis des experts sur les avantages et les limites des STEP avec microalgues, ainsi que sur l'usage de biofertilisants à base microalgues.

³⁰ Une présentation des différentes technologies de traitement des eaux usées est faite dans le rapport 1 (Encadré n°1) du WP 5 - WABA.

³¹ Cf. Annexe 5 – Niveaux de diversification technologique des STEP dans les pays des experts sollicités pour l'enquête WABA.

³² Cf. Annexes 7 – Détail des réponses des experts sur les Impacts économiques, sociaux et environnementaux du développement de STEP avec microalgues et Cf. Annexe 8 – Avantages et inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues.

3.2.1 Quel potentiel de développement des STEP avec microalgues³³ ?

Plus haut dans ce rapport, il est apparu que les STEP avec microalgues étaient faiblement développées au niveau international en 2019. Logiquement, les réponses des experts pour évaluer l'efficacité économique des STEP avec microalgues dans leurs pays ont été très limitées, en nombre comme en précision. Cependant, l'enquête WABA a également sollicité les experts sur les **connaissances** dont ils disposaient à propos des avantages et des désavantages des STEP avec microalgues. Ainsi, **16 (84 %) des 19 experts consultés ont fourni des avis**, certes parfois concis, mais ce chiffre indique toutefois que les experts sollicités ont eu accès, au moins *a minima*, à l'information existante sur le traitement des eaux usées par microalgues. D'ailleurs, si l'on excepte le cas de l'expert France-2 qui n'a pas exprimé d'avis sur les avantages et désavantages des STEP avec microalgues, alors que les deux autres experts français l'ont fait, en réalité, seuls les experts d'Égypte, qui a pourtant répondu que son pays possédait des STEP avec microalgues, et de Malaisie, ne se sont pas exprimés. Ainsi, les experts de 13 pays (87 %) ont eu accès à des connaissances sur les avantages et les désavantages des STEP avec microalgues, ce qui indique que **la majorité des pays, au-delà de leurs niveaux de développement ou d'équipement en STEP, accèdent relativement facilement aux informations** concernant les procédés de traitement des eaux usées. Il est cependant nécessaire de préciser que, curieusement, l'expert allemand, qui a également répondu que son pays possédait des STEP avec microalgues, a transmis un avis très superficiel sur les avantages et désavantages cette technologie.

Le bon accès généralisé aux connaissances sur le traitement des eaux usées avec microalgues est confirmé par le fait que **les réponses apportées par les experts, même courtes, sont relativement diverses** et abordent aussi bien les aspects économiques, sociaux, environnementaux et mêmes techniques des avantages et des désavantages des STEP avec microalgues. Les réponses apportées par certains experts sont même transversales et font le lien entre économie et environnement. Les propos exprimés par l'un des experts tunisiens (Tunisie-2) sont à ce titre particulièrement éloquentes. D'après lui, les STEP avec microalgues pourraient « répondre aux besoins des petites exploitations familiales en matière organique ». Il y aurait ainsi une « complémentarité entre la production d'algues et la production agricole. Les microalgues peuvent être à la base des processus d'écologie territoriale³⁴ ». L'analyse plus détaillée des réponses des experts apporte des éclairages complémentaires.

- On note que 7 experts (37 %) ont analysé les avantages et les désavantages des STEP avec microalgues sous l'angle **économique**. Ce premier microéchantillon est assez intéressant dans la mesure où il regroupe des pays aux niveaux d'équipement variés (États-Unis, Équateur, Grèce, France, Tunisie, Kazakhstan et Maroc). **Les avis convergent globalement sur le fait que les STEP avec microalgues seraient d'un coût moindre que celles dotées de procédés conventionnels**, notamment pour l'entretien de la structure, d'après l'expert marocain. Les experts équatorien et grec précisent d'ailleurs que les STEP avec microalgues pourraient permettre de tirer profit de sous-produits, et notamment de biomasse (voir ci-après). **Toutefois, il est important de remarquer que ces avis sur le coût moindre des STEP avec microalgues ne sont étayés par aucun chiffre**. Ainsi, **les avis des experts sollicités ne compensent pas le manque d'information globale sur le potentiel économique du procédé de**

³³ Annexes 7 – Détail des réponses des experts sur les Impacts économiques, sociaux et environnementaux du développement de STEP avec microalgues.

³⁴ « Meet the need for organic matter for small family farming. Complementarity between algae production and agricultural production. Microalgae can be the basis of territorial ecology processes ».

traitement des eaux usées par microalgues, identifié en première partie de ce rapport. L'avis de l'un des experts tunisiens (Tunisie-2) est par ailleurs plus nuancé. S'il affirme que le traitement des eaux par microalgues peut générer des revenus (il ne précise cependant pas comment, mais on peut faire l'hypothèse qu'il pense ici à la biomasse), à la différence des méthodes de traitement conventionnelles, il déclare cependant que le coût d'installation d'une STEP avec microalgues est toutefois élevé. Cette information marquante l'est pourtant beaucoup moins que l'avis de l'expert kazakh, assez radical, qui indique que l'usage de bactéries et de microalgues pour le traitement des eaux usées ne présente aucun intérêt pour l'économie du Kazakhstan, sans toutefois préciser pourquoi.

- L'analyse des avantages et des désavantages des STEP avec microalgues au niveau **social** est beaucoup plus **superficielle**. Seul 1 expert (5 %) ; celui de la Roumanie, s'est en effet exprimé, et seulement pour évoquer un désavantage du procédé de traitement des eaux usées par microalgues. L'expert explique ainsi que les microalgues peuvent rejeter dans les plans d'eau récepteurs des toxines potentiellement nocives pour les animaux et les êtres humains (voir plus loin). Ici, il peut être fait l'hypothèse que la pauvreté des commentaires apportés par les experts vient du fait que **les sciences sociales, au même titre que l'économie, ne se sont pas approprié le thème du traitement des eaux usées par microalgues** et qu'il demeure surtout abordé, comme dit dans l'introduction, par les sciences du vivant et de l'ingénierie.
- Ainsi, on constate que 12 experts (63 %) ont analysé les avantages et les désavantages des STEP avec microalgues sur le plan **environnemental**. Ce troisième microéchantillon de spécialistes (États-Unis-1, États-Unis-2, Équateur, Grèce, Mexique, France-1, Tunisie-1, Portugal, Roumanie, Espagne, France-3, Maroc), assez large, est au même titre que celui ayant répondu sur les aspects économiques des avantages et les désavantages des STEP avec microalgues, plutôt intéressant dans la mesure où il regroupe des pays aux niveaux d'équipement variés. On remarque par ailleurs que **les réponses des experts sont plutôt diverses et détaillées**, ce qui va dans le sens, une nouvelle fois, d'une meilleure appropriation par les experts internationaux des savoirs scientifiques disponibles sur les performances environnementales des STEP avec microalgues. Il est alors question de faible consommation d'énergie, d'une empreinte carbone limitée, d'une production réduite de gaz à effets de serre, de l'élimination de nutriments contaminants et de la génération de sous-produits utiles (cet élément revient d'ailleurs fréquemment à la fin de l'enquête). L'un des experts étasuniens (États-Unis-2) précise même que ces structures ont l'avantage de générer moins d'odeur. Dans cet ensemble de réponses variées, quelques nuances sont toutefois apportées. Ainsi, l'expert roumain met en garde contre l'idée que les STEP avec microalgues capteraient de grandes quantités de CO₂. Il souligne que les microalgues produisent elles-mêmes du CO₂ et qu'il est donc nécessaire que soit mis en place, dans les STEP, un consortium de microalgues et de bactéries, efficace pour atteindre des niveaux de performance environnementale élevés. D'autres experts enfin mettent en évidence quelques désavantages environnementaux des STEP avec microalgues du point de vue environnemental. L'expert portugais pointe par exemple le fait que la production importante de biomasse relève davantage d'un problème plutôt que d'une opportunité (notamment économique). En cela, il s'oppose donc aux avis de plusieurs autres experts (voir ci-après). D'autres avis, moins nombreux toutefois, mettent en évidence les désavantages des STEP avec microalgues. L'expert grec précise par exemple que les STEP avec microalgues génèrent de la production de Protoxyde

d'Azote (N₂O), un puissant gaz à effet de serre (GES), tandis que l'expert mexicain indique que paradoxalement, les STEP avec microalgues ont une empreinte de GES sur l'eau élevée. Enfin, il est encore une fois important de constater un avis particulièrement marqué, celui de l'un des experts étasuniens (États-Unis-1), qui, explicitement, signale que « le traitement des microalgues n'est pas fiable (et que) les rejets de mauvaise qualité sont donc courants ».

Encadré n° 1 — Performance des STEP avec microalgues : des avis partagés

Au final, il apparaît que les avis des experts sur les performances globales des STEP avec microalgues sont partagés. Si certains points de convergence notables sont à constater, comme le plus faible coût de traitement des eaux usées par microalgues par rapport aux procédés de traitement conventionnels, leurs avis apparaissent plus dispersés, voire contradictoires, lorsqu'il leur revient d'estimer les performances environnementales des STEPS avec microalgues. Il est d'ailleurs tout à fait remarquable que les experts de deux pays aux réalités économiques distinctes (États-Unis-1 et Kazakhstan) expriment de très sérieuses réserves sur l'intérêt de ces installations. Ainsi, **d'après les experts internationaux sollicités pour l'enquête WABA, le procédé de traitement des eaux usées par microalgues ne présente pas d'avantages ou de désavantage qui le distinguerait nettement des autres technologies** à propos desquelles les experts expriment d'ailleurs des avis également très partagés³⁵. En bref, les microalgues, comme les autres technologies, ont leurs partisans et leurs détracteurs.

On remarque cependant que **peu important les niveaux d'équipement en STEP des pays, les experts disposent dans leur grande majorité de connaissances minima sur ce procédé**. Certains experts originaires de pays où les STEP avec microalgues ne sont pas encore présentes (Équateur, Mexique, Grèce, Tunisie et Roumanie notamment) sont d'ailleurs ceux dont les réponses sont les plus précises ou développées. Les propos de l'un des experts tunisiens (Tunisie-1) indiquent d'ailleurs le souhait de voir les STEP avec microalgues se développer dans son pays : « cette technologie [de traitement des eaux usées par microalgues] n'existe pas dans le secteur public [tunisien, mais s'agit] d'une technologie très intéressante ». À l'inverse, on remarquera que l'expert allemand, qui a confirmé la présence de STEP dans son pays, ne donne qu'un avis très superficiel sur les performances générales des STEP avec microalgues, en indiquant qu'elles sont « intéressantes pour des zones de tourisme estival³⁶ », sans plus développer.

3.2.2. Les microalgues et la production de matière fertilisante et de coproduits : avantages et limites

³⁵ Annexes 6 – Avis des différents experts ayant répondu à l'enquête WABA sur l'efficacité des différents procédés de traitement des eaux usées existants.

³⁶ « Interesting for areas with tourism during summer ».

À la suite de ces premiers avis, les experts internationaux sollicités pour l'enquête WABA se sont exprimés sur les avantages et les inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues. Il est d'abord intéressant d'observer que **13 (68,4 %) des 19 experts sollicités ont fourni un avis**, parfois très court il est vrai, mais ce chiffre indique néanmoins que ces mêmes experts ont eu accès, de façon minimum, à des connaissances sur le lien entre STEP avec microalgues et production de fertilisants et de coproduits. À l'inverse, il est intéressant de remarquer que les experts des États-Unis et d'Égypte, qui ont pourtant indiqué que leurs pays étaient équipés en STEP avec microalgues, n'ont pas exprimé d'avis sur la question de la production de fertilisants et de coproduits. Malgré cela, il est donc une nouvelle fois intéressant de constater que le bon accès aux connaissances sur le procédé de traitement des eaux usées par microalgues est confirmé par le fait que **les réponses apportées par les experts à propos du lien entre STEP avec microalgues et production de fertilisants et de coproduits**, mêmes concises, **sont diverses** et abordent aussi bien des aspects économiques, sociaux, environnementaux et mêmes techniques.

- Ainsi, il peut être indiqué que 8 experts (42 %) ont analysé les avantages et les inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues sous l'**angle économique**. Ce premier microéchantillon est assez intéressant car il regroupe des pays aux niveaux d'équipement variés (Équateur, Grèce, Mexique, Tunisie-1, Roumanie, Malaisie, Maroc, Tunisie-2 —), mais, surtout, des pays marqués, soit par une agriculture familiale importante, soit par des niveaux de stress hydrique élevés, soit par les deux caractéristiques. Les avis des experts convergent ainsi sur le fait que **les microalgues représentent une opportunité économique** dans la mesure où elles peuvent contribuer à la production importante et à moindre coût de biofertilisants. Elles peuvent donc être d'une **grande utilité pour les communautés d'agriculteurs aux capacités économiques limitées et pourtant grandes consommatrices d'intrants (chimiques) dans des contextes environnementaux contraignants**. Ces éléments sont à mettre en lien avec le fait que les microalgues peuvent jouer un grand rôle sur le plan environnemental, notamment pour l'entretien des sols (voir ci-après). Cependant, il est important de faire remarquer que les deux experts tunisiens s'interrogent sur les coûts de production réels de biofertilisants tandis que les coûts de fonctionnement de STEP avec microalgues demeurent méconnus³⁷. Cet avis est d'autant plus cohérent que l'un des deux experts (Tunisie-2) précise dans sa réponse précédente que le coût d'installation d'une STEP avec microalgues est toutefois élevé (voir plus haut).
- En ce qui concerne l'aspect **social** des avantages et des inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues, les **avis des experts sont limités en nombre, mais plutôt détaillés et originaux**. On peut noter que 5 experts (26 %) seulement expriment un avis, le plus souvent de manière assez superficielle. Il est néanmoins utile de préciser que ce microéchantillon réunit les experts de pays marqués, soit par une agriculture familiale importante, soit par des niveaux de stress hydrique élevés, soit par les deux caractéristiques (Équateur, Grèce, Mexique, Roumanie, Tunisie). Ces experts se sont également exprimés sur les avantages et inconvénients économiques liés à la production de biofertilisants et de coproduits (voir plus haut). Cet élément confirme que ces **experts semblent particulièrement**

³⁷ On ne dispose pas aujourd'hui d'estimation des coûts dans les STEP utilisant des microalgues. Sur les autres procédés d'épuration, voir le rapport 1 (Annexes 13, 14, 15) du WP 5 - WABA.

concernés par l'usage de biofertilisants et par la possibilité d'en produire au sein des STEP avec microalgues. L'hypothèse qui peut être faite ici est que ces installations peuvent être envisagées par des experts des pays en développement comme des leviers de projets de territoires orientés vers la bio-économie circulaire. Les experts grec et mexicain expriment ainsi que la production de biofertilisants avec le procédé de microalgues pourrait être source d'emplois, tandis que l'un des deux experts tunisiens (Tunisie-2), développe une idée assez singulière en évoquant le fait que la production de biofertilisants et de coproduits peut être un facteur « [d'organisation] des communautés [rurales] pour la gestion de la ressource si les stations de traitement sont collectives ». L'expert équatorien apporte toutefois un avis contradictoire, mais également très intéressant, en précisant que bien souvent seuls les dirigeants des communautés ont accès à la biomasse de microalgues transformées et qu'il convient par conséquent de placer les femmes leaders dans le processus. Il ajoute également dans un commentaire complémentaire que la formation des communautés notamment pour la gestion des biofertilisants produits à partir des microalgues (voir ci-après) est un aspect essentiel en parallèle de l'implantation éventuelle du procédé de traitement des eaux usées par microalgues en milieu rural. Comme le suggère également l'expert mexicain, les producteurs de fertilisants pourraient même se mobiliser pour bloquer la production ou l'usage de biofertilisants à base microalgues. La gouvernance des STEP avec microalgues et des biofertilisants qu'elles peuvent produire est donc interrogée par ces experts, chose inédite au regard de la bibliographie existante sur le sujet. De son côté, l'expert roumain apporte un autre élément utile à la réflexion. Il met en garde contre l'idée que la production de biofertilisants dans les STEP avec microalgues trouverait automatiquement une utilité car, selon lui, peu de gens sont en réalité [encore] susceptibles d'accepter des déchets.

- Enfin, l'**environnement** occupe une nouvelle fois une part importante des réponses des experts à propos des avantages et des inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues. En effet, 10 experts (53 %) se sont exprimés sur ce point spécifique. Ce microéchantillon est une nouvelle fois diversifié avec des experts de pays aux niveaux d'équipement en STEP très différents (Équateur, Grèce, Mexique, France-1, Tunisie-1, Espagne, Algérie, Allemagne). Il est donc possible, là encore, de penser que les experts accèdent relativement facilement à des savoirs scientifiques sur les performances environnementales des microalgues. Les réponses qu'ils apportent sur les avantages et les inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues sont d'ailleurs **assez développées**, comme celle de l'expert équatorien qui explique que les microalgues peuvent constituer un « excellent biofertilisant pour des cultures à cycles courts [au sein des communautés] rurales » et qu'elles peuvent ainsi permettre d'« éviter l'utilisation d'engrais chimiques polluants ». Ce sont au total 8 experts (42 %) qui signalent des avantages en lien avec les microalgues. Elles contribuent d'un point de vue général à préserver les ressources naturelles, mais plus précisément, elles constituent une base de biofertilisants utiles à la fertilité des sols, car elles sont source d'azote et de phosphore. Elles peuvent donc contribuer à la réduction de l'usage des intrants chimiques, ce qui a également un intérêt économique (voir plus haut). L'expert espagnol précise d'ailleurs que l'engrais à base de microalgues, comparable aux résidus ou au fumier ordinairement utilisés en agriculture, peut être déshydraté et transportable. On comprend ainsi que **les microalgues peuvent constituer une innovation écologique et économique pour des régions rurales où pourraient émerger des projets d'écologie territoriale**. D'autres avis, moins nombreux, mais assez détaillés, signalent cependant les désavantages

inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues. Ainsi, 3 experts (Algérie, France-1, Mexique) indiquent que les microalgues, du fait de leur capacité à retenir des polluants, pourraient contribuer à polluer les sols agricoles si elles étaient utilisées comme fertilisant L'expert grec ajoute également qu'elles peuvent être porteuses d'agents pathogènes.

Encadré n° 2 – Des microalgues perçues comme économiquement et écologiquement utiles, en dépit de quelques réserves d'experts

Les avis des experts à propos des avantages et des inconvénients liés à la production biofertilisants à base de microalgues apparaissent ainsi moins contrastés que ceux concernant les performances globales des STEP avec microalgues. En effet, il apparaît qu'en dépit quelques interrogations encore subsistantes, une bonne part des experts s'accordent à dire que les **biofertilisants à base de microalgues représentent une bonne opportunité économique pour les communautés rurales, en particulier dans les pays où la petite agriculture familiale est encore importante**. Ils considèrent également que la production de biofertilisants pourrait contribuer au développement de l'emploi, mais également à la **mise en marche des projets d'écologie territoriale**, mais font remarquer cependant que la production de biofertilisants à base de microalgues appelle à renforcer les organisations d'agriculteurs, afin d'encourager les bonnes pratiques d'usage et de gouvernance de cette ressource nouvelle. Car, en effet, sur le plan environnemental, si bon nombre d'experts considèrent les biofertilisants à base de microalgues comme bons pour l'environnement, d'autres rappellent cependant que **les microalgues pourraient être source d'une nouvelle forme de pollution des sols**³⁸ si elles venaient à être à utilisées comme fertilisant.

Conclusion. Un développement encore limité, des avis partagés à leur sujet : les STEP avec microalgues

Le présent rapport a mis en évidence plusieurs éléments intéressants concernant l'état des connaissances sur les niveaux de développement des STEP avec microalgues à l'échelle internationale. Avant tout, il est important de signaler que sur un plan méthodologique, il a été difficile de mobiliser les experts internationaux spécialistes des STEP et/ou des microalgues. Peu de ceux qui ont été sollicités ont finalement répondu, même si le panel d'étude de l'enquête WABA, plutôt raisonnable, a permis de disposer d'informations satisfaisantes. Cet élément révèle un paradoxe. Alors que les enjeux de développement durable et de gestion de l'eau occupent chaque jour une place plus importante dans les débats académiques et politiques, mais également dans le secteur de l'entrepreneuriat, et que les microalgues semblent connaître un développement croissant et représenter une opportunité pour la transition écologique à l'heure des changements globaux, les experts internationaux ont montré un intérêt modéré à communiquer sur ce sujet. Ce fait est d'autant plus marquant que les informations attendues

³⁸ Cet avis demanderait à être scientifiquement validé. En effet, Les algues métabolisent certains composants polluants, ce qui veut dire qu'il ne reste plus de trace d'activité polluante au sein de l'algue, car celle-ci l'a réutilisé pour d'autres fonctions. Quand l'algue n'est pas capable de métaboliser certains polluants, alors elle ne l'absorbe ni ne l'accumule.

avaient pour vocation, comme annoncé par l'IPEMED au moment de solliciter ces experts, de créer et de disposer d'un savoir à la fois robuste, synthétique et accessible pour le plus grand nombre, afin d'encourager ou non le développement de STEP avec microalgues, notamment en Méditerranée.

Des niveaux de connaissance et d'équipement inégaux entre pays, des avis d'experts contrastés sur les STEP avec microalgues

Ce premier constat fait, il est important de revenir sur les principales informations mises en évidence par l'enquête WABA. En premier lieu, si les retours des experts ont indiqué que des niveaux d'équipement en STEP étaient à constater au niveau international, ces écarts ne correspondent pas nécessairement à des écarts de développement économique entre les pays. De même, il est ressorti qu'une part importante des experts consultés semblait disposée de connaissances relativement développées et précises sur les procédés de traitement des eaux usées et sur les STEP avec microalgues en particulier. Toutefois, il est également apparu que si les STEP avec microalgues restent globalement assez peu développées à l'échelle internationale, ce sont néanmoins les experts des pays les moins bien équipés en STEP ou non-équipés en STEP avec microalgues (Équateur, Grèce, Tunisie et Roumanie notamment) qui exprimaient les avis les plus développés, et parfois les plus critiques. D'un point de vue plus général, il est surtout ressorti que le procédé de traitement des eaux usées par microalgues ne présente pas d'avantage ou d'inconvénient qui le distinguerait nettement des autres technologies à propos desquelles les experts expriment d'ailleurs des avis également très partagés. Un bon nombre d'experts s'accordent cependant à dire que les biofertilisants à base de microalgues représentent une bonne opportunité économique pour les communautés rurales, en particulier dans les pays où la petite agriculture familiale est encore importante. Quelques autres se montrent toutefois plus critiques sur cet élément précis et rappellent que les microalgues pourraient être source d'une nouvelle forme de pollution des sols en cas d'usage comme fertilisant en agriculture.

Encadré n° 3 — Focus sur les PSEM

En ce qui concerne les PSEM, les niveaux d'équipement en STEP, de même que les connaissances et les avis de leurs experts, apparaissent également très variés. D'un point de vue général, les avis des experts algérien et égyptien sont plus parcimonieux, moins précis et moins développés que ceux des experts marocains et tunisiens. D'ailleurs, il peut être souligné que seuls les experts marocain et tunisien ont indiqué le niveau d'équipement de leurs pays en STEP.

On note également un paradoxe : si l'expert égyptien n'indique pas le niveau d'équipement en STEP de son pays, il existe cependant au moins une STEP avec microalgues dans son pays. Pourtant, il ne propose aucun élément d'évaluation des performances globales des STEP avec microalgues. À l'inverse, l'absence de STEP avec microalgues en Algérie, au Maroc et en Tunisie n'empêche pas les experts de ces deux pays de communiquer des avis plutôt très intéressants.

Les experts des PSEM présentent donc une situation paradoxale. Au même titre que les autres experts internationaux, ils semblent disposer de connaissances importantes et variées sur le procédé de traitement des eaux

par microalgues. Toutefois, les informations qu'ils communiquent sur leurs pays sont assez lacunaires, peut-être en raison de contextes politiques nationaux qui n'autorisent pas facilement la mise à disposition d'informations sur des équipements publics (en Égypte et en Algérie notamment). Malgré cela, la carence des équipements pour le traitement des eaux au niveau régional, ainsi que l'intérêt démontré pour et le développement des STEP avec microalgues (par les experts tunisiens, marocain et algérien par exemple) autorisent à penser que des actions prospectives pour l'innovation technologique pour le traitement des eaux usées dans les PSEM peuvent être envisagées.

Ainsi, les avis sont partagés sur le fait que les STEP avec microalgues puissent constituer des leviers pour l'émergence de projets d'écologie territoriale, d'autant que les informations concernant leurs coûts et leurs performances économiques demeurent défailtantes. Cet élément semble d'ailleurs tout à fait paradoxal alors que, comme le rappelle l'un des experts français (France-3), « depuis plusieurs années, on observe une augmentation des projets traitant [des] sujets d'algues cultivées dans les eaux usées³⁹ ». Cela interroge donc sur le futur du procédé de traitement des eaux usées par microalgues.

Quelles perspectives de développement pour le traitement des usées avec microalgues ?

Alors que divers experts ont mis en évidence les limites des performances globales des STEP, il apparaît judicieux de reprendre certaines des recommandations qu'ils formulent par ailleurs pour l'amélioration des performances globales des STEP avec microalgues à moyen terme. Avant toute chose, il conviendrait que des études économiques soient enfin réalisées sur les STEP avec microalgues et que des travaux de prospective soient également conduits pour évaluer dans quelle mesure l'implantation de ces installations, dans quel format (petites STEP ? grandes STEP ?) pourrait se réaliser dans des contextes économiques, politiques et environnementaux variés. Les avis, tantôt positifs, tantôt radicalement critiques, des experts, sur l'efficacité des STEP avec microalgues, amènent à faire l'hypothèse que, peut-être, les STEP avec microalgues ne pourront répondre qu'à des besoins ciblés, dans des contextes géographiques particuliers. Le fait qu'il a été souligné que, possiblement, des populations seraient peu disposées à consommer ou à utiliser des eaux traitées avec des microalgues, interroge en effet sur l'intérêt économique réel des biofertilisants et, plus largement, sur la réelle possibilité de faire des STEP avec microalgues des leviers de lutte contre le stress hydrique, notamment dans les zones rurales. De plus, des projets réutilisant les eaux traitées avec des STEP à microalgues peuvent être développés pour l'agriculture (irrigation) ou à d'autres fins que l'eau potable, aussi utiles pour les populations locales.

C'est donc pourquoi un renouvellement et un renforcement des informations à leur sujet sont nécessaires, comme il apparaît nécessaire d'envisager les impératifs techniques qui devront permettre de limiter la production excessive de biomasse inutile ou inutilisable. Ces recommandations vont de pair avec celles exprimées par certains experts sur la nécessité de mieux connaître les propriétés des microalgues, notamment pour mieux mesurer leur potentiel polluant.

³⁹ « For several years we observe an increase of projects dealing with these topics of wastewater grown algae ».

Vers un « WABA 2 » ?

C'est au regard de ces éléments que l'IPEMED projette ainsi de porter le projet de recherche « WABA 2 », spécifiquement orienté sur l'évaluation du potentiel socio-économique des STEP dans les zones rurales de Méditerranée. D'un point de vue méthodologique, ce projet devra reposer sur un travail d'enquête à mener dans plusieurs pays aux caractéristiques sociales et économiques variées et inégalement dotés en STEP. L'objectif sera d'aller à la rencontre des institutions publiques chargées de la gestion des eaux et de rencontrer dans le même temps les entrepreneurs privés impliqués dans la production de microalgues. Le recueil d'informations économiques et d'avis d'experts sur le potentiel et les limites du traitement des eaux usées par microalgues pourrait donner lieu à la production d'un diagnostic précis des besoins et des moyens à mettre en œuvre pour le développement de cette technologie, afin de répondre aux enjeux sociaux environnementaux dans les pays méditerranéens. Un focus particulier pourra également être accordé aux avantages et inconvénients liés à la production de biomasse afin de renforcer l'évaluation globale qui sera produite sur les performances globales des STEP avec microalgues. Il s'agira alors de voir dans quelle mesure la production de biofertilisant pourrait effectivement bénéficier à l'agriculture, notamment dans les zones de petite agriculture familiale. En bref, le projet « WABA 2 » pourra s'inscrire dans le champ de l'écologie territoriale et contribuer, par ailleurs, à démontrer le grand intérêt à ce que les sciences sociales et économiques s'approprient la question du traitement des eaux usées par microalgues. Il est en effet nécessaire de ne pas perdre de vue le besoin, pour ne pas dire l'urgence, de créer et de disposer de connaissances robustes pour répondre aux besoins en eaux des sociétés méditerranéennes qui, plus que les autres, subissent déjà les effets du réchauffement climatique.

Références bibliographiques / Bibliographic References

Abdel-Raouf A., Al-Homaidan I., Ibraheem B., 2012, Abdel-Raouf^aA.A.Al-Homaidan^bI.B.M.Ibraheem^{bc} « Microalgae and wastewater treatment ». *Saudi Journal of Biological Science*, 19 (3) 257–275.

Alam M., Wang Z., 2019. *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. Singapore: Springer, 655 p.

Al Baz I., 2016. *Gestion intégrée des eaux usées dans le bassin méditerranéen — Bonnes pratiques en termes d’approches décentralisées et centralisées à des fins de réutilisation*. Berlin : German Cooperation/Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 108 p.

Bastian R.K., Reed S.C., 1979. *Aquaculture systems for wastewater treatment*. Seminar Proc. And Engin. Assessment. U.S. EPA, Washington D.C.

Deng L., Su Y., Su H., Wang X., Zhu X., 2007. “Sorption and desorption of lead [Pb] from wastewater by green algae *Cladophora fascicularis*”. *Journal of Hazardous Materials*, 143 (1–2): 220–225.

Hussein H., Ibrahim S.F., Kandeel K., Moawad H., 2004. “Biosorption of heavy metals from wastewater using *Pseudomonas* sp Electron”. *Journal of Biotechnology*, 7 (1): 0717–3458.

Larsdotter K., 2006. “Wastewater treatment with microalgae—a literature review”. *Vatten*, 62: 31-8.

O’Brien W. J., 1981, « Use of aquatic macrophytes for wastewater treatment ». *Journal of the Environmental Engineering Division*, 107:618—698.

Okoh A., Odjadjare E.E., Igbiosa E.O., Osode A.N., 2007, Wastewater treatment plants as a source of microbial pathogens in receiving watersheds. *African Journal of Biotechnology*, 6 (25): 2932–2944.

Oron G., L. R. Wildschut, D. Porath, 1985. “Wastewater recycling by Duckweed for protein production and effluent renovation”. *Water Science and Technology*, 17 (4–5): 803–818.

Persistence Market Research, 2018. *Microalgae Market: Global Industry Analysis [2012–2016] and Forecast [2017–2026]*. Persistence Market Research: New York, 170 p.

Rastoin, J. L., 2016. *Le secteur des microalgues en Méditerranée : Perspectives et contribution au développement durable*. Paris : IPAMED, 87 p.



ERANETMED2 72-300 “WABA” Project
“Wastewater bioremediation using Algae-Bacteria consortia for rural Areas”

WP 5 - RAPPORT 2 – REPORT 2
Évaluation du potentiel des STations d’ÉPuration des eaux usées (STEP) avec microalgues par des experts internationaux
Evaluation of the potential of wastewater treatment plants (WWTP) with microalgae by international experts

Nasser REBAI, nasser.rebai@ipemed.coop

15/01/2020

ANNEXES / APPENDICES

Annexe 1 — Formulaire d’enquête utilisé auprès des experts internationaux

Appendix 1 - Survey form used with international experts

Annexe 2 — Liste alphabétique des experts internationaux ayant répondu à l’enquête du projet WABA

Appendix 2 – Alphabetical list of international experts who responded to the WABA survey

Annexe 3. Estimation par les experts internationaux du niveau d’équipement de leurs pays en STEP

Appendix 3. Estimation by international experts of the level of equipment of their countries in STEP

Annexe 4 — Date de mise à jour des informations relative aux STEP dans les différents pays des experts consultés

Appendix 4 - Date of updating of information relating to STEP in the different countries of the consulted experts

Annexe 5 — Niveaux de diversification technologique des STEP dans les pays des experts sollicités pour l’enquête WABA

Appendix 5 - Levels of technological diversification of WWTPs in the countries of experts requested for the WABA survey

Annexe 6 — Avis des différents experts ayant répondu à l’enquête WABA sur l’efficacité des différents procédés de traitement des eaux usées existants

Appendix 6 - Opinion of the various experts who responded to the WABA survey on the efficiency of the various existing wastewater treatment processes

Annexe 7 - Détail des réponses des experts sur les impacts économiques, sociaux et environnementaux du développement de STEP avec microalgues.

Appendix 7 - Details of the experts' responses on the economic, social and environmental impacts of the development of STEP with micro-algae.

Annexe 8 - Avantages et inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues.

Appendix 8 - Advantages and disadvantages linked to the production of fertilizers and co-products in WWTPs with micro-algae.

Annexe 1 — Formulaire d'enquête utilisé auprès des experts internationaux
Appendix 1 - Survey form used with international experts

WABA Survey Google Form

WABA (Wastewater bioremediation using Algae-Bacteria consortia for rural Areas) Survey

WABA (Wastewater bioremediation using Algae-Bacteria consortia for rural Areas) is a project led by a consortium of researchers, composed of the University of Cordoba (Spain), CEA, IPEMED (France) and MAScIR Foundation (Morocco). It was selected within the framework of ERANETMED and was officially launched in 2018.

The WABA project aims at developing, experimenting and evaluating a wastewater treatment method using microalgae in rural areas, and to identify the possibilities of valorization of microalgae, especially of the processing of effluents treated by microalgae into fertilizer for local agriculture.

To carry out this project, IPEMED is in charge of conducting the following qualitative survey, for which we are seeking your expertise. The objectives of this survey are:

- To have an overview of wastewater treatment in rural areas, and of the profitability of rural wastewater bio-remediation processes using bacteria and microalgae consortia ;
- To estimate the economic, social and environmental impacts (advantages and disadvantages) of the installation of wastewater treatment processes using microalgae in rural areas ;
- To identify economic, social or environmental advantages and blocking factors to the processing of effluents treated by microalgae into fertilizers for agriculture.

Your contribution as an expert is essential to ensure that the survey is based on the most complete and the best possible information. We thank you for your time and attention and for the care you will take in formulating your response. A survey analysis report will be prepared and sent to the respondents.

1 / 5 – Expert Identification

e-mail *

Full name

Country

Organization and position

2 / 5 – Overview of wastewater treatment in rural areas in your country

Description (facultative)

1 - Estimation of the wastewater treatment plants in rural areas in your country

Description (facultative)

Number

% of rural areas equipped 1. 90%-100% 2. 80%-90% 3. 70%-80% 4. 60%-70% 5. 50%-60% 6. 40%-50% 7. 30%-40% 8. 20%-30% 9. 10%-20% 10. 0%-10%

Population equivalent (PE, average)

<p>Processes used and evaluation of their efficiency : Activated sludge Reed bed Trickling: Biological sand... Constructed wetland... Membrane bioreactor... Other* (*Please specify)</p> <p>Good Fair Poor</p> <p>Not available in rural areas</p> <p>Optional comments on table responses</p>
<p>Date these data were collected</p> <p>1. 2019 2. 2018 3. 2017 4. 2016 5. 2015 6. 2014 7. 2013 8. 2012 9. 2011 10. 2010 11. 2009 12. 2008</p> <p>2 - Are there wastewater treatment plants using microalgae in rural areas in your country?</p> <p>Description (facultative)</p>
<p>Localization</p> <p>Population equivalent (PE, average)</p> <p>Processes used and evaluation of their efficiency</p> <p>Activated sludge... Reed bed... Anti-Trickling Filter... Biological sand... Constructed wetland... Membrane bioreactor... Other* (*Please specify)</p> <p>Good Fair Poor</p> <p>Not available in rural areas</p>
<p>Optional comments on table responses</p> <p>Evaluation of the technical and economic efficiency of the plant</p>
<p>Date these data were collected</p> <p>1. 2019 2. 2018 3. 2017 4. 2016 5. 2015 6. 2014 7. 2013 8. 2012 9. 2011 10. 2010 11. 2009 12. 2008</p>

3 / 5 – Estimate of the potential impacts of the installation of wastewater treatment plants using microalgae in rural areas

Description (facultative)

1 - Advantages of wastewater treatment plants using microalgae in rural areas

Description (facultative)

Economic advantages

Social advantages

Environmental advantages

Other remarks

2 - Disadvantages of wastewater treatment plants using microalgae in rural areas

Description (facultative)

Economic disadvantages

Social disadvantages

Environmental disadvantages

Other remarks

4 / 5 – Specific evaluation of the potential production of fertilizer for agriculture using wastewater grown microalgae

Description (facultative)

1 - Advantages of the production of fertilizer for agriculture using wastewater grown microalgae

2 - Social disadvantages and blocking factors

Environmental disadvantages and blocking factors

Other remarks

3 - Suggestions to stimulate the development of this co-product

Description (facultative)
Suggestions
5 / 5
Further information Description (facultative)
Do you know any reference / website / information of interest or expert to contact on this particular subject?
Do you know any pilot plant (in a rural area) we could study? * (*Please specify)

Annexe 2 — Liste alphabétique des experts internationaux ayant répondu à l'enquête du projet WABA

Appendix 2 – Alphabetical list of international experts who responded to the WABA survey

Hassimi ABU HASSAN
 Xavier ÁLVAREZ
 Samira CHADER
 Ouafae EL HACHEMI
 Armando GONZALEZ-SANCHEZ
 David HERNANDEZ
 Guzine Ibrahim EL DIWANI
 George IFRIM
 Ahlem JEBELI
 Youssef KRICHEN
 Daniel JOHNSON
 Julien LAURENT
 Hervé LABAQUERE
 Farkhad OMAROV
 José Carlos PIRES
 Bruce RITTMANN
 Bruno SIALVE
 Laurenz THOMSEN
 Dimitris VAYENAS

Pays des experts : Algérie, Allemagne, Égypte, Équateur, Espagne, États-Unis, France, Grèce, Kazakhstan, Malaisie, Maroc, Mexique, Portugal, Roumanie, Tunisie

Expert's countries: Algeria, Germany, Ecuador, Egypt, France, Greece, Kazakhstan, Malaysia, Mexico, Morocco, Portugal, Romania, Spain, Tunisia, USA

Annexe 3. Estimation par les experts internationaux du niveau d'équipement de leurs pays en STEP

Appendix 3. Estimation by international experts of the level of equipment of their countries in STEP

Pays d'origine de l'expert Expert's Country	Estimation de la part (en %) des villes équipées en STEP
États-Unis / USA (1)	90-100
États-Unis / USA (2)	70-80
Équateur / Ecuador	30-40
Grèce / Greece	Non renseigné
Mexique / Mexico	Non renseigné
France (1)	70-80
Tunisie / Tunisia (1)	Non renseigné
France (2)	70-80
Égypte / Egypt	Non renseigné
Kazakhstan	Non renseigné
Portugal	80-90
Roumanie / Romania	40-50
Espagne / Spain	Non renseigné
France (3)	Non renseigné
Algérie / Algeria	Non renseigné
Malaisie / Malaysia	80-90
Maroc / Morocco	60-70
Allemagne / Germany	90-100
Tunisie / Tunisia(2)	70-80

Source : réponses des experts à l'enquête WABA 2019.

Annexe 4 — Date de mise à jour des informations relative aux STEP dans les différents pays des experts consultés

Appendix 4 - Date of updating of information relating to STEP in the different countries of the consulted experts

Pays / Country	Date
États-Unis / USA (1)	2019
États-Unis / USA (2)	2011
Équateur / Ecuador	2018
Grèce / Greece	2018
Mexique / Mexico	2016
France (1)	2016
Tunisie (1) / Tunisia	2017
France (2)	2018
Égypte / Egypt	2016
Kazakhstan	2019
Portugal	Non renseigné
Roumanie / Romania	Non renseigné
Espagne / Spain	Non renseigné
France (3)	Non renseigné
Algérie / Algeria	Non renseigné
Malaisie / Malaysia	2019
Maroc / Morocco	2013
Allemagne / Germany	2019
Tunisie (2) / Tunisia	2017

Source : réponses des experts à l'enquête WABA 2019.

Annexe 5 — Niveaux de diversification technologique des STEP dans les pays des experts sollicités pour l'enquête WABA

Appendix 5 - Levels of technological diversification of WWTPs in the countries of experts requested for the WABA survey

Pays	Boues activées Activated sludge	Filtre anti-ruissellement Anti-trickling filter	Filtre à sable biologique Biological sand filter	Zones humides construites Constructed wetland	Bioréacteurs à membrane Membrane bioreactor	Lagunes Lagoon	MICRO ALGUES MICRO ALGAE
États-Unis-1				X			
États-Unis-2							
Équateur	X	X			X		X
Grèce							X
Mexique		X	X		X		
France-1					X		X
Tunisie-1							X
France-2		X	X		X		X
Égypte							
Kazakhstan					X		X
Portugal	X	X					X
Roumanie	X	X	X	X			X
Espagne							X
France-3							X
Algérie							X
Malaisie	X	X			X		X
Maroc	X		X	X			X
Allemagne	X	X	X				
Tunisie-2 —							X

Source : réponses des experts à l'enquête WABA 2019.

Annexe 6 — Avis des différents experts ayant répondu à l'enquête WABA sur l'efficacité des différents procédés de traitement des eaux usées existants
Appendix 6 - Opinion of the various experts who responded to the WABA survey on the efficiency of the various existing wastewater treatment processes

Type de procédé Process Type	Bon Good	Convenable Suitable	Mauvais Bad	Non existant Not existing
Boues activées Activated sludge	États-Unis (1)	Maroc	Allemagne	Équateur
	Égypte			Roumanie
	Malaisie			Tunisie (2)
Filtre anti-ruissellement Anti-trickling filter	Malaisie	États-Unis (1)		Équateur
				Roumanie
				Tunisie (2)
Filtre à sable biologique Biological sand filter	Égypte			États-Unis (1)
				Équateur
				Roumanie
	Malaisie			Tunisie (2)
Zones humides construites Constructed wetland	Malaisie			Équateur
	Maroc			Tunisie (2)
Bioréacteurs à membrane Membrane bioreactor	États-Unis (1)			Équateur
	Malaisie			Tunisie (2)
	Allemagne			
Lit de roseau Reed bed	Malaisie	Allemagne		États-Unis (1)
				Équateur
				Roumanie
				Tunisie (2)
Autre / Other	Malaisie			Tunisie (2)

Annexe 7 - Détail des réponses des experts sur les impacts économiques, sociaux et environnementaux du développement de STEP avec microalgues.

Appendix 7 - Details of the experts' responses on the economic, social and environmental impacts of the development of STEP with micro-algae.

Expert	Economic	Social	Environmental	Others
USA-1	A ⁴⁰	Probably save some capital and operating costs.		
	D ⁴¹		Solids separation can cause high effluent BOD and SS, which can cause nes or huge extra costs to mitigate. Frankly, microalgae treatment has not been reliable. So, poor-quality discharges are common.	
USA-2	A		Low power consumption, 10 BOD 1NH4 effluent, Equal CAPEX lower OPEX	No odor low power.
	D			
ECA	A	Possibility of a subproduct.	The non-use of polluting methods and elimination of contaminating nutrients	
	D			Perhaps the need for qualified personnel.
GRC	A	Low operational cost, biomass production.	Green technology Minimum carbon footprint	
	D		N ₂ O production.	Large areas required
MEX	A		Low energy consumption at low mixing regime Side-byproducts generation i.e. fertilizer, biogas then additional workplaces at farms or rural areas Treated wastewater for re-use, biogas use as fuel mitigating CH ₄ emissions to atmosphere	
	D		This technology has a high water foot print.	Continuous energy consumption.

⁴⁰ A : avantage / advantage

⁴¹ D : Inconvénient / disadvantage

F R A - 1	A	No aeration costs.	Less footprint than constructed wetlands.	
	D			Need for electricity (paddle-wheel) unlike reed beds/CWs that can operate without energy in some conditions. Less integration than reed beds/CWs.
T U N - 1	A	The process is generating revenues to offset the high costs of conventional treatment methods.	The process is contributing also to GHGs emissions decrease.	The process may offer jobs.
	D		The cost of implementation within the WWTP at the beginning	
F R A - 2	A			
	D			
E G Y	A			
	D			
K A Z	A	There is no economic interest in the use of bacteria and microalgae for waste treatment in the regions of the rural economy of Kazakhstan.		
	D			
P R T	A		Microalgae produces O ₂ and uptakes CO ₂	
	D		One of the main disadvantages is the biomass harvesting.	
R O U	A		Maybe. Many microalgae ponds still need aeration and CO ₂ addition / It would be but passing CO ₂ through microalgae culture would x only a part of it. The result is a plant which pays to x CO ₂ (many time is hot) and evacuates a big quantity of CO ₂ . Technological advance is needed / It could be an advantage only if an efficient microalgae-bacteria consortium is developed.	
	D		They can kill bacteria, but also animals, even humans	

E S P	A		Not necessary. Microalgae based plants are very efficient when WWTPs are small like rural areas. But these WWTP must be well controlled to avoid important changes in organic matter and nutrients that may uncontrol your microalgae strains / CO2 capture seems a good tool to demonstrate that this technology captures CO2, but differences in wastewater treatment among CO2 supplementation or not supplementation are not so big / True. It is clear that carbon fingerprint using conventional WWTP is remarkably higher than using microalgae	Rural areas have big un-used areas in which microalgae may be dried by the sun.
	D		The one key point to pay attention is that this technology requires technical formation and these people may be more expensive than in a WWTP, but also, it is good because this technical people usually are younger and high-level formation, xing young people in rural areas.	
F R A - 3	A			
	D		The knowledge of the cultivation processes and the solutions to be proposed in case of problems in the cultivation of microalgae are considered as obstacles for the untrained persons in this end. Due to localization in rural areas it would be paid attention not to have too much high-tech plants. Robustness is also important for long time duration of processes. Another attention should concern the valorization held for algae. For example, acceptability should be a potential issue for food products from such plant.	
D Z A	A			
	D		Several physical, chemical and environmental parameters affect the culture of microalgae (optimal microalgae cultivation conditions must be respected)	
M Y S	A			
	D			
M A R	A	Nécessit e peu d'entreti en.	Efficacité dans l'élimination bactérienne et parasitaire.	
	D			Collecte difficile des microalgues (technique de coagulation-occultation coûteuse) et nécessité d'évaluer la qualité microbiologique de l'effluent avant toute réutilisation
D E U	A			Interesting for areas with tourism during summer
	D			too much area needed
T U N - 2 -	A			Meet the need for organic matter for small family farming. Complementarity between algae production and agricultural production. Microalgae can be the basis of territorial ecology processes.

	D			High maintenance cost of structures. But problem that could be resolved with the development of this technology. The treatment potential is also questionable. What volume can be treated? What is the size of an average structure?
--	---	--	--	--

Annexe 8 - Avantages et inconvénients liés à la production de fertilisants et de coproduits dans les STEP avec microalgues.

Appendix 8 - Advantages and disadvantages linked to the production of fertilizers and co-products in WWTPs with micro-algae.

E x p e r t				
	Economic	Social	Environmental	Others
U S A 1	A ⁴²			
	D ⁴³			
U S A 2	A			
	D			
E C U	A	Improvement of the economic and social conditions of rural communities.	Can be an excellent biofertilizer for the cultivation of short-cycle species of rural communities. Avoid the use of chemical fertilizers that are polluting	
	D	Only the leaders of the communities have access to processed micro algae biomass. Put women leaders in the process	Misuse of the biofertilizers produced.	Possibly an overproduction of microalgal biomass and the lack of efficient processing of this excess of biomass. Develop processing methods that result in more than one type of microalgal biomass product. Train rural communities on the use of this type of biofertilizer
G R C	A	Low cost.	New positions of employment.	Natural resources preservation.
	D			Possible existence of pathogens.
M E X	A	Savings for the farmers.	More work places.	The land would recover its nutrients
	D			Possibilities of releasing pollution in the eld, i.e. pollutants adsorbed on microalgae The chemical fertilizer producers could block

⁴² A : avantage / advantage

⁴³ D : Inconvénient / disadvantage

				Lack of condense of using fertilizer produced from the treatment of unknown residues
F F R A 1	A		Good content in N, P	
	D		Micropollutants	
T U N 1	A		Production of a bio-fertilizer. Saving the soil quality. Reducing the use of chemicals.	
	D	The cost of whole process. The scale of production is still at pilot and lab scale.		The application of the process at large scale and a technical and economic study must be performed to assess its feasibility.
F R A 2	A			
	D			
E G Y	A			
	D			
K A Z	A			
	D			
P R T	A			
	D			
R O U	A	They will have the same fate as activated sludge in terms of regulations.		
	D		Same as compost, many people hardly accept waste	Technology must evolve. The gases contain more that CO ₂ , many toxic compounds for microalgae also
E S P	A		If fertilizers are dried (not necessary 100 % dried) they may be set to other areas. There are no big differences between any residue or manure	
	D			

			used in the soil and microalgae.	
	D			
F R A 3	A			
	D			<p>We don't have enough feedback from our projects on practical aspects. It seems that this market is in progress and apparently easier to reach.</p> <p>According the use of whole algae or only extracted components, implications are Different for plants on level of complexity of processes, energy needs and also environmental aspects.</p>
D Z A	A		The use of these microalgae as fertilizer minimize the use of pesticides with major drawbacks.	
	D		Since microalgae retain, for example, heavy metals from the environment that are very toxic this could inuence the agricultural culture.	
M Y S	A	Low cost process.		
	D			
M A R	A	Nécessite peu d'entretien, efficacité dans l'élimination bactérienne et parasitaire.		Economie d'énergie de fonctionnement, ne dégage pas ou peu d'odeurs.
	D			<p>Occupation d'une grande surface (2m carrés par équivalent-habitant) et des teneurs élevées en matières en suspension (spécialement en été) dues aux microalgues</p> <p>Collecte difficile des microalgues (technique de coagulation-floculation coûteuse) et nécessité d'évaluer la qualité microbiologique de l'effluent avant toute réutilisation.</p>
D E U	A		Only interesting for green tides.	Using it for nutrients reduction and then extracting high value products
	D			

T U N - 2 -	A	Organize the communities for the management of the resource if the treatment stations are collective.		Meet the need for organic matter for small family farming. Complementarity between algae production and agricultural production. Microalgae can be the basis of territorial ecology processes.
	D	Cost of production and low amount?		

Projet ERANETMED2 72-300 « WABA » – WP 5 Étude de cas : STEP de Combaillaux (Hérault, France)

Jean-Louis.Rastoin@supagro.fr

28/12/2019

AVERTISSEMENT :

Aucune STEP en France n'utilisant les microalgues à la date de cette étude, la station faisant l'objet d'une étude de cas a été choisie sur les critères de taille (petite dimension) et de localisation en zone rurale méditerranéenne

Résumé

La STEP de Combaillaux, située en France en zone de piémont méditerranéen, a été installée en 2004, en utilisant la technologie de filtration des eaux usées par un substrat d'écorces végétales contenant des vers de terre (lombrics *Eisenia andrei*). Elle est dimensionnée pour 2 200 habitants. Les études comparatives menées avec les autres procédés d'épuration montrent une grande efficacité de traitement de ce procédé pour un coût d'investissement et de fonctionnement sensiblement inférieur. Son caractère innovant et la rigidité des réglementations limitent son extension, ce qui suggère une autre approche pour les microalgues. Notamment en concevant un programme spécifique pour les zones rurales encourageant des STEP de petites dimensions favorisant la proximité.

Objectif de l'étude de cas

Étudier les caractéristiques d'une STEP (station d'épuration des eaux usées) en zone rurale méditerranéenne et ses impacts en termes de durabilité : social, économique et environnemental afin d'en dégager des recommandations pour les responsables publics et professionnels.

Nom de la STEP : COMBAILLAUX

- Localisation : Commune située à une dizaine de km au nord de Montpellier
- Nom de la personne rencontrée : Daniel Floutard, Maire, Glenn Rémond, responsable de la STEP
- Date de l'entretien : 10/12/2019

1/ La commune de Combaillaux

Combaillaux⁴⁴ est une commune de 1 500 habitants (159 habitants/km²) à forte croissance démographique (155 habitants en 1975) située dans la périphérie nord-ouest de Montpellier en zone rurale de garrigues typiquement méditerranéenne d'une superficie de 906 ha et d'une altitude comprise entre 63 m et 275 m.

La moitié sud-est du territoire de la commune est constituée d'une plaine viticole traversée par la rivière La Mosson. La moitié nord-est constituée par les pentes de garrigues du bois de Valène. Le village de Combaillaux se trouve sur une des collines qui ponctuent l'espace entre les pentes et la plaine, l'autre colline, légèrement plus élevée, est occupée par le hameau des Sajolles (Wikipédia, 2019)⁴⁵.

Combaillaux compte 71 % d'actifs, avec un faible taux de chômage (6,4 % en 2015)⁴⁶. Le revenu médian des ménages est élevé (27 300 € en 2016), ainsi que le niveau d'éducation (55 % de titulaires d'un diplôme de l'enseignement supérieur). L'activité économique est principalement agricole et tertiaire, avec 138 établissements dont 74 dans les services privés (commerce, transport et divers), 23 dans l'administration publique, 22 dans la construction, 10 dans l'industrie et 9 dans l'agriculture, dont une large majorité (82 %) d'entreprises familiales sans salarié.

La commune comptait en 2010 (dernière année du recensement général agricole, RGA), 15 exploitations (pratiquant toutes la viticulture) disposant de 26 unités de travail annuel (UTA) sur 198 ha (contre 21 exploitations et 39 UTA sur 455 ha en 2000). On se trouve ainsi dans une situation typique de déprise agricole causée par la métropolisation et une économie agricole de rente foncière.

Combaillaux fait partie de la Communauté de communes du Grand Pic Saint Loup (CCGPSL) qui rassemble 33 communes situées au nord de Montpellier.

2/ Cadre institutionnel et historique de la STEP de Combaillaux

La réglementation sur l'eau et l'assainissement dans l'Union européenne fait l'objet de la directive 91/271/CEE du 21 mai 1991 relative aux eaux urbaines résiduaires. Elle impose des obligations de collecte et de traitement des eaux usées avant leur rejet dans le milieu naturel. Ces obligations ont été transcrites en droit français par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992, le décret n° 94-469 du 3 juin 1994 et récemment les arrêtés du 21/07/2015 et du 24/08/2017 relatifs au traitement des eaux usées. La directive-cadre sur l'eau 2000/60/CE du 23 octobre 2000, transcrite par la loi n° 2004-338 du 21 avril 2004, complète la réglementation existante en définissant un cadre pour la gestion et la protection des eaux par grand bassin hydrographique au niveau européen.

Le service de l'assainissement est un service public obligatoire pour les communes qui doivent prendre obligatoirement en charge les dépenses relatives aux systèmes d'assainissement collectif et les systèmes de contrôle des systèmes d'assainissement non collectif, comme le précise l'article L. 2224-8 du code général des collectivités territoriales.⁴⁷

⁴⁴ <http://www.combaillaux.fr>

⁴⁵ <https://fr.wikipedia.org/wiki/Combaillaux>

⁴⁶ <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=COM-34082#chiffre-cle-3>

⁴⁷ Cf. <http://assainissement.developpement-durable.gouv.fr/recueil.php>

C'est dans ce contexte réglementaire que la commune de Combaillaux a entrepris, à partir de 1998, des études avec le concours de l'INRA (Institut national de recherche agronomique) et de l'USTL (université des sciences et techniques du Languedoc, aujourd'hui université de Montpellier), initiées et coordonnées par Marcel Bouché et Patricio Soto de l'INRA de Montpellier, puis membres de l'association Lombritek⁴⁸, afin de créer une STEP⁴⁹. Ces études ont conduit à une expérimentation à partir de 2000 d'une technologie innovante d'épuration des eaux usées basée sur l'utilisation de vers de terre, dite de lombri-filtration. Le choix s'est ensuite porté, pour des raisons réglementaires de sécurité, sur une STEP mobilisant à la fois la lombri-filtration et la technique classique du lit bactérien. La STEP de Combaillaux a été ouverte en octobre 2004.

⁴⁸ <http://lombritek.com/lk/>

⁴⁹ A côté de ces partenaires scientifiques, le projet a bénéficié d'une assistance des associations Agropolis et Eco-Efficience, de l'institut agronomique méditerranéen de Montpellier (CIHEAM-IAMM), des entreprises Go-Albert (aujourd'hui AMI-Software) et SIEE, du CIEPAL, et du LAAP.

Encadré 1

Les normes d'assainissement des eaux usées en France

(Source : d'après https://aida.ineris.fr/consultation_document/35946)

Les normes d'assainissement par les TEP des eaux usées sont définies par le ministère de la Transition écologique dans le cadre de la réglementation européenne. Elles font obligation aux STEP d'atteindre des performances minimales de traitement sur un certain nombre de paramètres de pollution organique et teneur en phosphore et azote des eaux traitées.

Performances minimales de traitement attendues pour les paramètres DBO₅, DCO et MES.

Paramètre	Définition	Charge brute de pollution organique produite par l'agglomération de la STEP en kg/j de DBO ₅	Concentration maximale à respecter, moyenne journalière	Rendement minimum à atteindre, moyenne journalière
DBO ₅ (Demande Biochimique en Oxygène-5 jours)	Quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder les matières organiques biodégradables par voie biologique (oxydation des matières organiques biodégradables par des bactéries), consommée en 5 jours à 20°C par les microorganismes vivants présents dans l'eau.	< 120	35 mg (O ₂)/l	60%
		≥ 120	25 mg (O ₂)/l	80%
DCO (Demande Chimique en Oxygène)	Demande chimique en oxygène de tous les éléments présents dans l'eau (sels minéraux, composés organiques, etc.)	< 120	200 mg (O ₂)/l	60%
		≥ 120	125 mg (O ₂)/l	75%
MES (*)	Matières en suspension (ensemble des matières solides insolubles visibles à l'œil nu présentes en suspension dans un liquide. Plus une eau en contient, plus elle est dite turbide.)	< 120	/	50%
		≥ 120	35 mg/l	90%

(*) Les valeurs des différents tableaux se réfèrent aux méthodes normalisées, sur échantillon homogénéisé, non filtré ni décanté. Toutefois, les analyses effectuées en sortie des installations de lagunage sont effectuées sur des échantillons filtrés, sauf pour l'analyse des MES. La concentration réductrice des MES dans les échantillons d'eau non filtrée est alors de 150 mg/l en moyenne journalière, quelle que soit la CBPO traitée.

Source : Ministère de la Transition Ecologique, Arrêtés du 21/07/15 et du 24/08/2017 relatif aux systèmes d'assainissement collectif et aux installations d'assainissement non collectif, AIDA

Les STEP sont soumises à l'obligation d'autocontrôle de la qualité des eaux traitées selon des protocoles d'analyse stricts.

3/ Caractéristiques techniques

La STEP de Combaillaux⁵⁰, localisée au lieu-dit « Truc de la Reine » est dimensionnée pour 2 200 équivalents-habitants (EqH). Elle traite actuellement environ 1 300 EqH pour une population totale de 1 500 habitants du fait de l'existence d'une cinquantaine de fosses septiques individuelles. Les eaux usées sont acheminées par le réseau d'égout pour un débit quotidien d'environ 130 m³. Dans le système classique du lit bactérien après tamisage pour

⁵⁰ Voir le dossier de présentation qui constitue la source principale de ce paragraphe : <http://www.recyclaqua.agropolis.fr/default.html>

éliminer les particules supérieures à 0,75 mm de diamètre, les eaux sont dirigées vers un décanteur-digesteur puis vers une cuve (12 m de diamètre) à lit bactérien d'épuration, un clarificateur et enfin un bassin de lagunage. Dans le procédé de lombrifiltration, les eaux usées vont directement dans une cuve spéciale (12 m de diamètre) contenant un substrat fait de copeaux de bois hébergeant les lombrics (*Eisenia andrei*, Bouché, 1972), une espèce très prolifique et performante pour la digestion du compost et des déchets semi-liquides. La cuve est périodiquement arrosée et scarifiée par un robot. Les vers, au nombre de 25 000/m², sont photophobes et donc invisibles. Les lombriciens ne sont pas les seuls acteurs et leur système digestif ne fait pas tout le travail biologique. Les kilomètres de galeries qu'ils creusent dans le substrat assurent l'oxygénation indispensable au second intervenant, les bactéries.

Le cycle d'arrosage est de 15 min/h, ce qui permet une alternance d'afflux d'eau et d'air en quantité égale (30 l/m²). L'arrosage définit une « surface technique » dont le ratio est de 0,25 m² par équivalent habitant. Le débit ainsi obtenu est de 600 l/j, soit 4 fois l'émission d'eau admise par habitant.

Schéma de la STEP de Combaillaux



Source : http://www.recyclaqua.agropolis.fr/dossier_presse/lom06.html

Évaluation du procédé

L'association vers-bactérie, tant du point de vue mécanique que biologique, constitue une synergie et le rendement épurateur est élevé pour les matières en suspension et les matières organiques. Il est plus faible pour l'azote et le phosphore. Les lombrics, en activité alimentaire (absorption/digestion) continue, assurent le décolmatage du filtre, plaie des stations classiques qui oblige à manipuler de grandes quantités d'eau. Efficaces, ils dégradent intégralement les effluents.

À la sortie du lombrifiltre, il n'y a pas production de boues, mais de tortillons de terre comme on en trouve dans les champs, et d'eau quasi potable, qui pourrait être utilisée pour l'irrigation agricole sous réserve de l'absence de métaux lourds. Sans encombrant décanteur-digesteur en amont ni clarificateur en aval, le lombrifiltre épure l'eau en un quart d'heure. Une lagune de finition achève par décantation et activité microbienne le nettoyage.

Le système lombri-filtre limite la taille des stations : il suffit d'un mètre carré de cuve pour 5 habitants alors qu'un lagunage en demande dix fois plus.

Il faut également noter qu'un tel équipement ne nécessite que peu d'espace, qu'il possède une réelle capacité à absorber d'importantes variations de charges, qu'il ne consomme que très peu d'énergie, qu'il ne produit que très peu de nuisances olfactives et acoustiques et qu'il offre la possibilité d'un suivi écotoxicologique sur les rejets (cf. infra).

L'inconvénient principal du procédé d'épuration par des lombrics est une absorption moindre, par rapport à d'autres techniques, de l'azote et du phosphore, ce qui est par contre un avantage pour la fertilisation en agriculture.

La population de vers nécessite une aspersion uniforme et continue. Un dessèchement ou une inondation du filtre peut entraîner la mort des lombricidés.

Le risque principal de la lombri-filtration tient à la toxicité des eaux usées : si on nourrit les vers avec des eaux contenant du mercure, du cuivre ou de l'arsenic, ils meurent. La mortalité est un indicateur du degré de toxicité des eaux traitées. Pour corriger ce type d'accident, la station de Combaillaux comporte un système de lit bactérien moins sensible au risque d'écotoxicité qui peut fonctionner de façon autonome.

Le lombrifiltre convient ainsi aux communes sans industries ou activités très polluantes raccordées au réseau domestique, ce qui est la norme.

Le tableau suivant montre les performances techniques comparées des différentes technologies.

Tableau 1 : Efficacité technique d'une STEP selon la technologie (début des années 2000)

Variable polluante (mg/l et %)	Lombrifiltre	Boues activées	Lagunage	Lit bactérien
DCO	51,2 (83 %)		125 (>75 %)	<= 12
DBO	7 (94,5 %)	< 10		<=35
MES	12,8 (74 %)		<150	<= 30
N Kjeldhal (taux d'azote)	5 à 12 (93 à 97 %)			
N total	50 (50 %)	+/- dénitrification	60 à 70 %	
P total	6,2 (30 à 35 %)	+/- déphosphatation	60 à 70 %	
Turbidité	87 %			

DCO = demande chimique en oxygène/DBO = demande biologique en oxygène/MES = matières en suspension/N = azote/P = phosphore.

Nota : les cases qui ne sont pas renseignées correspondent à des données inconnues ou inexistantes pour le procédé visé. Valeurs en mg/l ou en % d'abattement.

Source : http://www.recyclaqua.agropolis.fr/dossier_presse/lom06.html, d'après une étude indépendante réalisée par Jean-Paul Stéphant, ingénieur au Conseil Général de l'Hérault en 2000.

4/ Caractéristiques économiques

La STEP de Combaillaux, dont le maître d'ouvrage était la commune, a nécessité environ 1 M. € d'investissements en 2003-2004 du fait de la nécessité d'un équipement mixte : lombri-filtre et lit bactérien, entraînant un doublement du coût total.

Tableau 2 : Répartition de l'investissement de la STEP de Combaillaux (2003-2004)

Investissements	k€
Lit bactérien	575
Lombri-filtre	150
Lagune	180
Infrastructures et parcours pédagogique	95
Total	1 000

S'agissant d'une station expérimentale (la 1^{re} en France de ce type et la 2^e dans le monde après celle du Chili installée au début des années 1990), un « parcours pédagogique » a été installé sur le site.

Le financement de la construction de la STEP de Combaillaux a mobilisé plusieurs partenaires : le Conseil Général de l'Hérault (aujourd'hui Conseil Départemental) au premier rang (65 %), le programme européen « Life »⁵¹ destiné à soutenir des projets dans les domaines de l'environnement et du climat (25 %), l'Agence de l'Eau (5 %) et la commune de Combaillaux (5 %). À signaler que l'État n'a apporté aucune subvention.

Tableau 3 : Le financement de la STEP de Combaillaux (2003-2004)

Sources de financement	k€
Conseil Général de l'Hérault	650
Union européenne (programme Life)	250
Agence de l'Eau	50
Commune de Combaillaux	50
Total	1 000

Le coût total annuel de fonctionnement de la STEP de Combaillaux est estimé à environ 250 k€ (soit le quart du budget de la commune. Du fait de l'automatisation de la gestion de la station et de la télésurveillance, les frais de personnel sont réduits [de l'ordre de 0,15 à 0,20 équivalent d'emploi à temps plein par an].

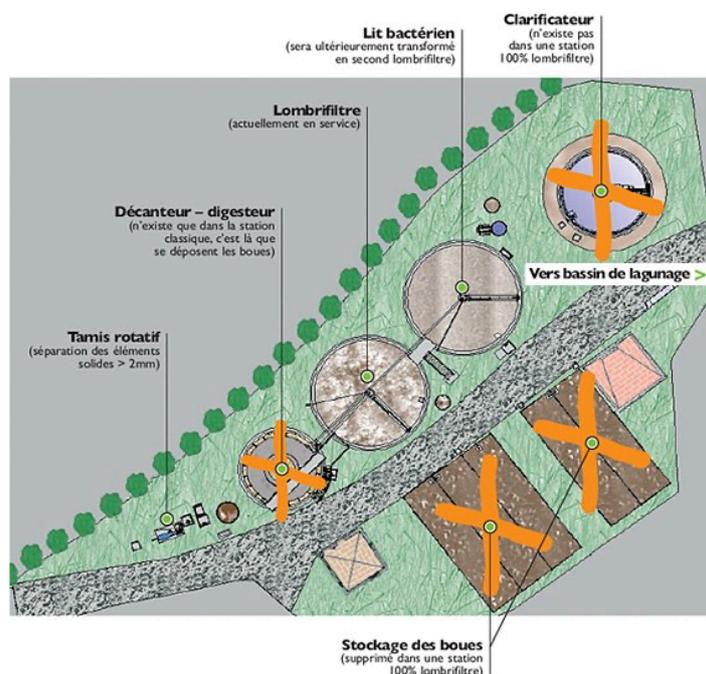
Le financement de ces charges est assuré par la vente de l'eau et la taxe d'assainissement, recettes perçues par la collectivité territoriale CCGPSL.

⁵¹ <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/programme-europeen-financement-life>

Évaluation économique

Le tableau comparatif ci-dessous fait apparaître un avantage concurrentiel du procédé de lombri-filtration par rapport aux techniques classiques de boues activées, lagunage et lit bactérien, comme le montre le schéma suivant, grâce à :

- l’absence de déshuilage-dégraissage, les matières grasses sont absorbées par les lombricidés
- l’absence de décanteur-digesteur anaérobie ou/et de bassin de traitements aérobie avant filtrage
- l’absence de décanteur ou clarificateur après le lombri-filtrage.



Source : http://www.recyclaqua.agropolis.fr/dossier_presse/lom06.html

Tableau 4 : Coûts comparés des STEP selon la technologie [début des années 2000]

Coût en € pour 1 000 EqH	Lombrifiltre	Boues activées	Lagunage	Lit bactérien
Investissements	76 225	227 150	116 623	177 603
<i>Investissement/habitant</i>	76	227	117	178
Charges annuelles de fonctionnement				
Main-d'œuvre	4 957	8 597	4 487	6 422
Énergie	804	2 721	0	485
Amortissement [10 ans]	7 623	22 715	11 662	17 760
Sous-total exploitation	13 384	34 033	16 149	24 667
Frais généraux [15 % exploitation]	2 008	5 105	2 422	3 700
Total fonctionnement	15 391	39 138	18 572	28 367
<i>Fonctionnement/habitant</i>	15	39	19	28

Source : http://www.recyclaqua.agropolis.fr/dossier_presse/lom06.html

5/ Gouvernance

Depuis 2018, la Communauté de communes du Grand Pic Saint-Loup [CCGPSL] exerce la compétence assainissement collectif des eaux usées pour 33 communes du territoire, en régie [c'est-à-dire en gestion directe] pour 22 communes [dont la commune de Combaillaux], en délégation avec la SAUR pour 9 communes et en délégation avec Véolia pour 2 communes.

Le service d'assainissement collectif de la CCGPSL désigne l'ensemble des activités et installations nécessaires à l'évacuation des eaux usées [collecte, transport, épuration et service clientèle]. Il gère 17 192 abonnés desservis par le réseau d'assainissement collectif public, soit environ 40 000 habitants. Il comporte 42 stations d'épuration des eaux usées [dont celle de Combaillaux], 68 postes de relevage des eaux usées, 340 kilomètres de canalisations du réseau d'assainissement collectif [hors branchements particuliers], 2 584 dispositifs d'assainissement non collectif, soit environ 8 000 habitants environ.

Le budget « Eau et assainissement » de la CCGPSL s'élève en 2019 à 20 M€ [36 % du budget total]. Un schéma directeur d'assainissement est en cours d'élaboration et devrait être publié en 2021.

Évaluation

La Mairie de Combaillaux fait une appréciation positive de la gouvernance actuelle de la STEP, du fait notamment de l'appui technique et administratif apporté par la CCGPSL allégeant les charges des services de la commune et de son insertion dans un réseau d'échanges d'expérience et de programmation pluriannuelle. Bien entendu, le mode de gouvernance ne pourra être pleinement évalué qu'à l'issue d'une période de plusieurs années de fonctionnement.

6/ Impacts

Le bilan de la STEP de Combaillaux après 15 ans de fonctionnement est largement positif du fait principalement de la technologie choisie de lombri-filtration.

Du point de vue social, il apporte une sécurité en termes de santé publique par son efficacité antimicrobienne. Comme expliqué plus haut, la question des métaux lourds ne se pose pas du fait de leur faible occurrence sur le territoire de la commune. Il n'existe pas à ce jour de protocole d'évaluation de l'antibiorésistance résultant de la présence de résidus d'antibiotiques ni de protocole d'analyse des perturbateurs endocriniens. Il est probable que de nouvelles réglementations concerneront ces problèmes de plus en plus médiatisés. La régulation de ces substances se fera probablement en amont des STEP [industrie pharmaceutique].

À noter également dans ce domaine, la bonne fréquentation du « parcours pédagogique », permettant une compréhension du procédé de lombri-filtration, tant par des visiteurs scolaires, de l'enseignement supérieur et de la recherche que par des professionnels et des élus [avec une moyenne depuis 15 ans d'une visite par mois] et une couverture médiatique régionale, nationale et internationale élevée [télévision, radio, presse écrite].

Du point de vue environnemental, l'absence de boues d'épuration élimine la difficulté de leur élimination par épandage, alors que de plus en plus d'agriculteurs sont réticents. Par

ailleurs des co-produits [eau d'irrigation lorsque la réglementation le permettra, compost] sont valorisables.

Les paramètres économiques sont très sensiblement plus favorables en lombri-filtration en comparaison des techniques conventionnelles : investissements inférieurs de 50 % et coûts de fonctionnement de 25 à 100 %.

Dans ces conditions, on peut s'interroger de l'absence de nouvelles créations de STEP utilisant la technologie de lombri-filtration en France.

Deux causes expliquent cette situation. La première est institutionnelle et tient à l'aversion aux innovations de l'État et des collectivités territoriales et à l'inertie des administrations. La seconde à l'absence d'opérateurs économiques de fabrication et commercialisation des équipements couplée à la spécialisation des grandes entreprises du secteur de l'assainissement dans les STEP de grande dimension pour les zones fortement urbanisées.

7/ Perspectives

La population de Combaillaux devrait avoisiner 2000 habitants en 2030. Une extension de la capacité de traitement de la STEP est envisagée par création d'un lit à plat de lombri-filtration d'environ 500 m² qui pourrait se substituer à la cuve actuelle [ratio de 5 min 2 s/habitant], avec l'adjonction de nouveaux équipements en fonction de la réglementation [filtre à phosphates notamment].

Un schéma directeur d'assainissement de la commune s'intégrant dans celui de la CCGPSL) est en préparation qui sera intégré dans le SCoT (Schéma de cohérence territoriale) 2030.

Conclusion

On observe que dans l'industrie de l'assainissement, comme dans beaucoup d'autres et dans l'agriculture, le modèle d'affaires dominant est concentré, globalisé et financiarisé et tire des rentes des structures de marché. Cependant, la France, l'Europe et le monde se trouvent confrontés à une crise systémique sociale, économique et environnementale qui appelle une transition socio-écologique.

Cette transition devrait notamment prendre la forme d'une territorialisation des activités de base et donc de la multiplication de STEP de taille réduite plutôt qu'à la poursuite de leur concentration génératrice d'externalités négatives.

Cette tendance constitue une opportunité pour le développement rural, sur la base de technologies innovantes comme la lombri-filtration qui constitue un bon exemple de bioéconomie circulaire territorialisée.

Sommaire

Préambule	p. 2
Synthèse	p. 3
Rapport 1	
Le contexte socio-économique et environnemental de l'assainissement des eaux usées dans les zones rurales des pays méditerranéens	p. 4
Rapport 2	
Évaluation du potentiel des STations d'ÉPuration des eaux usées (STEP) avec microalgues par des experts internationaux	p. 21
Étude de cas	
La STEP de Combaillaux (Région Occitanie, France)	p. 59

* * *