

Proposition pour la réhabilitation de la station d'épuration de la commune d'El Attaouia (Maroc)

Auteur : Lilien, Grégoire

Promoteur(s) : 3206

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences et gestion de l'environnement, à finalité spécialisée en gestion intégrée des ressources en eau

Année académique : 2016-2017

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/3294>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.



Faculté des Sciences

Département des Sciences et Gestion de l'Environnement

Proposition pour la réhabilitation de la station d'épuration de la commune d'El Attaouia (Maroc)

Mémoire présenté par Lilien Grégoire

En vue de l'obtention du grade de

**« Master en Sciences et Gestion de l'environnement - finalité Gestion intégrée des
ressources en eau »**

Année académique 2016-2017

Rédigé sous la direction de Fouad ZOUHIR

Remerciements

Je remercie toutes les personnes m'ayant aidé à réaliser ce mémoire et tout particulièrement :

Ma grand-mère, LILIEN Josette pour la relecture du travail.

Monsieur JUPSN Hugues et ZOUHIR Fouad de l'équipe Ulg Arlon, qui m'ont épaulé et fourni les éléments nécessaires pour la réalisation de ce travail.

Madame MANDI Leila, directrice du Centre National d'étude et de Recherche sur l'Eau et l'Energie (CNEREE) de l'université Cadi Ayyad au Maroc ainsi que Madame OUAZZANI Naaila, chercheuse et professeur du même organisme pour leur accueil, aide et soutien lors de la collecte de données réalisée au Maroc.

Monsieur EL KEROUMI Abderahim, conseillé de la commune d'El Attaouia, pour son accueil et son aide lors des visites effectuées sur la station mais aussi pour la mise à disposition des documents, études disponibles sur la station.

Enfin je remercie tous mes proches, amis et familles qui m'ont soutenu pendant mes huit années d'études.

Résumé

La station d'épuration de la commune d'El Attaouia est une station de type RACHAHR qui a été créée en 2003. Ce type de procédé se compose de deux parties principales : des réacteurs anaérobies et un chenal algal à haut rendement (CAHR).

La station d'El Attaouia a commencé à présenter des signes de dysfonctionnement dès 2006 amenant en 2008 à son arrêt complet. Depuis cette année, les eaux usées sont déviées et rejetées sans aucun traitement dans un cours d'eau se situant à l'arrière de la STEP. Les eaux de ce cours d'eau sont utilisées par les agriculteurs pour l'irrigation de leurs champs et oliviers. Il y a donc un risque sanitaire important auquel il faut remédier rapidement. C'est pour cette raison que la commune d'El Attaouia a contacté l'équipe de l'Ulg Arlon (section eaux) pour les aider à rédiger le cahier des charges en vue d'obtenir un financement de la part du ministère marocain.

Le but de ce travail est donc de proposer une réhabilitation de la station afin de traiter les eaux usées domestiques jusqu'au moins 2030. Un paramètre qui sera pris en compte tout au long du dimensionnement, est l'aspect économique. Le coût devra être le moins élevé possible. L'idée est de conserver le type de procédé RACHAHR mais de l'optimiser pour améliorer l'épuration de la STEP. La partie pratique de ce travail comprendra les calculs du dimensionnement du dégrilleur, du dessableur, des réacteurs anaérobies (RAFADE et UASB), du CAHR et de la lagune aérée (alternative au CAHR) et des bassins de maturation. Cette partie contient également des conseils qu'il faut prendre en compte pour la construction des différents ouvrages.

Abstract

The wastewater treatment plant (WTP) in El Attaouia is a RACHAHR-type, which was established in 2003. This type of process consists of two main components: anaerobic reactors and a high-performance algal channel (CAHR).

The station of El Attaouia began to show signs of dysfunction already in 2006 to lead, in 2008 to its complete stop. Since that year, wastewater has been diverted and discharged without any treatment into a watercourse located at the back of the WTP. The waters of this river are used by farmers for the irrigation of their fields and olive trees. Since then, there is a significant health risk that needs to be remedied quickly. It is for this reason that the municipality of El Attaouia has contacted the Ulg Arlon team (water section) to help them draft the specifications as a goal to obtain funding from the Moroccan Ministry.

The aim of this work is therefore to propose a rehabilitation of the station in order to treat the domestic wastewater up to at least 2030. A parameter that will be taken into account throughout the dimensioning is the economic aspect, which will have to be as low as possible. The idea is to keep the type of RACHAHR proceeding but to optimize it to improve the treatment. The practical part of this work will include the sizing of the bar screen, the sand trap, the anaerobic reactors (RAFADE and UASB), the Algal channel and the aerated lagoon (alternative to the channel) and the stabilization ponds. This section also contains advice to be taken into account in the construction of the various structures.

Table des matières

Résumé	2
Abstract	2
Table des matières	3
Liste des figures	6
Liste des tableaux	7
Abréviations	7
I. Introduction	8
II. Partie théorique	9
2.1. Mise en situation	9
2.1.1. Description de la région d'El Attaouia	9
2.1.2. Caractérisation de l'effluent à l'entrée de la station	10
2.1.3. Description de la station d'épuration existante	11
2.1.3.1. Principe de fonctionnement	12
1) Prétraitement	12
a) Dégrilleur	13
b) Dessableur	13
b) Pompe de refoulement	13
c) Bassin de dissipation	14
d) Réacteur RAFADE	14
e) Décanteur	16
f) Lits de séchage des boues	16
2) Traitement tertiaire	16
a) Chenal algal à haut rendement (CAHR)	17
b) Bassins de maturation	18
2.1.2.2 Dimensions de la station	18
2.1.2.3 Performance des différentes technologies/ouvrages	18
1) Réacteurs RAFADE	19
a) DBO/DCO	19
b) Pathogènes	20
2) CAHR	20
a) Nutriments	20
b) Pathogènes	21
3) Bassin de maturation	22
a) Charge organique	22
b) Les pathogènes	22

2.1.3. Cause de l'arrêt de la STEP	22
III. Partie pratique.....	26
3.1. Réhabilitation de la STEP	26
3.1.1. Dimensionnement des différentes unités de traitement.....	26
3.1.1.1. Prétraitement.....	26
1) Dégrilleur	27
a) Rôle du dégrilleur	27
b) Dimensionnement.....	27
c) Perte de charge.....	29
d) Résumé des dimensions du dégrilleur	29
2) Dessableur.....	29
a) Rôle	29
b) Dimensionnement du dessableur	30
c) Règles pour la construction	32
3) Réacteurs anaérobies.....	32
a) Rôle	32
Les RAFADE.....	32
a) Principes de fonctionnement	32
b) Performances	33
c) Dimensionnement	33
d) Résumé.....	36
e) Règles pour la construction.....	36
L'UASB	38
a) Principe de fonctionnement.....	38
b) Performances des réacteurs	40
c) Dimensionnement des réacteurs UASB.....	40
d) Résumé des dimensions.....	43
e) Règles pour la construction.....	43
Choix du réacteur anaérobie pour la STEP d'El Attaouia	49
3.1.1.2. Traitement tertiaire	49
1) Chenal algal à haut rendement (CAHR).....	49
a) Rôle	50
b) Dimensionnement.....	50
Nouveau Chenal algal à haut rendement.....	51
a) Dimensionnement	51
b) Règles pour la construction.....	52

c) Résumé des dimensions du nouvel CAHR	52
d) Système d'agitation.....	52
Lagune aérée	54
a) Principe.....	54
b) Dimensionnement de la lagune aérée	54
b) Résumé des dimensions de la lagune aérée	55
c) Système d'aération	56
2) Bassins de maturation.....	57
a) Rôle.....	57
b) Dimensionnement.....	57
3.2. Production de résidus d'épuration dans les différents ouvrages	58
3.2.1. Prétraitement	58
1) Dégrilleur	58
2) Dessableur	58
3) Réacteurs anaérobies	59
a) RAFADE	59
b) UASB	59
3.3. Production de méthane dans les réacteurs anaérobies.....	59
a) UASB	60
b) RAFADE.....	61
3.3. Organisation générale de la nouvelle station d'El Attaouia.....	61
Conclusion	63
Bibliographie.....	64

Liste des figures

Figure 1 : Carte de la commune d'El Attaouia et de ses alentours (source : google maps).....	9
Figure 2 : Vue aérienne de la station d'El Attaouia (source : google maps)	12
Figure 3 : Image du dessableur de la STEP d'El Attaouia en 2005 (source : (Abdelhadi, 2006)).....	13
Figure 4 : Image de la pompe de refoulement de la STEP d'El Attaouia (source :(Abdelhadi, 2006))..	13
Figure 5 : Image du bassin de dissipation de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).....	14
Figure 6 : Image des réacteurs RAFADE (2017).....	15
Figure 7 : Image du décanteur de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).....	16
Figure 8 : Image des lits de séchage des boues de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).	16
Figure 9 : Image du CAHR de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))	17
Figure 10 : Image de la roue à aubes de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).....	17
Figure 11 : Image du bassin de maturation de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).....	18
Figure 12 : Bilan d'azote dans le CAHR avec à gauche l'entrée et à droite, la sortie du chenal algal (source : (Hamouri, 2005)) (NOD : azote organique dissous et NOP : azote organique particulaire) ..	20
Figure 13 : Bilan du phosphore dans le CAHR conduit comme unité de traitement tertiaire avec à gauche l'entrée et à droite la sortie du CAHR (source : (Hamouri, 2005)) (pp : p particulaire, PODPP : P organique dissous, PO43- : polyphosphates)	21
Figure 14 : Image aérienne de l'extension de la STEP d'El Attaouia (source : Google maps)	23
Figure 15 : Image de la dégradation du décanteur de la STEP d'El Attaouia (source : (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016))	24
Figure 16 : Trous dans la géomembrane du CAHR (2017)	24
Figure 17 : Plis dans la géomembrane du CAHR (2017)	24
Figure 18 : Déchirures dans la géomembrane du CAHR de la STEP d'El Attaouia (2017)	25
Figure 19 : Apparition de végétaux aux endroits des déchirures (2017)	25
Figure 20 : Image des déchets verts dans le dessableur et bulles à la surface (2017).....	25
Figure 21 : Illustration des données nécessaires pour calculer la largeur du dégrilleur (source : (Sadowski, 2006)	28
Figure 22 : Schéma d'un dessableur (source : (Sy & Tall, 2003))	32
Figure 23 : Répartiteurs de l'effluent pour les différents tuyaux de distributions (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) pour l'image de gauche et (Abdelhadi, 2006) pour l'image de droite).....	37
Figure 24 : Illustration d'un tuyau de distribution (source :(Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)) ...	37
Figure 25 : Schémas de réacteur UASB (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)).....	39
Figure 26 : Représentation schématique d'un UASB rectangulaire (source :(Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)).....	43
Figure 27 : Représentation schématique d'un réacteur UASB (source : (Moletta, 2002))	46
Figure 28 : Illustration des valves sur un réacteur UASB (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))	48
Figure 29 : Illustration d'un système air lift (source :(Wikipédia, n.d.)).....	53
Figure 30 : Schématisation de l'organisation générale de la STEP d'El Attaouia, avec l'option lagune aérée (auteur : Eloë Sadatchy)	62
Figure 31 : Schématisation de l'organisation générale de la STEP d'El Attaouia, avec l'option nouveau CAHR (auteur : Eloë Sadatchy)	62

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques de l'effluent entrant dans la STEP d'El Attaouia (les valeurs utilisées pour la réalisation de ce tableau sont issues de :(Elan ingénierie & consulting SARL, 2016))	11
Tableau 2 : Dimensions des différentes unités de la STEP d'El Attaouia (chiffres issus de : (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016))	18
Tableau 3 : Demande chimique et biochimique en oxygène pour la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).....	19
Tableau 4 : Valeurs et taux d'abattement des matières solides pour la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).....	19
Tableau 5 : Valeurs et taux d'abattement des nutriments pour la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).....	19
Tableau 6 : Bilan des coliformes fécaux pour la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006)).....	19
Tableau 7 : Rôle et performances du bassin de maturation (source : (Hamouri, 2005))	22
Tableau 8 : Dimensions du dégrilleur de la STEP d'El Attaouia	29
Tableau 9 : Résumé du dessableur de la STEP d'El Attaouia	32
Tableau 10 : Résultats pour le dimensionnement des réacteur RAFADE de la STEP d'El Attaouia	35
Tableau 11 : Grandeur des réacteurs RAFADE de la STEP d'El Attaouia	36
Tableau 12 : Résultats des calculs en vue de l'obtention du volume des réacteur UASB de la STEP d'El Attaouia (selon la vitesse ascensionnelle).....	41
Tableau 13 : Résumé des résultats obtenus en vue de l'obtention du volume total des réacteurs UASB de la STEP d'El Attaouia (selon le TRH)	41
Tableau 14 : Résumé des dimmensions des réacteurs UASB de la STEP d'El Attaouia	43
Tableau 15 : Aire d'influence des distributeurs selon le type de boue et la charge organique de l'influent (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))	45
Tableau 16 : Temps de rétention hydraulique dans le compartiment de sédimentation (source :(Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))	47
Tableau 17 : Vitesse ascensionnelle dans le compartiment de sédimentation (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))	47
Tableau 18 : Résumé des dimensions des différents systèmes (collecte, distribution, etc.) des réacteurs UASB.....	49
Tableau 19 : caractéristiques du surpresseur Aerzen, GM 7 L-G5.....	53
Tableau 20 : Dimensions du CAHR de la STEP d'El Attaouia	55
Tableau 21 : Dimensions des bassins de maturation de la STEP d'El Attaouia.....	58

Abréviations

MVS : Matières volatiles en suspension
MES : Matières en suspension
STEP : Station d'épuration
TRH : Temps de rétention hydraulique
DCO : Demande chimique en oxygène
DBO ₅ : Demande biologique en oxygène
NTK : Azote totale de Kjeldahl
RACHAHR : Réacteur anaérobie et Chenal Algal à Haut Rendement
RAFADE : Réacteur anaérobie à Flux ascendant et à Deux étapes
UASB : Upflow anaerobic sludge blanket reactors

I. Introduction

Le but de ce travail est de proposer une réhabilitation pour la station d'épuration de la commune d'El Attaouia. Celle-ci a été créée en 2003 pour traiter les eaux usées domestiques de toute la commune. Dès l'année 2006, la station a commencé à présenter des signes de dysfonctionnement. En 2008 elle a été mise totalement à l'arrêt et depuis cette date, les eaux usées sont rejetées sans aucun traitement dans un cours d'eau se trouvant à proximité de la station. Ce cours d'eau passe à travers des champs et des oliviers est utilisé par les agriculteurs pour l'irrigation. Il y a donc un risque sanitaire relativement élevé. Ce travail fait suite à une demande d'aide introduite par la commune d'El Attaouia à l'équipe de l'Ulg d'Arlon (section des eaux) pour la rédaction du cahier des charges afin d'obtenir un financement de la part du ministère marocain.

L'objectif est de proposer une réhabilitation complète de la station d'épuration afin qu'elle puisse traiter les eaux domestiques de la population prévue pour 2030. L'étude devra tenter au maximum de garder les coûts de la réhabilitation le plus bas possible. Le principe du type de procédé (RACHAHR) de la STEP d'origine sera conservé mais optimisé pour améliorer l'épuration.

Ce travail s'organise en deux parties, une partie théorique qui introduit la station et ses principes de fonctionnement et une partie pratique qui se concentre sur le dimensionnement des différents éléments de la STEP.

La partie théorique va donc décrire les différentes unités de traitement qui composent la station existante, le principe du traitement utilisé (RACHARH), le rôle et fonctionnement des différents éléments ainsi que leurs performances respectives.

La partie pratique présentera les différents calculs de dimensionnement qui ont été réalisés pour les différentes unités de traitement de la station.

Ainsi les dimensions du dégrilleur, dessableur, des réacteurs anaérobies, du chenal algal à haut rendement et des bassins de maturation y seront déterminées. En plus des calculs des dimensions, des conseils pratiques à prendre en considération lors de la construction des différents éléments seront fournis.

Le tout ayant pour but de pouvoir chiffrer dans une étude ultérieure le coût total de cette réhabilitation de la STEP d'El Attaouia.

II. Partie théorique

2.1. Mise en situation

2.1.1. Description de la région d'El Attaouia

La commune d'El Attaouia est une commune du Maroc créée en 1972. La ville d'EL Attaouia, qui donne son nom à la commune, a une superficie de 530 ha et fait partie de la région de Marrakech Safi et de la province d'El Kelaat des Sraghna. (Abdelhadi, 2006) Elle se situe dans la partie Nord du Maroc, à l'est de Marrakech (80 km), à 28 km au sud-est de la ville de Kelaat de Sraghna et à l'ouest de Demnate.(Elan ingénierie & consulting SARL, 2016) Les coordonnées Lambert du centre de la commune (ville d'El Attaouia) sont : X= 318440 et Y= 139500 (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016)



Figure 1 : Carte de la commune d'El Attaouia et de ses alentours (source : google maps)

C'est une commune à caractère principalement rural, qui compta une superficie irriguée de 250 hectares. Les principales cultures que l'on y retrouve, sont classées par importance décroissante : des céréales, des fourrages, du maraîchage et des légumineuses. La région connaît une production importante d'olives et compta trois grandes huileries qui ont une capacité de production de 60 tonnes/jour. Hormis ces huileries, l'activité industrielle n'est pas fortement développée sur le territoire. (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016)

La population de la commune a été recensée en 2014 à 30315 habitants. Le climat qui y règne est décrit comme semi-aride avec des précipitations moyennes annuelles qui se situent entre 225 et 275 mm/an et des températures moyennes situent entre 10 °C (Janvier) et 45 °C(Juillet). (Abdelhadi, 2006; Elan ingénierie & consulting SARL, 2016)

2.1.2. Caractérisation de l'effluent à l'entrée de la station

Le but de cette partie est de caractériser les eaux usées qui arriveront à la station d'El Attaouia et qu'il faudra y traiter. Pour caractériser les eaux usées, il faut déterminer leur charge polluante et leur débit. Ces deux termes sont nécessaires pour pouvoir calculer les dimensions des différents ouvrages de la STEP. En effet la quasi-totalité des formules utilisent un ou plusieurs éléments de ces caractéristiques.

Sous le terme charge polluante on entend, la quantité de DBO_5 , de MES et de DCO qui est présente dans l'influent et sous le terme débit, on entend le journalier arrivant sur la station et le débit max mesuré.

De manière logique, une station d'épuration doit être pensée sur le long terme. On ne peut juste se contenter de la dimensionner pour traiter les eaux usées actuelles, elle doit également être capable de traiter les eaux usées futures. Il faut donc prévoir (sur une quinzaine d'années) quelle sera l'évolution de la population afin de pouvoir estimer quelle charge devra être traitée à la station. L'année de référence pour la station d'El Attaouia, est 2030. Ses différents ouvrages seront donc dimensionnés pour traiter les eaux usées de cette année. Il ne reste plus qu'à caractériser les eaux de 2030.

Dans la pratique ce qui est utilisé pour la caractérisation c'est l'équivalent-habitant. Il exprime le volume d'eau usée, sa charge en DBO_5 , DCO, MES, ... produit par habitant et par jour.

L'EH Marocain est différent de l'EH belge et équivaut à 70 L/habitant avec :

- 68 g O₂/j de DCO (soit 971,43 mg/L)
- 26 g O₂/j de DBO_5 (soit 371,43 mg/L)
- 36 g/j de MES (soit 514,285 mg/L)

A titre de comparaison voici l'EH belge : 180L/habitant

- 135 g O₂/j de DCO (soit 750 mg/L)
- 60 g O₂/j de DBO_5 (soit 333 mg/L)
- 90 g de MES (soit 500 mg/L)

On peut voir que malgré le nombre de litres beaucoup plus faible, l'EH Marocain présente une forte charge polluante, surtout au niveau des MES. Ce seront donc des eaux très chargées, avec de fortes concentrations qui arriveront à la station. On peut déjà se douter que le prétraitement aura un rôle très important pour la station, car il permet d'éliminer les MES et ainsi d'éviter une surcharge sur les traitements en aval (cf. plus loin).

Il faut maintenant trouver la population attendue d'ici 2030 pour pouvoir calculer quels seront les différents débits, charges polluantes nécessaires aux calculs de dimensionnement.

L'estimation de la population de 2030 a été réalisée par les pouvoirs locaux et s'élève à 52475 habitants. (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016) La hausse, théorique, de 22160 EH par rapport à 2014 doit donc être prise en compte plus loin dans les calculs. D'après les prévisions des autorités locales toujours, le taux de raccordement au réseau d'égouttage des foyers de la région devrait passer de 84% à 96% d'ici 2030.

Ensuite, la consommation en eau des marocains est susceptible de changer d'ici 2030. D'après les statistiques présentées (par (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016), l'EH marocain devrait évoluer de 70 à 90 litres par jour. Pour ce qui est de la charge polluante, son évolution est relativement difficile à estimer. Il a été estimé (par (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016), qui se base sur la méthode recommandée par le schéma directeur national d'assainissement (SDNAL) que la DBO5 évoluera de 1g/hab/j tous les 10 ans pour tenir compte de l'amélioration du niveau de vie de la population. Le rapport DCO/DBO₅ est de 2,8.

Le tableau suivant résume les caractéristiques des eaux usées prévues pour l'années 2030 :

Projection pop 2030	Conso. 2030 (l/j/hab)	Débit journalier (m ³ /j)	Débit STEP/j (m ³ /h)	coeff de pointe	Q max (m ³ /h)	Qmax (m ³ /s)	Charge DBO5/hab (g O ₂ de DBO5/j)	Charge polluante totale DBO5/hab (kg O ₂ de DBO5/j)	Charge polluante totale DBO5/hab (kg O ₂ de DBO5/j)
52475	90	4722,75	196,78	1,8	354,21	0,098	26	1364350	1364,35

Tableau 1 : Caractéristiques de l'effluent entrant dans la STEP d'El Attaouia (les valeurs utilisées pour la réalisation de ce tableau sont issues de : (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016))

Ce sont ces valeurs qui seront utilisées pour tous les calculs de dimensionnement dans la partie pratique.

2.1.3. Description de la station d'épuration existante

La STEP se situe au Nord-ouest de la ville d'El Attaouia à proximité de champs et de plantations d'oliviers. Les coordonnées Lambert sont X : 317 260 et Y : 141 450. (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016)

La station se divise en deux parties séparées : la première (rouge sur carte) est une station de pompage, où les eaux usées collectées par le réseau d'égouttage sont regroupées puis envoyées par une pompe, vers la deuxième partie (jaune sur carte) de la station. C'est également dans cette première partie que se situe le dégrilleur et le dessableur. La deuxième constitue la partie principale de la STEP. On y retrouve différents éléments tels que les réacteurs anaérobies, le chenal algal, le décanteur, etc. (cf. point suivant)

Les deux parties de la station sont séparées comme on peut le voir sur l'image ci-dessous, par le canal Rocade qui alimente en eau potable la ville de Marrakech (le tuyau qui achemine les eaux usées vers la deuxième partie, passe en dessous du canal). Les eaux une fois épurées sont rejetées dans un petit cours d'eau qui s'écoule derrière la station et qui est utilisé par les agriculteurs pour l'irrigation.



Figure 2 : Vue aérienne de la station d'El Attaouia (source : google maps)

2.1.3.1. Principe de fonctionnement

Cette partie va exposer le principe de fonctionnement de la STEP d'El Attaouia en décrivant les différents éléments qui la constituent, tout en précisant leurs rôles respectifs.

La station d'épuration de la commune d'El Attaouia a été conçue sur base du principe du traitement par Réacteur Anaérobie et du Chenal Algal à Haut Rendement (RACHARH). Le RACHARH est un système de traitement extensif qui est une variante du lagunage naturel. (Nacir, Ouazzani, Vasel, Jupsin, & Mandi, 2010) Les deux éléments principaux de ce type de procédés sont les réacteurs anaérobies et le chenal algal à haut rendement.

L'intérêt d'avoir recours à des réacteurs anaérobies est d'améliorer le rendement épuratoire de la station et de diminuer ainsi l'emprise au sol de la station. (Hamouri, 2005)

Les éléments constituants de la station sont dans l'ordre : le dégrilleur, le dessableur, la pompe de refoulement, le bassin de dissipation, les réacteurs anaérobies (RAFADE), le décanteur, les lits de séchage des boues, le CAHR et les bassins de maturation (la pompe et le bassin de dissipation ne jouent pas un rôle dans l'épuration mais bien dans l'acheminement de l'influent). Les parties en amont du chenal algal font partie du prétraitemet et les parties qui suivent font partie du traitement tertiaire.

1) Prétraitemet

Le but du prétraitemet est de préparer les eaux usées au traitement tertiaire. Le rôle principal est de supprimer des éléments qui sont susceptible de gêner la suite de l'épuration dans le reste de la station. Dans ce type de procédé d'épuration (RACHAHR), le prétraitemet est primordial. Tout d'abord ces unités permettent de réduire les MES, les matières organiques solubles et certains pathogènes, présents dans les eaux et qui risqueraient de gêner le processus épuratoire dans le CAHR, par exemple (cf. plus loin). Il réduit donc la pression exercée sur le traitement tertiaire (CAHR principalement) et permet d'obtenir de bonnes performances épuratoires. Dans le cas du chenal algal, les unités de prétraitemet se composent d'un dégrilleur, d'un déssableur et de réacteur(s) anaérobie(s).

Il existe différents types de réacteurs anaérobies, avec des principes de fonctionnement différents. La station d'El Attaouia a été équipée de deux réacteurs RAFADE en série.

a) Dégrilleur

Le rôle du dégrilleur est de stopper les éléments grossiers qui sont susceptibles de se retrouver dans les eaux usées. Il s'agit principalement de déchets, plastiques ou autres, de bouts de bois, etc. Le dégrilleur, comme son nom l'indique, est constitué d'une grille dont les barreaux ont un espacement qui définit la taille des éléments retenus. C'est le premier ouvrage de la station.

b) Dessableur

Le dessableur joue un rôle primordial car il va permettre d'éliminer les particules solides en suspensions. Ces particules risquent d'endommager (érosion) ou colmater les conduites et les pompes du reste de la station. Il convient donc d'en éliminer un maximum en amont, au cours du passage dans le dessableur. Les éléments qui sont visés par le dessableur sont principalement les sables, graviers les matières lourdes qui seront éliminées par décantation naturelle (cf. plus loin). De manière générale les particules visées par cette élimination sont de taille égale ou supérieure à 200 µm. (hmf.enseeih, 2015)

Le dessableur de la station d'El Attaouia est constitué de deux chenaux qui chacun, sont munis de deux déversoirs l'un en amont l'autre en aval. Ces déversoirs sont équipés d'un batardeau qui permet de régler la hauteur d'eau ou de bloquer le passage d'eau lorsqu'une maintenance est nécessaire. (Abdelhadi, 2006)



Figure 3 : Image du dessableur de la STEP d'El Attaouia en 2005 (source : (Abdelhadi, 2006))

b) Pompe de refoulement

Comme déjà expliqué plus haut, la station est divisée en deux parties et la pompe va jouer le rôle de raccordement entre ces deux parties. Elle va donc refouler les eaux du local où se situe le déssableur jusqu'aux réacteurs anaérobies. La pompe utilisée à un moteur de 3,5 à 4 kW avec un débit de 30 l/s. (Abdelhadi, 2006)



Figure 4 : Image de la pompe de refoulement de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

c) Bassin de dissipation

Le bassin de dissipation se situe en aval des deux réacteurs et recueille les eaux usées envoyées par la pompe (station de pompage). Il a pour but, comme son nom l'indique, de dissiper l'énergie d'écoulement de l'eau (sinon création de turbulences dans les réacteurs) et de la répartir entre les deux réacteurs.

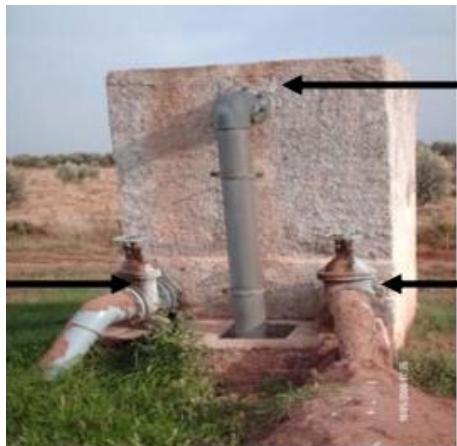


Figure 5 : Image du bassin de dissipation de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

d) Réacteur RAFADE

Les réacteurs anaérobies sont des unités de prétraitement qui visent à éliminer les MES et les matières organiques solubles des eaux usées, le tout en produisant le moins de boue possible. Le principe est d'utiliser les bactéries anaérobies pour digérer ces polluants qui seront dégradés en méthane, dioxyde de carbone et en eau. (AQUAcorp, n.d.) C'est un procédé complexe qui comprend de nombreuses réactions qui auront lieu dans le réacteur, notamment l'hydrolyse des substances organiques et la transformation de l'acétate en méthane (pour plus de détails cf. les étapes de la méthanisation)

Dans le cadre de la digestion anaérobie des eaux usées, il est conseillé d'utiliser des réacteurs à flux ascendants car cela augmente le contact entre le substrat et les bactéries anaérobies, améliorant ainsi les performances et le temps de séjour. (Hamouri, 2005)

Un point négatif des réacteurs anaérobies, est que la sédimentation des boues primaires, l'hydrolyse des substances organiques complexes et la transformation de l'acétate en méthane se déroulent en même temps et dans le même espace. Ceci a comme conséquence que le rendement de ce type d'ouvrage est faible et ne dépasse pas les 50 à 60% d'élimination de la DCO pour un temps de rétention hydraulique de 4 jours environ. (Hamouri, 2005)

- RAFADE

Le principal intérêt du réacteur RAFADE (selon Hamouri, 2005), est son faible coût, sa faible occupation du terrain, l'élimination des mauvaises odeurs, une simplicité dans sa construction et sa stabilité dans le temps. Ses principales différences avec le réacteur UASB sont : l'absence d'un décanteur intégré, d'un séparateur de phase, qu'il n'y a pas de vidanges manuelles des boues et un temps de séjour plus long (48h au lieu de 6 à 14h). (Hamouri, 2005)

Les réacteurs sont alimentés par le bas en continu et la biomasse flotte et forme un lit bactérien (couche) en suspension. Pour assurer une bonne performance des réacteurs, il convient de contrôler la concentration des boues et leur âge. Le contrôle de la concentration ou masse des boues va permettre d'assurer un contact optimal entre les bactéries et les polluants. (Hamouri,

2005) L'âge aura un impact sur l'efficacité des bactéries à dégrader les polluants. Il est obtenu via la formule :

$$As = Xr/(Xd + Xe)$$

Où As = âge des boues, Xr = masse des boues (kg MES), Xd et Xe = quantité de boues éliminée/jour et quantité éliminée dans le décanteur (kg MES/j). (Hamouri, 2005)

La production spécifique de boues est exprimée en kg de MES ou MVS par kg de DCO, de DBO ou de MES qui sont admises ou éliminées par le réacteur. (Hamouri, 2005) D'après la littérature, les réacteurs RAFADE produisent 0,22 g de MES par gramme de DCO admise ou 0,28 g MES par gramme de DCO éliminé. Le rapport MVS/MES de la boue produite est de 0,53 et la production de boue spécifique est estimée à 4 kg par personne et par an en moyenne. (Hamouri, 2005)

A noter que les RAFADE fonctionnent en mode « maximum sludge hold up », ce qui veut dire que, pour un souci de simplicité d'exploitation et pour un gain économique, la boue va s'accumuler dans le réacteur jusqu'à un maximum. Un fois le maximum atteint il faut faire passer le réacteur par une période de lessivage (washout) qui s'achève lorsque le niveau des boues est au minimum. (Hamouri, 2005)

D'après la théorie, les réacteurs RAFADE doivent être vidangés tous les 4 ou 5 ans.

L'excédent de boues qui quitte les réacteurs sera récupéré dans le décanteur qui se situe juste à la suite de ceux-ci. Les boues accumulées dans le décanteur seront alors évacuées vers les lits de séchages. (Hamouri, 2005)

NB : Dans la partie pratique, les deux types de réacteur (RAFADE et UASB) seront dimensionnés afin d'avoir une comparaison et de pouvoir choisir lequel est le plus adapté à la situation d'El Attaouia.

Dans les deux cas (RAFADE et UASB) il y a production de biogaz qu'il est possible de récupérer et de valoriser (énergie électrique, chauffage, etc.). Une condition nécessaire est que la production soit suffisante pour justifier économiquement la mise en place de ce système de valorisation



Figure 6 : Image des réacteurs RAFADE (2017)

e) Décanteur

Le rôle du décanteur est de collecter les flocs de boues qui seraient sortis des réacteurs (entrainés par les eaux de sorties). Ceci permet d'éviter de surcharger le CAHR avec des boues, ce qui augmenterait la turbidité de l'eau et donc la pénétration de la lumière dans l'eau. Or le principe du chenal algal est d'avoir une prolifération d'algues, qui pour leur croissance ont besoin de lumière (et d'utiliser les polluants comme nutriments). De plus la dégradation de ces flocs consommera de l'oxygène nécessaire pour d'autres processus.



Figure 7 : Image du décanteur de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

f) Lits de séchage des boues

Les lits de séchages sont utilisés pour faire sécher les boues afin de réduire leur volume, d'en éliminer les pathogènes, le tout avec comme objectif de les éliminer en décharge ou de les valoriser en agriculture (amendement du sol). Les boues qui alimentent ces lits sont issues du décanteur qui suit les deux réacteurs RAFADE.



Figure 8 : Image des lits de séchage des boues de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

2) Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire a comme but d'éliminer les nutriments et les pathogènes des eaux usées. Il est constitué du chenal algal à haut rendement et de bassins de maturation. C'est cette partie de la station qui a la plus grande emprise au sol.

a) Chenal algal à haut rendement (CAHR)



Figure 9 : Image du CAHR de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

Cette méthode d'épuration est basée sur l'interaction symbiotique entre les bactéries hétérotrophes et les algues produites. (Nacir et al., 2010) Le but est d'accélérer le processus d'épuration en faisant proliférer les algues afin qu'elles consomment les éléments nutritifs (matières polluantes) qu'elles utilisent dans leur processus de croissance (alimentation). C'est un traitement intéressant pour l'élimination de l'azote et du phosphore. (Nacir et al., 2010)

Pour assurer le bon fonctionnement de ce type de procédé, il convient d'assurer une agitation mécanique suffisante. Cette agitation est primordiale et présente de nombreux avantages : elle empêche l'apparition de stratification, permet une bonne répartition homogène de l'oxygène, évitant ainsi des zones d'anoxies, et, par conséquent l'oxydation des formes réduites d'azote et de soufre. (Nacir et al., 2010)



Figure 10 : Image de la roue à aubes de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

L'agitation maximise l'exposition des algues au rayons du soleil, ce qui optimise la croissance algale (conversion de l'énergie solaire en biomasse algale). Enfin le contacte entre les algues et les nutriments est favorisé ainsi que le transfert de CO₂ de l'atmosphère vers le bassin. (Nacir et al., 2010)

b) Bassins de maturation

Dans le cas de la STEP d'El Attaouia, deux bassins de maturation ont été placés en série. Le but de ces bassins est d'affiner le traitement afin de répondre aux normes d'élimination des pathogènes et de permettre une décantation des boues. (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016)

Les bassins de maturation vont permettre l'élimination de pathogènes et de nutriments (principalement par décantation des algues).

L'eau épurée est alors rejetée dans le cours d'eau après son passage dans les deux bassins de maturation.



Figure 11 : Image du bassin de maturation de la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

2.1.2.2 Dimensions de la station

Dans ce point, les dimensions des différents ouvrages de la station sont reprises sous forme d'un tableau :

	Déssableur	Puit+pompe	Bassin de dissipation	Décanteur	Chenal algal	Bassins de maturation
Longueur (m)	5	2	3	8,5	124	63
Largeur (m)	0,4	1,4	2	2,8	10	25
Hauteur (m)	0,7	4	4,6	1,7	0,5	1
Surface (m ²)	2	2,8	6	23,8	1240	1575
Volume (m ³)	1,4	11,2	27,6	40,46	3720	1575
	RAFADE 1&2					
Hauteur (m)	7					
Diamètre (m)	10					
V utile (m ³)	550					

Tableau 2: Dimensions des différentes unités de la STEP d'El Attaouia (chiffres issus de : (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016))

2.1.2.3 Performance des différentes technologies/ouvrages

Cette partie reprend les performances épuratoires théoriques des différentes unités de traitement du type de procédé RACHAHR. Lorsqu'elles existent les performances mesurées pour la STEP d'El Attaouia seront exposées. Les différents résultats obtenus lors de mesures effectuées en 2006 sont repris dans les tableaux suivants :

Point échantillonnage	DCO (mg/l)	TA %	DBO5 (mg/l)	TA %
Entrée STEP	902		356	
Effluent décanteur	720	20	288	19
Effluent CAHR	346	52	109	62
Effluent BM1	240	31	78	28
Effluent BM2	134	44	21	74

Tableau 3 : Demande chimique et biochimique en oxygène pour la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

Point échantillonnage	MES (mg/l)	TA %	MVS (mg/l)	TA %	MST (mg/l)	TA %	MVT (mg/l)	TA%	MD	TA%
Entrée STEP	300		208		1418		410		6	
Effluent prétraitement	1080	-	288	-	1576	-	492	-	12	-50
Effluent CAHR	380	64,81	100	65	1344	16,36	320	35		
Effluent BM2	60	94,44	56	44	1194	9,52	194	39	0,2	98

Tableau 4: Valeurs et taux d'abattement des matières solides pour la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

Point échantillonnage	NTK (mg/l)	TA %	N-NH4+ (mg/l)	TA %	Pt (mg/l)	TA %	P-PO4 ⁺ (mg/l)	TA %
Entrée STEP	72		54,3		7,9		7,78	
Effluent prétraitement	73	-2	47,0	13	8,7	-10	6,61	15
Effluent CAHR	72	2	45,4	4	9,4	-8	7,13	-7,8
Effluent BM1	56	22	49,3	-9	12,7	-35	8,3	-16
Effluent BM2	50	10	38,6	22	13,4	-5,5	7,6	8

Tableau 5 : Valeurs et taux d'abattement des nutriments pour la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

Point échantillonnage	valeur
Entrée STEP	$4,6 \cdot 10^8$
Effluent prétraitement	$1,8 \cdot 10^6$

Tableau 6 : Bilan des coliformes fécaux pour la STEP d'El Attaouia (source : (Abdelhadi, 2006))

1) Réacteurs RAFADE

a) DBO/DCO

Comme déjà signifié plus haut, le taux d'abattement théorique des réacteurs RAFADE, que l'on trouve dans la littérature, ne dépasse pas les 50 à 60 % de la DBO. (Hamouri, 2005) Cette faible baisse est due, selon l'auteur toujours, à une hydrodynamique déficiente, à la stratification thermale pendant la saison chaude et aux fortes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit.

Les différentes analyses réalisées sur les eaux de la station d'El Attaouia en 2006 indiquaient un taux d'abattement pour la DCO de 20% et de 19% pour la DBO₅. Cette valeur est très faible par rapport à la moyenne (par exemple le taux de la station du campus de l'IAV Hassan 2 atteint 60 % pour la DCO et 74% pour la DBO₅) (Abdelhadi, 2006)

NB : On peut donc voir que déjà en 2006 les réacteurs et le décanteur ne remplissaient pas leur rôle et étaient en état de dysfonctionnement.

b) Pathogènes

D'après (Hamouri, 2005) on peut observer un taux d'élimination de 1,7 Unité Log dans les réacteurs et dans le filtre à gravier combinés. Les pathogènes vont être piégés (adsorbés) dans les flocs ou des bactéries seules et être emportés lors de la décantation. Enfin les coliformes fécaux seront retenus sur le filtre à gravier. (Hamouri, 2005)

Les réacteurs permettent également d'éliminer les œufs d'helminthes. Ceux-ci seront retenus dans le lit de boue des réacteurs.

Le filtre à gravier retient également une partie de ces œufs et à la sortie, ils ne sont plus détectés. (Hamouri, 2005) A noter que la station d'El Attaouia n'est pas équipée d'un filtre à gravier.

Pour la STEP d'El Attaouia, les coliformes fécaux ont été mesurés à l'entrée de la station et à la sortie du décanteur. On peut voir un taux d'abattement de 39%. (cf. tableaux ci-dessus)

2) CAHR

a) Nutriments

D'après la littérature, le chenal algal à haut rendement permet, d'éliminer 89% de l'azote ammoniacale (N-NH_4^+) et 59% des orthophosphates (P-PO_4^{3-}) avec des concentrations résiduelles de 7 et 2,4 mg/l respectivement. (Hamouri, 2005) Parallèlement à cette baisse on constate une hausse (double) des concentrations des MES et MVS. Cette augmentation peut être mise en lien avec l'augmentation des populations d'algues dans le chenal, qui utilisent ces deux nutriments pour leur croissance. (Hamouri, 2005)

D'après (Hamouri, 2005) toujours, les mécanismes de l'élimination du N et P ainsi que la croissance algale vont modifier les conditions physico-chimiques de l'eau, ce qui diminuera la survie des pathogènes bactériens.

- L'azote

La figure suivante reprend le bilan azote dans le CAHR :

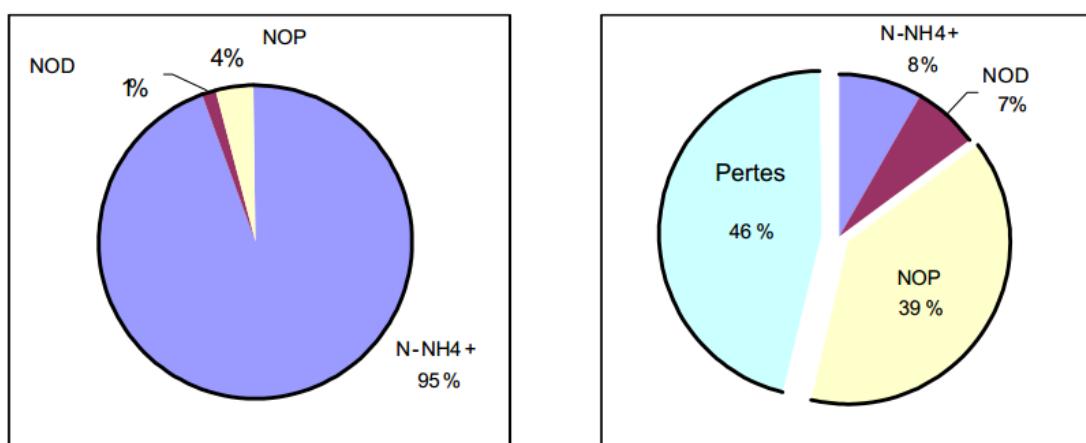


Figure 12: Bilan d'azote dans le CAHR avec à gauche l'entrée et à droite, la sortie du chenal algal (source : (Hamouri, 2005))
(NOD : azote organique dissous et NOP : azote organique particulaire)

On constate que la forme dominante de l'azote à l'entrée du CAHR est l'ammonium (95% de l'azote totale de l'influent). D'après (Hamouri, 2005), ceci témoigne d'une bonne minéralisation dans les réacteurs anaérobies.

On constate une diminution jusqu'à 8% entre l'entrée et la sortie, avec 39% qui sera immobilisé par la biomasse et 46% perdu par volatilisation dans l'atmosphère.

NB : la volatilisation a lieu lorsque la forme ammoniacale (NH_3) est dominante. La transformation du NH_4^+ en NH_3 est dépendante du pH et de la température de l'eau. La forme NH_4^+ est dominante à un pH = 8 et NH_3 est dominant lorsque le pH = 11. (Hamouri, 2005) Dans la littérature on peut voir que la concentration en NH_3 est multiplié par 10 à chaque augmentation d'une unité de pH et multiplié par 2 pour toute augmentation de 10 °C. (Hamouri, 2005)

La station d'El Attaouia à un taux d'abattement du NH_4 très faible en 2006, à savoir 4%. Les raisons de ces très faibles valeurs ne sont pas précisées, mais indiquent clairement un dysfonctionnement de l'ouvrage.

- **Phosphore**

La figure suivante reprend l'évolution du phosphore dans le CAHR :

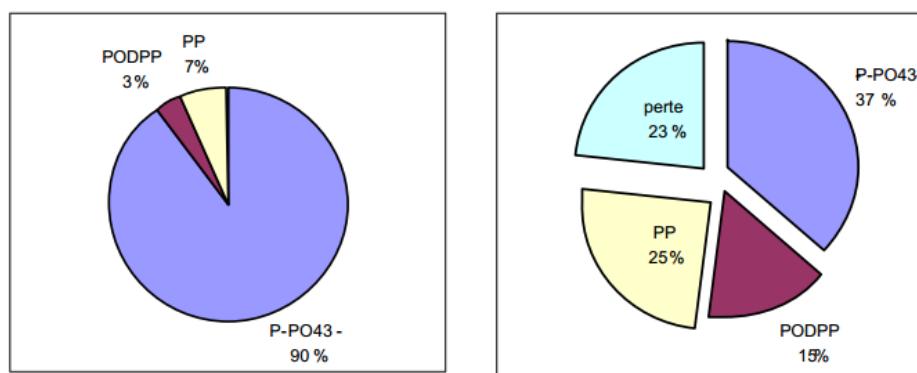


Figure 13: Bilan du phosphore dans le CAHR conduit comme unité de traitement tertiaire avec à gauche l'entrée et à droite la sortie du CAHR (source : (Hamouri, 2005)) (pp : p particulaire, PODPP : P organique dissous, PO₄³⁻ : polyphosphates)

On voit sur le graphique de gauche que le phosphore se trouve à 90% sous la forme PO_4^{3-} à l'entrée du chenal. A la sortie du chenal (graphique de droite), la forme PO_4^{3-} représente 37% du phosphore. La fraction prélevée par les plantes pour leur croissance s'élève à 25% et 23% du phosphore va se précipiter sous forme de sels de phosphate sous l'effet d'un pH élevé. (Hamouri, 2005) L'élimination du phosphore est donc moindre que celle du nitrate dans le CAHR.

Pour la station d'El Attaouia les taux d'abattements mesurés et repris dans le tableau ci-dessus indiquent un pourcentage négatif, soit -8%. Ceci indique encore une fois la présence d'un dysfonctionnement.

b) Pathogènes

Le CAHR permet une réduction des coliformes fécaux dans l'eau. La baisse de ces pathogènes dépend de différents mécanismes, dont les variations des valeurs extrêmes du pH et de la concentration en oxygène dissous entre le jour et la nuit. Ces variations sont induites par l'activité photosynthétique des algues et vont causer une fragilisation des coliformes fécaux, affectant leur survie. (Hamouri, 2005)

3) Bassin de maturation

Le tableau ci-dessous reprend le rôle et les performances (théoriques) du bassin de maturation :

Paramètre	Influent	Effluent	TE (%)
DCO (mg/l)	250	170	32
DBO ₅ (mg/l)	35	25	28.5
MES (mg/l)	115	115	
NTK (mg/l)	8,3	6	28
P total (mg/l)	2,7	2,4	10
CF (log ₁₀ /100 ml)	2,7E+04	2,4E+03	1,05*

TE : taux d'élimination ; TE en Log10.

Tableau 7: Rôle et performances du bassin de maturation (source : (Hamouri, 2005))

a) Charge organique

Le bassin agit comme une unité de traitement tertiaire où environ, 30% de la DBO₅, de la DCO et de l'azote total sont éliminés. D'après (Hamouri, 2005) cette baisse est principalement due à la sédimentation des algues.

NB : La concentration en algues de l'effluent sortant du bassin de maturation, n'a pas un effet de pollution immédiat sur le cours d'eau récepteur. (Hamouri, 2005) Il y a même une oxygénation des eaux grâce aux algues, qui servira comme aliment de base pour la chaîne alimentaire. Dans le cas où l'eau épurée est utilisée pour l'irrigation, les algues représentent une source d'humus qui améliorent les caractéristiques agronomiques du sol. (Hamouri, 2005)

Les résultats pour la stations d'El Attaouia en 2006 sont négatifs pour le taux d'abattement des nutriments. Par contre le taux d'abattement des MES vaut 94% et celui des MVS, 56%.

b) Les pathogènes

Le bassin de maturation participent également à l'élimination des coliformes fécaux de l'ordre de 1 Unité Log. (Hamouri, 2005) A noter qu'en comparaison aux performances d'élimination des RAFADE et du CAHR, les bassins reçoivent une charge beaucoup plus faible en coliformes que les deux ouvrages précédents. Le bassin de maturation est donc une composante très importante pour la désinfection de l'eau. (Hamouri, 2005) Les mécanismes qui régissent l'élimination de ces pathogènes sont fortement identiques à ceux qui s'opèrent dans le CAHR.

2.1.3. Cause de l'arrêt de la STEP

En 2008 la station a été mise à l'arrêt suite à différents dysfonctionnements. Depuis ce jour la station ne fonctionne plus et les eaux usées sont déviées et rejetées sans le moindre traitement dans le cours d'eau passant à proximité de la station. Cette eau est utilisée par les agriculteurs pour l'irrigation (oliviers principalement mais aussi cultures céréalier), avec des risques sanitaires élevés, surtout pour les cultures céréalier. La principale raison de la mise à l'arrêt de la STEP est que les réacteurs étaient saturés et nécessitaient une vidange (un curage est prévu tous 4-5 ans). Les raisons pour lesquelles le curage n'a pas été effectué me sont inconnues, mais une piste pourrait être le manque de moyens financiers ou d'entreprises spécialisées dans ce type de curage.

Mais comme il a été constaté plus haut, des dysfonctionnements ont déjà été observés dès 2006. De nombreux auteurs pointent le sous-dimensionnement de la station comme cause principale de son dysfonctionnement. Ainsi (Abdelhadi, 2006) explique que la commune a connu une forte croissance démographique dans les années précédant l'étude (2006).

Cette croissance supérieure à la moyenne nationale est principalement urbaine. Les rejets urbains ont donc fortement augmenté, dépassant rapidement les capacités d'accueil de certains ouvrages de la station menant à une baisse des performances épuratoires et donc à une diminution de la qualité du rejet final. (Abdelhadi, 2006)

C'est pour cette raison qu'une extension a été construite en 2012, à côté de la première partie.



Figure 14 : Image aérienne de l'extension de la STEP d'El Attaouia (source : Google maps)

L'extension ayant été construite 4 ans après l'arrêt total de la station, elle n'a jamais servi. Malgré cela de nombreux dysfonctionnements ont été constatés par l'étude réalisée par (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016)

L'extension comprend deux nouveaux réacteurs RAFADE, un décanteur, un filtre à gravier et des lits de séchage des boues.

NB : Cette partie a été construite dans l'espoir que la station principale sera réhabilitée, remise en état. Ceci sera déterminé par l'étude qui suit, mais compte tenu de l'état avancé de dégradation des différents ouvrages et des coûts très élevés qui y seront liés, cela n'est pas une certitude. En effet, il semblerait peut-être plus judicieux de repartir, pour la plupart des ouvrages, à zéro plutôt que sur des bases bancales. Rien ne garantit qu'une fois la partie principale réhabilitée (curage des réacteurs, réparation des murs fissurés, changements de la membrane, etc.) des problèmes similaires ne réapparaîtront pas dans 5 ans. L'option, tout recommencer, pour mettre toute les chances de notre côté, me semble à ce stade du travail être la plus réaliste et la plus sûre.

La station étant à l'abandon depuis 2008 toutes les structures se sont fortement détériorées et la plupart des ouvrages ne sont plus du tout opérationnels. On peut par exemple constater des fissures dans le béton au niveau du décanteur et du bassin de dissipation (surtout au niveau des tuyaux).



Figure 15 : Image de la dégradation du décanteur de la STEP d'El Attaouia (source : (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016))

Le chenal algal à haut rendement est fortement dégradé et inutilisable car sa géomembrane (partie imperméable du chenal) est remplie de trous (plus de 424 comptés) causés par des pierres se trouvant en dessous de la membrane et l'ayant percée sous le poids de l'eau, de tirs de chevrotines ou d'arbustes poussant sous celle-ci.



Figure 16 : Trous dans la géomembrane du CAHR (2017)

De plus, la géomembrane n'est plus tendue, et présente de nombreux bourrelets qui pourraient faire stagner l'eau, créer des zones mortes et ainsi diminuer les performances épuratoires du CAHR.



Figure 17 : Plis dans la géomembrane du CAHR (2017)

On peut également constater de nombreuses déchirures (plusieurs mètres) au niveau des tournant dans le chenal ainsi qu'à chaque muret qui sépare les chenaux entre eux.



Figure 18 : Déchirures dans la géomembrane du CAHR de la STEP d'El Attaouia (2017)



Figure 19 : Apparition de végétaux aux endroits des déchirures (2017)

Ensuite la première partie de la STEP, la station de pompage, est dans un état de délabrement total. La pompe est immergée depuis 2008 dans le puits et n'est bien entendu plus utilisable. Ensuite le dessableur est totalement inondé, rempli de débris végétaux et présente des signes d'anoxies (bulles).



Figure 20 : Image des déchets verts dans le dessableur et bulles à la surface (2017)

Cette partie étant située dans un bâtiment (mur), le curage de ces deux éléments risque d'être très complexe à mettre en œuvre.

Une cause sous-jacente au dysfonctionnement de la STEP, est le manque d'entretien et de suivi de la station. Il n'y avait également pas eu une planification de la part des autorités pour avoir les fonds nécessaires au moment opportun, lorsque que le curage était nécessaire.

III. Partie pratique

3.1. Réhabilitation de la STEP

Comme nous l'avons vu plus haut, depuis 2008 les eaux usées de la station sont déviées et rejetées sans aucun traitement dans le cours d'eau. La commune d'El Attaouia a donc contacté l'équipe de l'Ulg Arlon environnement (section eaux) pour demander de l'aide pour la rédaction du cahier des charges en vue d'obtenir un financement de la part du ministère marocain.

Cette étude doit porter une attention toute particulière sur l'aspect économique. En effet la réhabilitation doit avoir le coût le moins élevé possible, le tout en permettant bien entendu d'atteindre les objectifs de qualités des eaux épurées.

Ceci est aussi bien valable pour le coût de mise en œuvre de la réhabilitation, que pour les coûts de fonctionnement de l'unité (énergétique, entretien, etc.).

Un autre point important, est que l'entretien de la station ne doit pas être trop complexe à effectuer.

Pour s'assurer du bon fonctionnement de la station dans la durée, il est nécessaire de former l'opérateur responsable, afin qu'il puisse effectuer les tâches quotidiennes requises mais qu'il puisse également constater rapidement une anomalie et alerter ou demander conseil à des personnes plus qualifiées.

Cette partie pratique va explorer différentes pistes pour réhabiliter la station d'El Attaouia pour qu'elle puisse traiter les eaux usées jusqu'à l'année 2030 au moins.

NB : Le coût économique n'apparaîtra pas dans ce travail car il nécessite le travail d'une personne qualifiée dans la construction et dans l'évaluation du prix des différents ouvrages. (ingénieur en construction)

La station sera organisée de telle manière qu'il ne soit pas nécessaire d'utiliser une pompe. L'écoulement devra se faire de manière gravitaire tout au long de la station. Ne disposant pas des qualifications (ingénieur) pour effectuer ce travail, il devra être fait ultérieurement, en même temps que le coût économique.

3.1.1. Dimensionnement des différentes unités de traitement

3.1.1.1. Prétraitement

Comme déjà évoqué plus haut dans la partie théorique, le prétraitement joue un rôle primordial dans le bon fonctionnement du traitement tertiaire (chenal algal) et donc des performances épuratoires de la station. Il convient donc de bien dimensionner les différents éléments qui le composent.

1) Dégrilleur

a) Rôle du dégrilleur

Comme déjà expliqué plus haut, le dégrilleur est la première unité de la station d'épuration. Son rôle est de stopper les fractions les plus grossières (plastique, pierre, déchets en tout genre, etc.) susceptibles de gêner/compromettre le bon fonctionnement des traitements qui sont en aval ou d'endommager ou boucher les conduites.

Un autre problème propre aux matières plastiques, est leur non biodégradabilité ce qui pose problème dans le cas d'une valorisation des boues (épandages). Si des plastiques sont présents dans les boues, il est fortement déconseillé de les valoriser en agriculture car cela revient à les disséminer dans l'environnement.

b) Dimensionnement

Avant de le dimensionner, il faut choisir le type de dégrilleur car les données ne seront pas les mêmes pour les calculs. Il existe deux types de dégrilleur, manuel ou automatique. Ces termes font référence à la manière dont les grilles sont nettoyées. Les manuelles nécessitent l'intervention d'un technicien qui vient avec une fourche ou d'un râteau pour enlever les déchets qui s'y sont accumulés. Ce lavage doit se faire quotidiennement afin d'éviter un colmatage au niveau de la grille. Pour le dégrilleur mécanique, c'est un peigne actionné par un moteur, qui passe à une certaine fréquence sur la grille pour la débarrasser des différents déchets présents. Bien que le dégrilleur mécanique permette d'éviter l'intervention quotidienne d'un technicien, le manuel semble, dans notre cas, être le plus intéressant car moins coûteux à l'achat et pour le fonctionnement (électricité pour le moteur).

Une autre caractéristique qu'il faut prendre en compte lors du dimensionnement est l'espacement entre les barreaux qui composent la grille. L'espacement définit la fraction qui sera retenue par l'ouvrage. Plus il est faible, plus d'éléments potentiellement dommageables seront retenus mais plus plus le risque de colmatage sera élevé, nécessitant un nettoyage plus fréquent par le technicien.

De manière générale, un dégrilleur à nettoyage manuel présente les dimensions suivantes : un espacement entre les barreaux de 2,5 cm et une inclinaison de 60° à 80° sur l'horizontale. (UVED, 2013)

1) Surface du dégrilleur

Afin de connaître la surface minimale du dégrilleur, on peut s'aider de la formule suivante :

$$S = \frac{Q_{max} \left(\frac{m^3}{s} \right)}{V.O.C}$$

Où, Qmax = débit maximum passant par la grille, V = la vitesse de l'influent qui permet une bonne élimination des déchets tout en évitant la sédimentation (éléments restent collés à la grille), O = coefficient de vide et C = coefficient de colmatage de la grille.

- **Le débit max (Q)**

Pour rappel les débits utilisés pour les calculs sont issus des estimations faites pour 2030 (sur base de la population et les EH). Le débit maximum obtenu est égal à 361,71 m³/h, soit **0,10 m³/s**.

- **Le coefficient de vide (O)**

Il est égal au rapport entre espace libre entre les barreaux (e) et la somme de l'espace libre entre les barreaux et leur épaisseur (E) et déterminé via la formule suivante :

$$O = \left(\frac{e}{e+E} \right)$$

Il faut donc déterminer l'espace libre entre les barreaux (e) et l'espacement entre les barreaux. Un espacement de 10 mm entre les barreaux semble être un bon compromis entre niveau d'élimination et fréquence de curage nécessaire de l'ouvrage. L'épaisseur de chaque barreau est fixée à 10 mm. Le coefficient de vide du dégrilleur ainsi obtenu est égal à **0,50** m.

- **La vitesse (V)**

La vitesse à travers la grille doit être suffisante pour obtenir l'application des matières sur la grille sans pour autant avoir une trop grosse perte de charge ni un colmatage. (Piroton, 2012a)

Il est conseillé, dans la littérature, d'utiliser pour le dimensionnement une vitesse de **1,2** m/s pour dégrilleur à nettoyage manuel. (UVED, 2013)

- **Coefficient de colmatage (C)**

Pour terminer, le coefficient de colmatage est choisi à partir de valeurs trouvées dans la littérature, qui varient entre 0,10 et 0,30 pour dégrilleurs manuels. Le coefficient utilisé pour El Attaouia est fixé à **0,25**.

Tous les termes étant trouvés, il est maintenant possible de calculer la surface requise pour le dégrilleur. La surface minimale du dégrilleur doit faire **0,84** m².

2) Largeur de la grille

Une fois la surface du dégrilleur trouvée, il est également nécessaire de déterminer sa largeur minimale. Afin de la déterminer, il faut tout d'abord connaître la longueur oblique mouillée (L_0), qui est obtenue à l'aide de la formule suivante :

$$L_0 = \frac{t}{\sin(\alpha)}$$

Où α = l'inclinaison de la grille

t = le tirant d'eau (partie immergée de la grille)

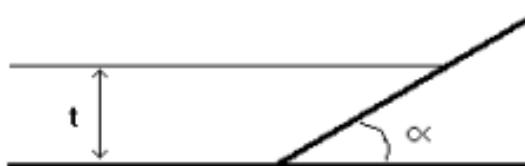


Figure 21: Illustration des données nécessaires pour calculer la largeur du dégrilleur (source : (Sadowski, 2006)

A défaut d'avoir des calculs plus précis, le tirant d'eau est généralement compris entre 0,2 et 0,4 pour les dégrilleurs manuels. (hmf.enseeht.fr, n.d.)

L'alpha (l'angle d'inclinaison de la grille) a été fixé arbitrairement à 30° (selon (UVED, 2013) il est conseillé d'avoir une inclinaison entre 40° et 20° pour les grilles manuelles).

La largeur oblique mouillée ainsi obtenue est égale à **0,80** m.

La largeur minimale que le dégrilleur doit avoir peut alors être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$l = \frac{S}{L_0}$$

Où, S = la surface calculée au point précédent et L_0 = la largeur oblique mouillée.

Le dégrilleur doit avoir une largeur de **1 m**.

3) Canal de by-pass

Il est préférable de prévoir un canal de by-pass, qui permet de contourner le dégrilleur, en cas le colmatage du dégrilleur et éviter une inondation dans cette partie de la STEP mais également qu'il n'y ait pas une interruption trop importante du débit qui alimente les réacteurs.

c) Perte de charge

La perte de charge lors du passage de l'eau à travers le dégrilleur comme il a été dimensionné, peut être estimé via la formule suivante :

$$\Delta H = \beta \times \left(\frac{E}{e}\right)^{4/3} \times \frac{(v_{max})^2}{2g} \times \sin(\alpha)$$

V_{max} , E , e et g sont connus (cf. les formules précédentes), reste le β , le facteur de forme. D'après (hmf.enseeih, 2015), le facteur de forme pour un canal rectiligne vaut 2,42. La perte de charge est égale à **88,81** mm. Cette valeur est inférieure à la perte de charge permise de 150 mm. A noter que le colmatage augmente la perte de charge, d'où la nécessité de nettoyer la grille régulièrement. (hmf.enseeih, 2015)

d) Résumé des dimensions du dégrilleur

Le tableau ci-dessous reprend les différentes dimensions du dégrilleur de la station d'El Attaouia :

Hauteur (m)	Surface (m ²)	Largeur (m)
0,8	0,8	1

Tableau 8: Dimensions du dégrilleur de la STEP d'El Attaouia

2) Dessableur

a) Rôle

Le dessableur vise l'élimination de particules solides dont la taille est supérieure à 200 µm.

(hmf.enseeih, 2015)

Pour qu'elles soient éliminées, il faut que l'eau s'écoule dans le décanteur à une vitesse permettant le dépôt de ces solides, c'est-à-dire que la vitesse d'entrainement (ascendante) soit plus faible que la vitesse de chute de ces particules (gravité). (hmf.enseeih, 2015; Zouhir & Jupsin, 2016a)

Il faut forcer l'eau à adopter une certaine vitesse en jouant sur les dimensions de l'ouvrage.

A noter qu'ici il s'agit de sédimentation discontinue, les particules sont isolées et n'interagissent pas entre elles, elles sédimentent indépendamment les unes des autres. (Piroton, 2012b)

Afin d'éviter la décantation des matières volatiles en suspension (MVS), non visée par ce « traitement », il convient de maintenir une vitesse de l'effluent entre 0,3 et 0,6 m/s. (hmf.enseeih, 2015)

NB : Comme évoqué plus haut, le dessableur de la station d'El Attaouia est en très mauvais état (rempli avec signes d'anoxie) et qu'un curage est nécessaire. Mais il a été constaté sur le terrain que le dessableur a été placé dans le bâtiment renfermant la station de pompage.

Outre l'état général très dégradé, un curage semble être une tâche très difficilement réalisable car l'ouvrage est difficile d'accès (entouré de mur de 2-3 m). Il serait donc plus judicieux, plutôt que d'investir dans la réhabilitation de l'ancien dessableur de construire un autre qui sera mieux adapté et plus facile à curer.

b) Dimensionnement du dessableur

Il faut donc déterminer la surface, le volume, la hauteur, la largeur et la longueur du dessableur afin que l'eau atteigne une certaine vitesse permettant la sédimentation de particules solides qui ont une granulométrie supérieure à celle visée par l'ouvrage. (Piroton, 2012b)

Dans le cas de la STEP d'El Attaouia, il faut opter pour un dessableur qui soit facilement curable et adapté à la situation.

1) Vitesse de chute (V0)

La première étape du dimensionnement du dessableur est de choisir le diamètre des particules qui y doivent être éliminées. Une fois le diamètre choisi, il faut en déterminer la vitesse limite de chute (V0). La vitesse de chute des particules en mouvement laminaire peut être obtenue grâce à la loi de Strockes et la formule suivante :

$$V0 = \frac{gd^2(\rho_s - \rho_l)}{18\mu}$$

Où d = le diamètre des particules, ρ_s = masse volumique du solide, ρ_l = masse volumique de l'air et μ =viscosité du fluide (varie en fonction de la température).

Le dessableur de la station d'El Attaouia, sera conçu pour éliminer des eaux usées des particules de sable fin d'un diamètre de 0,2 mm. En d'autres termes toutes les particules d'un diamètre égal ou supérieur seront retenues dans le dessableur.

La masse volumique du sable est connue et vaut : $\rho_s = 1600 \text{ kg/m}^3$, à une température de 20 °C. (TriMatic, n.d.)

La viscosité dynamique de l'eau à une température de 20°C et à une pression de 1 atm est de $1,00 \times 10^{-3} \text{ Pa.s.}$ (Wikipédia, n.d.)

La résolution de l'équation nous donne une vitesse de chute de **0,01308 m/s.**

La vitesse de chute pour les particules visées étant connue, il est maintenant possible de calculer les différentes dimensions du bassin. Les formules utilisées pour les calculs sont des formules basées sur le décanteur idéal de Hazen. Ces décanteurs respectent les hypothèses suivantes (Piroton, 2012b) :

- ✓ Toutes les particules sont indépendantes et tombent à la vitesse V0
- ✓ Il n'y a pas de turbulence, ni flocculation, ni courant
- ✓ Pas de perturbation thermique
- ✓ L'écoulement est laminaire partout
- ✓ Il n'y a pas de remise en suspension
- ✓ La loi de stokes reste valable si on passe d'une sédimentation statique à dynamique

Pour être éliminée, la particule doit donc parcourir la hauteur du dessableur en un temps ts , ts étant le temps de séjour de la particule dans celui-ci. (Piroton, 2012b; SCRIBD, 2011) La vitesse doit donc être égale à :

$$V = h/ts.$$

2) Forme du dessableur

Le dessableur peut soit être de forme cylindro-conique, soit de forme rectangulaire. Le plus souvent, ils sont sous la forme cylindro-conique car cette forme correspond à un optimum d'utilisation des volumes disponibles et favorise la décantation des sables. (hmf.enseeiht, 2015)

La base de ce type de dessableur est donc en forme de cône, ce qui permet de rassembler les sables, de les stocker et de les épaisseur. Leur évacuation se fait via une pompe.

La forme rectangulaire a comme avantage de permettre la réduction de la hauteur du dessableur et donc des volumes morts, par rapport aux cylindro-coniques. (hmf.enseeht, 2015) Dans ce cas-là, le nettoyage/le curage des sables se fait manuellement. Il est conseillé de construire deux dessableurs de mêmes dimensions afin de pouvoir curer l'un pendant que l'autre est en fonctionnement.

Le choix du dessableur d'El Attaouia se porte plutôt sur la forme rectangulaire le curage n'est pas compliqué et permet d'éviter un coût supplémentaire en électricité.

NB : ce choix est personnel et non définitif, la forme cylindro-conique reste une option valable. Il n'y a que l'aspect économique qui a influencé ce choix.

3) Surface horizontale du dessableur(aire)

La surface du décanteur va être donnée par la formule (Piroton, 2012b) :

$$CH = \frac{Q}{A}$$

On appelle CH, la charge hydraulique ou vitesse ascensionnelle et elle correspond au rapport du débit maximum/jour mesuré (m^3/h) sur l'aire projetée (m^2). (Piroton, 2012b)

La charge hydraulique s'exprime en m/h et toutes les particules qui ont une vitesse de sédimentation qui lui est supérieure seront éliminées dans le dessableur. (Piroton, 2012b)

En utilisant la vitesse de chute calculée précédemment (pour éliminer les particules supérieures à 0,2 mm) et le débit maximum de 0,10 m^3/s (valeurs théoriques issues de (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016) pour 2030) on obtient :

$$A = \frac{0,10}{0,01308} = 0,33 \text{ m}^2$$

Cette aire, donne la surface **minimale** que le dessableur doit avoir pour éliminer les particules de 200 μm et plus. Dans la pratique on ajoute souvent 1 à 2 unités pour augmenter les chances de capture. (SCRIBD, 2011)

4) Hauteur du dessableur

La **hauteur** de l'ouvrage est fixée à **30** centimètres. Il faut que la particule parcoure cette hauteur endéans son temps de séjour au sein de l'ouvrage pour être éliminée de l'effluent.

5) Longueur et largeur

Pour déterminer la largeur, il suffit de diviser la surface de l'ouvrage par sa hauteur. On obtient alors une largeur de **1,1** m. La largeur est un paramètre important du dessableur car elle influence la vitesse de l'eau dans celui-ci.

Avec la largeur et l'aire connus, la longueur est facile à trouver (aire = longueur * largeur). Le dessableur de la STEP d'El Attaouia, doit avoir une longueur de **7** m.

6) Le temps de séjour

Pour connaître le temps de séjour qu'aura l'eau dans l'ouvrage, il faut diviser la vitesse de chute des particules que l'on souhaite éliminer par la hauteur (H). L'eau restera 23 secondes dans le dessableur.

7) Résumé des dimensions

Le tableau ci-dessous reprend les différentes dimensions du dessableur de la STEP d'El Attaouia :

S (m ²)	Hauteur (m)	Largeur (m)	T _s (s)	Longueur (m)
0,33	0,30	1,1	23	7

Tableau 9 : Résumé du dessableur de la STEP d'El Attaouia

c) Règles pour la construction

Pour rappel, les valeurs trouvées ci-dessous sont les dimensions minimales que devra avoir le dessableur pour éliminer les particules de 200 µm et plus. Par sécurité, il est donc conseillé de construire l'ouvrage avec une ou deux unités supplémentaires (surdimensionner). (SCRIBD, 2011)

Pour les raisons expliquées plus haut, il convient également de construire deux dessableurs identiques placés côté à côté et séparés par une vanne. Lors de l'évaluation du coût de la STEP, il faut le prendre en compte.

Pour réduire la vitesse dans le dessableur, il est courant de le construire comme illustré dans le schéma suivant :

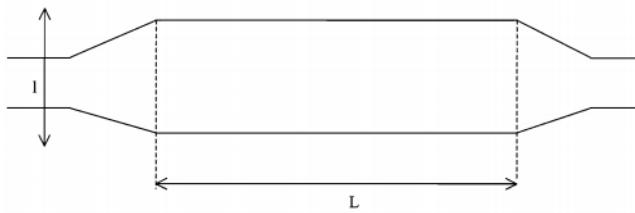


Figure 22 : Schéma d'un dessableur (source : (Sy & Tall, 2003))

3) Réacteurs anaérobies

a) Rôle

Les réacteurs anaérobies font donc partie du prétraitement et jouent un rôle important. Ils ont pour but d'éliminer les MES et les matières organiques solubles des eaux usées, le tout en produisant le moins de boue possible. (AQUACorp, n.d.)

Il existe différents types de réacteurs, le plus connu et plus performant étant l'UASB. Dans le cadre de cette étude, deux réacteurs ont été sélectionnés : Le RAFADE et l'UASB. Le RAFADE a été choisi car c'est le réacteur qui est installé actuellement à la STEP d'El Attaouia et parce que c'est un réacteur peu cher et facile d'utilisation.

L'UASB quant à lui, est plus cher et plus complexe dans sa gestion, mais il est plus performant. La principale différence entre ces deux réacteurs est que pour l'UASB l'opérateur doit intervenir pour maintenir une concentration optimale des boues dans le réacteur. (Hamouri, 2005) Il va décider de la fréquence, de la quantité et de la profondeur du prélèvement des boues. Les réacteurs RAFADE fonctionnent en mode « maximum sludge hold up » (cf. plus haut) et sont dépourvus d'un système de collecte des boues. Ceci a comme conséquence qu'il faut réaliser une vidange tous les 4-5 ans. L'UASB est lui muni d'un décanteur intégré, séparateur de phase, et les boues ont un temps de séjour plus court (de 6 à 14h). (Hamouri, 2005)

Les RAFADE

a) Principes de fonctionnement

Réacteurs anaérobies à flux ascendant et à deux étapes (RAFADE), sont constitués de deux unités couvertes qui sont soit de forme cylindrique soit de forme rectangulaire.

Ils sont idéalement placés en série, ce qui permet d'atténuer les effets négatifs de la phase de fermentation méthanogénique et d'augmenter les performances de la dégradation de la matière organique en méthane. (KPELI & CAMARA, 2010) Dans le premier réacteur on retrouvera principalement les phases de l'hydrolyse et de fermentation acide (acidogène et acétogène) de la matière organique. Dans le second, la fermentation méthanogénique aura lieu. (KPELI & CAMARA, 2010)

Si les réacteurs sont placés en parallèles, toutes les phases (hydrolyse, méthanisation, etc.) vont se dérouler en même temps et dans le même espace, ne permettant pas d'obtenir des performances supérieures à 50 -60% d'élimination de la DCO pour un temps de séjour hydraulique de 4 jours environ. (Hamouri, 2005)

Un atout des réacteur anaérobies, est la production de biogaz (méthane) qui peut être collecté et valorisé. D'après la littérature, la composition du biogaz produit dans les réacteurs RAFADE, est : 77% de méthane, 14% d'azote, 2% de dioxyde de carbone et des traces de H₂S. (KPELI & CAMARA, 2010) Le méthane peut être utilisé pour la production d'électricité par exemple. La production théorique de biogaz sera traitée plus bas.

b) Performances

Les performances des réacteurs anaérobies peuvent être calculées avec la relation empirique :

$$E = 1 - \frac{Ce}{Ci} = 1 - C1 \text{ (TRH)} - C2$$

Où, E = taux d'élimination de la DCO (%), Ce = concentration de l'effluent en DCO, Ci = Concentration de l'influent en DCO et C1 et C2 = constantes empiriques.

La performance de traitement dépend principalement du temps de séjour hydraulique. Pour les RAFADE, il est possible théoriquement d'atteindre les 80% d'efficacité pour des températures supérieures à 20 °C, si le temps de rétention hydraulique est de 45 heures. (KPELI & CAMARA, 2010)

La performance des réacteurs s'exprime par un taux d'abattement d'un paramètre de pollution de l'eau, par exemple la DCO. Celle -ci peut être obtenue via l'équation suivante (KPELI & CAMARA, 2010)

Du côté de la littérature, les données issues d'expérimentations menées au Maroc, rapportent des performances qui sont relativement faibles, ne dépassant pas les 50 à 60% de réduction de la DBO. (Hamouri, 2005)

On trouve également dans la littérature que pour atteindre un rendement d'élimination de la DCO de 80%, un temps de rétention hydraulique de 45 heures est requis.

Les performances utilisées pour le dimensionnement (au point suivant) sont celles observées dans les RAFADE de l'IAV. Elle est de 55% dans les R1 (premiers réacteurs des deux en série) et de 25% dans les R2.

c) Dimensionnement

Cette partie va permettre de calculer les dimensions des réacteurs RAFADE nécessaires pour traiter les eaux usées entrant dans la station d'El Attaouia.

Le paramètre clef dans le dimensionnement des réacteurs est le temps de rétention hydraulique. C'est ce TRH qui aura une influence directe sur la performance des RAFADE. Ce temps de séjour va être déterminé via le volume du réacteur.

1) Volume du réacteur

Le volume est le principal paramètre de dimensionnement du réacteur car il détermine le temps de séjour de l'eau. Le TRH théorique dans un réacteur RAFADE est de 45 h (pour atteindre un taux d'abattement théorique de 80%)

Le volume peut être calculé par la formule suivante (Abdelhadi, 2006) :

$$V = Q \times TRH$$

Où, Q = débit moyen (m³/h) et TRH = Temps de rétention hydraulique.

Pour la STEP d'El Attaouia, le débit quotidien moyen utilisé dans la formule sera, à nouveau, celui des projections pour l'année 2030, à savoir 196,78 m³/h.

Il reste à déterminer le temps de rétention hydraulique (TRH). Il est calculé via l'approche basée sur la constante cinétique de premier ordre de dégradation. (Abdelhadi, 2006)

La constante cinétique de premier ordre de dégradation de la DCO, peut être déterminée en utilisant la formule suivante :

$$\frac{Ci}{Ce} = e^{(-K \times TRH)}$$

Où, Ci = concentration d'entrée, Ce = concentration de sortie et TRH = temps de rétention hydraulique.

Cette constante traduit l'activité des bactéries des réacteurs qui dégradent la matière organique afin d'en tirer l'énergie nécessaire pour le maintien de la colonie et sa croissance. (Abdelhadi, 2006)

Mais dans le cas de cette étude, c'est le TRH qui est recherché. Pour le calculer, il faut l'isoler et la formule devient alors :

$$TRH = (\ln \left(\frac{Ci}{Ce} \right) / K) / 24$$

Il est donc nécessaire, pour la résolution de l'équation, de trouver Ci, Ce et le K.

Pour rappel, il est conseillé de placer deux RAFADE en séries (deux à deux) pour assurer un meilleur rendement épuratoire. Il faudra donc calculer le TRH, pour les deux réacteurs séparément, car les conditions ne sont pas les mêmes dans les deux réacteurs. En effet la charge entrante dans le premier réacteur n'est pas la même que celle arrivant dans le second (moins de charge dans le second). Les valeurs de Ci, Ce et K seront différentes pour les deux réacteurs placés en série.

Pour les K, les valeurs utilisées proviennent des tests de traçage effectués à la station de l'IAV (grandeur de références). Pour le premier réacteur la constante cinétique de dégradation est égale à 0,93 K(J⁻¹) et pour le second égale à 0,33 K(J⁻¹). (Abdelhadi, 2006) Ce sont donc ces deux valeurs qui seront utilisées pour les calculs.

La Ci est la concentration de la DCO à l'entrée du réacteur. Dans le cas d'El Attaouia, elle est estimée pour 2030 en multipliant la concentration DCO qui correspond à EH marocain (68 kg O₂/j) par la projection de la population pour cette année (52475). La Ci ainsi obtenue s'élève à 902 mg O₂/L.

Pour avoir la concentration d'entrée du second réacteur, il faut connaître le taux d'abattement qui s'opère dans le premier réacteur (élimination de la DCO). Encore une fois il est impossible de déterminer cette valeur le réacteur n'étant pas encore construit et en fonctionnement.

Ce sont donc à nouveau les valeurs mesurées à la station de l'IAV qui seront utilisées comme références. Les taux d'abattement à la station de l'IAV sont respectivement de 55% et 25% pour le premier et le second réacteur. (Abdelhadi, 2006)

Il est maintenant possible de calculer la concentration entrant (C_i) dans le second réacteur (égale à la C_e du premier réacteur) et celle à la sortie (C_e de R2).

Les deux TRH trouvés, il suffit de les intégrer dans la formule pour avoir le volume de réacteurs nécessaire.

Le tableau ci-dessous reprend les résultats des différents calculs de dimensionnement.

Q moy (m ³ /h)	Réac en série	TA (%)	DCO entrée (mg/L) C_i	DCO sortie (mg/L) C_e	Ln(C_i/C_e)	K	TRH (h)	V (m ³)	Nbr. Réact (max 1000 m ³)	H (m)	Vitesse ascension (m/h)
196,78	R1	55	902	405,90	0,80	0,93	20,61	4055	4	6	0,29
	R2	25	405,9	304,43	0,29	0,33	20,92	4117	4	6	0,29

Tableau 10: Résultats pour le dimensionnement des réacteur RAFADE de la STEP d'El Attaouia

La majorité des auteurs déconseillent d'avoir des réacteurs possédant une capacité supérieure à 1000 m³ pour des raisons de construction (dimensions trop importantes, risque d'instabilité de la structure). (Abdelhadi, 2006)

Le nombre de réacteurs qui seront nécessaires pour traiter les eaux usées en 2030 s'élève alors à **8** (quatre fois deux réacteurs en série).

2) Forme des réacteurs

Il existe deux formes pour les réacteurs RAFADE : cylindrique ou parallélépipédique. Etant donné le nombre élevé de réacteurs, il paraît plus judicieux d'opter pour la forme rectangulaire. (Abdelhadi, 2006) En effet l'atout de cette forme est un gain de l'emprise au sol car il est possible de faire partager plusieurs parois entre les réacteurs, avec à la clef un gain sur le plan économique.

3) Profondeur des réacteurs

La profondeur du RAFADE va influer sur sa performance, plus elle est élevée, plus les performances augmenteront. (Hamouri, 2005)

C'est la hauteur (profondeur) qui détermine la vitesse d'ascension dans le réacteur. Elle doit être élevée afin d'améliorer le contact entre les bactéries anaérobies et les polluants de l'eau. Il faut tout de même faire attention à ne pas avoir une vitesse ascensionnelle trop importante car il y aurait un risque de lessivage des boues et une baisse des concentrations des boues dans les réacteurs. (Hamouri, 2005)

Or c'est la concentration des boues qui conditionne le taux de digestion des matières organiques. D'après (Hamouri, 2005), la vitesse d'ascension ne doit pas dépasser les 1m/h.

Il faut donc déterminer (fixer) une profondeur qui permette de ne pas dépasser cette valeur. La fourchette de variation des hauteurs d'eau pour les RAFADE est généralement située entre 4 et 6 m. (Abdelhadi, 2006)

La profondeur des réacteurs en série est fixée à 6 m. La profondeur étant choisie, il est maintenant possible de déterminer la vitesse ascensionnelle grâce à la formule suivante :

$$V_a = \frac{H}{TRH}$$

La vitesse ascensionnelle sera de 0,2911 m/h et de 0,286 m/h dans les premiers et les seconds réacteurs respectivement.

4) Surface des réacteurs

La surface des réacteurs est facile à déterminer, étant donné que le volume des réacteurs et leur hauteur est connue.

Il suffit de prendre un volume de 1000 m³ et une hauteur de 6 m et de les remplacer dans la formule suivante :

$$S = \frac{Vr}{H}$$

La surface qu'aura chaque réacteur est de **166,67 m³**.

5) Longueur et largeur

Pour finir, il reste à déterminer la longueur et la largeur que devront avoir les RAFADE. Comme on connaît la surface du réacteur, il faut fixer l'une des deux valeurs (généralement la largeur) pour trouver l'autre grandeur. Si on fixe une largeur de **10 m**, la longueur des réacteurs sera de **17 m**.

d) Résumé

Pour résumé ce qui vient d'être calculé, le tableau ci-dessous reprend les différentes grandeurs des réacteurs anaérobies RAFADE :

Q moy (m ³ /h)	Réac en série	V (m ³)	Nbr. Réact (max 1000 m ³)	H (m)	Surface/réac (m ²)	Largeur (m)	Longueur (m)
168,4841063	R1	4055	4	6	166,67	10	17
	R2	4117,12	4	6	166,67	10	17

Tableau 11 : Grandeurs des réacteurs RAFADE de la STEP d'El Attaouia

e) Règles pour la construction

1) Matériaux utilisés

Les matériaux utilisés doivent être résistants à la corrosion causée par des éléments issus de la dégradation anaérobie. Le matériau le plus communément utilisé pour la structure des réacteurs RAFADE est le béton armé. Pour augmenter la résistance à la corrosion, l'intérieur des réacteurs peut être recouvert d'un manteau de protection (base polyépoxyde). (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Les conduites de distribution de l'effluent doivent bien entendu être également résistantes à la corrosion, comme par exemple de l'acier inoxydable. Un manteau de protection peut également être utilisé pour augmenter la résistance.

Les couvercles des réacteurs doivent idéalement avoir la forme d'une coupole et permettre de les couvrir totalement de sorte qu'ils soient isolés, confinés de l'atmosphère. (Abdelhadi, 2006) Le matériau généralement utilisé est le polyester. Ce polyester doit être résistant aux acides (Hamouri, 2005) Il est impératif que ces couvercles soient amovibles, étant donné qu'une vidange (par le haut) des réacteurs doit se faire tous les 4-5 ans.

2) Entrée de l'influent

L'alimentation en eaux usées se fait de manière ascendante (entrées au sol des réacteurs), ce qui permet d'augmenter le contact entre le substrat (eau usée) et les bactéries anaérobies.

Ceci permet d'augmenter les performances des réacteurs et de diminuer le temps de séjour des eaux usées. (Hamouri, 2005) A noter qu'un temps de séjour réduit veut dire une plus faible occupation de terrain et donc un gain sur le plan économique.

Pour avoir une bonne digestion de la matière organique, il faut que l'influent soit bien réparti au sein du réacteur. Il est conseillé dans la littérature, d'employer un dispositif qui assure que la distribution soit effectuée par des entrées dont la couverture ne dépasse pas plus de 2 à 4 m² du fond du réacteur.

Si l'effluent est fortement chargé, il convient alors de compter une couverture de 1 à 2 m² (pour savoir combien d'entrées il faut prévoir). (KPELI & CAMARA, 2010) Il est important que tous les points de distribution reçoivent le même débit. Chaque RAFADE ayant une surface de 168 m², il faut prévoir **42** entrées pour chacun d'eux.

Afin d'avoir une répartition homogène de l'eau usée entre les différentes conduites de distribution, il faut adopter des répartiteurs. L'eau arrive par écoulement gravitaire dans cette structure et est répartie de façon égale entre les différentes conduites. (Abdelhadi, 2006; Hamouri, 2005; Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

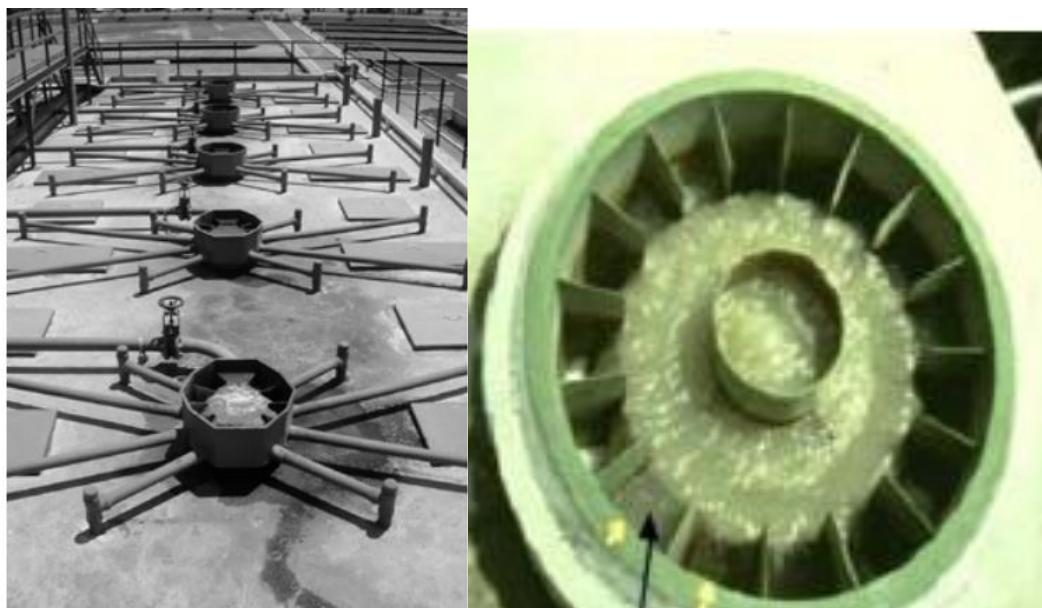


Figure 23: Répartiteurs de l'effluent pour les différents tuyaux de distributions (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) pour l'image de gauche et (Abdelhadi, 2006) pour l'image de droite)

L'alimentation se fait de manière gravitaire et la vitesse ascensionnelle dans le bassin est assurée par un rétrécissement à la fin des tuyaux de distribution.

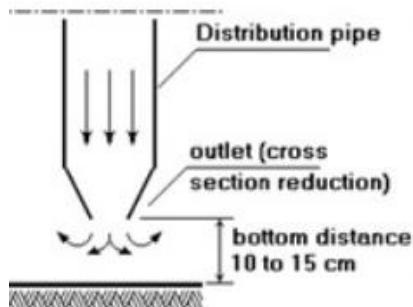


Figure 24 : Illustration d'un tuyau de distribution (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))

3) Collecte de l'effluent

L'effluent traité, doit être collecté en haut du réacteur le plus uniformément possible, en utilisant la force de la gravité. Ce système de collecte doit permettre de laisser passer l'eau tout en bloquant les flocs de boues, afin d'éviter un bouchage des tuyaux. L'eau collectée est donc acheminée vers le décanteur par gravité. (KPELI & CAMARA, 2010)

L'effluent sort du réacteur au sommet, par écoulement gravitaire dans le collecteur en forme de u ou bourrelet qui s'étend sur tout le périmètre du réacteur.

Les deux systèmes les plus souvent utilisés pour collecter l'effluent, sont constitués de déversoir en V ou de tuyaux perforés qui sont immergés. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Les collecteur doivent permettre d'éviter au maximum l'apparition de turbulences.

- **Déversoir en V**

Dans le cas du déversoir en V, une attention toute particulière doit être portée sur le nivellement du collecteur, car une petite pente peut avoir un impact non négligeable sur la répartition du flux collecté au niveau des différents points de collecte. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Il est également conseillé de placer un bloqueur d'écume immergé à 20 cm de profondeur qui aura pour rôle de retenir les boues présentes dans l'effluent.

Enfin, pour éviter la prolifération de mauvaises odeurs, le collecteur peut être recouvert par une bâche. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

- **Tuyaux perforés immergés**

L'utilisation de ce type de collecteur présente certains avantages par rapport à l'autre système du fait que les tuyaux soient immergés. Ceci à comme conséquence que le flux évacué par les trous reste constant, que le risque d'apparition de turbulence est réduit et qu'une barrière pour bloquer les boues n'est pas nécessaire.

Le seul petit inconvénient est l'accumulation possible au niveau des trous et dans le tuyau. Pour minimiser ce risque, une solution est de poser les tuyaux avec une légère pente (1%), afin qu'ils puissent s'auto épurer. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

L'UASB

L'UASB est donc le deuxième type de réacteur anaérobiose envisageable pour la station d'El Attaouia. Cette partie sera organisée comme celle pour les RAFADE.

a) Principe de fonctionnement

Les UASB sont des réacteurs anaérobies qui, comme les RAFADE sont à flux ascendant (alimenté par le bas). Ils font partie des réacteurs à lit de boues, c'est-à-dire dans lesquels les boues forment une couche suspendue (biofilms) qui filtre et traite l'eau usée pendant son passage. (Akvopedia, 2015; Zouhir & Jupsin, 2016b)

Ces biofilms ou granules microbiennes ont un diamètre compris entre 0,5 à 2 mm et sont autosupportés (en suspension dans le réacteur), mais assez grosses et denses pour ne pas être emportées par la vitesse ascensionnelle, qui se situe souvent aux environs des 0,7 m/h. (Zouhir & Jupsin, 2016b)

Il est impératif de maintenir cette vitesse ascensionnelle pour garder la couche de boues en suspension. (Akvopedia, 2015)

Ce sont les micro-organismes dans cette couche qui vont dégrader les composés organiques présents dans l'eau. Comme pour les RAFADE, la dégradation dans les UASB des composés organiques se traduit par la production de biogaz (méthanogénèse), que l'on récolte dans la partie supérieure du réacteur et qui est valorisable énergétiquement.

Après une mise en marche et plusieurs semaines d'utilisation, on constate l'apparition de plus gros flocs qui vont à leur tour agir comme filtre pour les plus petites particules entraînées par le flux ascendant. En raison de ce flux, les microorganismes qui sont floclés vont rester dans le réacteur alors que ceux qui ne le sont pas vont être emportés et sortir du réacteur. (Akvopedia, 2015)
Le lit de boue sera dense avec une concentration élevée, de 4 à 10% qui est égal à 40 à 100 gTS/l. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

La partie supérieure du réacteur est équipée d'un séparateur « triphase », gaz, solides, liquides, qui permet aux boues lourdes emportées vers le haut, de retourner dans le digesteur. Grâce à cela, les réacteurs ont une capacité de rétention élevée, et l'âge de boues dépasse souvent les 30 jours. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

On peut voir dans le schéma ci-dessous une coupe transversale d'un réacteur UASB :

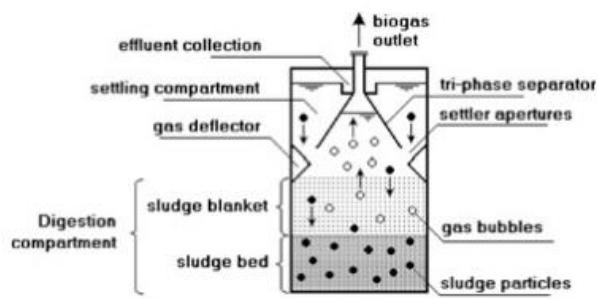


Figure 25: Schémas de réacteur UASB (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))

La principale différence avec la technologie RAFADE est que dans le cas de l'UASB, l'opérateur peut intervenir pour maintenir dans le réacteur une concentration des boues optimale. La profondeur du prélèvement des boues et la fréquence peuvent être choisie par l'opérateur. (Hamouri, 2005)
Ceci à trois conséquences : il n'y a pas la nécessité de placer un décanteur en aval du réacteur, il ne faut pas mettre deux réacteurs en série et les vidanges sont peu fréquentes (seules les boues en excès sont enlevées une fois tous les 2 à 3 ans). (Akvopedia, 2015)

Le temps de séjour de l'eau dans le réacteur est beaucoup plus court que celui du RAFADE, soit de 6 à 14h (contre 45h). (Hamouri, 2005)

Pour le bon fonctionnement de l'unité, la présence d'un opérateur qualifié est requise en permanence pour suivre le réacteur et la pompe doseuse et agir en cas de problème. (Akvopedia, 2015)

Les principaux avantages des réacteurs UASB sont, qu'ils présentent un bon taux de réduction de la DCO et DBO₅ (65 à 75%), qu'ils peuvent résister à des taux de charge organique et hydraulique élevées, qu'ils produisent peu de boues (peu de vidanges) et produisent du biogaz qui est valorisable énergétiquement. (Akvopedia, 2015; Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Par rapport au RAFADE, les UASB ont une consommation énergétique mais qui reste relativement faible (uniquement pour la pompe à influent, quand c'est nécessaire) (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

NB : Un gros point négatif du réacteur UASB est le temps important nécessaire pour son démarrage, pour atteindre la bonne concentration de boues. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Une solution pour accélérer la mise en marche des réacteurs est de l'ensemencer avec des boues qui proviennent d'une autre station, déjà en fonctionnement. Le volume de boue conseillé s'élève à 4% du volume du réacteur à ensemencer. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Ceci représente un coût supplémentaire conséquent (transport par camion) mais permet de gagner beaucoup de temps : il faut 4 à 6 mois sans et 2 à 3 semaines avec l'ensemencement.

b) Performances des réacteurs

On peut trouver dans la littérature des performances comprises entre 60 et 80% de réduction de la DCO pour un temps de séjour compris entre 4 et 20h. (SSWM, Eawag, & Spuhler, 2015)

La performance théorique des réacteurs UASB de la STEP d'El Attaouia peut être calculée avec cette formule :

$$E_{DCO} = 100 \times (1 - 0,68 \times t^{-0,35})$$

Où, t = le temps de rétention hydraulique et 0,68 et 0,35 sont des constantes empiriques. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Le calcul du temps de rétention est calculé au point suivant et vaut 15h. La performance des réacteurs avec ces données vaut 75% (taux d'abattement de la DCO).

c) Dimensionnement des réacteurs UASB

Les principes utilisés pour le dimensionnement des UASB sont très proches de ceux utilisés précédemment pour les RAFADE. Ce qui change c'est le temps de séjour des eaux dans le réacteur qui est plus court (12-14h), avec comme conséquence que le volume nécessaire sera plus petit.

Une fois encore un critère fondamental dans le dimensionnement est la vitesse ascensionnelle des eaux dans le réacteur. La vitesse doit être suffisante pour assurer un contact entre les bactéries anaérobies et les polluants de l'eau. La vitesse ne doit tout de même pas être trop importante pour éviter une perte de la biomasse, qui sera emportée par l'effluent, hors du réacteur. La vitesse ascensionnelle est déterminée par la hauteur du réacteur et sa section transversale. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

NB : Si les réacteurs sont précédés d'une pompe (qui les alimente en eaux usées), un bassin de dissipation est nécessaire en amont, afin d'éviter une variation trop importante du débit et de la charge organique entrante (en période de pic de flux). (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

1) Volume des réacteurs

Le volume des réacteurs UASB, peut être calculé de trois façons différentes, selon qu'on le calcule par rapport à la vitesse ascensionnelle, la charge appliquée aux réacteurs ou le temps de rétention hydraulique.

Pour être certain qu'il n'y ait pas un sous dimensionnement, il est indiqué de calculer les trois volumes et d'utiliser le plus grand trouvé. En effet ces volumes ne seront pas identiques, selon que l'on prenne le temps de séjour, la charge ou la vitesse ascensionnelle en considération. Si le volume est insuffisant pour l'une de caractéristiques, le débit par exemple, l'ouvrage sera rapidement surchargé et la performance épuratoire en sera impactée.

- Volume selon la **vitesse ascensionnelle**

Dans ce cas de figure, les données utilisées pour déterminer le volume sont : la vitesse ascensionnelle, le débit moyen entrant dans la STEP, la hauteur des réacteurs (fixée) et la surface. La vitesse ascensionnelle est fixée à 0,7 m/h, car il est conseillé dans la littérature de ne pas dépasser les 1m/h pour les effluents domestiques avec un temps de séjour

hydraulique compris entre 6 et 10 heures et pour des températures moyennes situées entre 20 et 26 °C. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005). Le débit moyen est connu (196,78 m³) et la hauteur fixée à 6m. Il est alors possible de calculer la surface des réacteurs en divisant le débit par la vitesse ascensionnelle. On obtient alors une surface de 281 m². Une fois la surface connue, le volume se calcule en multipliant cette surface par la hauteur de 6 mètres. Le volume total vaut alors **1687 m³**. Il est également possible de chiffrer le temps de rétention hydraulique pour ce volume en le divisant par le débit moyen qui arrive dans la station par jour. Le TRH de l'eau dans le réacteur dans ce cas-ci est égal à 9 heures.

Le tableau ci-dessous reprend les différents résultats obtenus :

Q (m ³ /h)	Vs (m/h)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Volume (m ³)	TRH (h)
196,78	0,7	6	281	1687	9

Tableau 12: Résultats des calculs en vue de l'obtention du volume des réacteur UASB de la STEP d'El Attaouia (selon la vitesse ascensionnelle)

- Volume selon la charge (DCO)

Cette fois-ci le volume sera calculé selon la DCO qui entre dans les réacteurs, par jour. Cette charge organique est connue et vaut 902 g O₂/m³.j (soit 0,902 kg/m³.j). Il faut connaître la charge totale qui sera appliquée aux réacteurs et pour ce faire, il suffit de multiplier le nombre de m³ qui arrivent par jour à la STEP (4722,25 m³) par le nombre de kg d'O₂ de DCO que l'on retrouve par m³ d'eau usée. La charge totale journalière entrante dans la STEP vaut donc 4260 kg d'O₂ DCO/j. Pour avoir le volume avec cette méthode, il faut diviser la charge précédemment trouvée (charge totale journalière) par la charge volumique. Dans la littérature, il est conseillé de prendre une charge volumique de 5 kg DCO /m³ (Agence de l'eau Adour Garonne, 2006) pour les réacteur UASB. Le volume obtenu ici est de **852 m³**.

- Volume selon le temps de rétention hydraulique

Pour cette dernière façon de calculer le volume, c'est le temps de séjour de l'eau dans le réacteur qui va être utilisé. Il nous faut, pour trouver le volume, multiplier la TRH par le débit moyen journalier (m³/h). Le débit est connu et le TRH va être fixé. Dans la littérature, le temps de séjour conseillé se situe entre 6 et 14h. Prendre un TRH de 14h permet d'optimiser les chances et d'obtenir le meilleur taux d'abattement possible. Le débit moyen multiplié par le TRH donne un volume de 2755 m³. Cette valeur sera arrondie à **2800 m³** pour faciliter les calculs par la suite mais également par sécurité. La surface totale des réacteurs dans ce cas de figure, vaut 459 m² et la vitesse ascensionnelle dans les réacteurs sera de 0,4 m/h. La surface totale est obtenue en divisant le volume par la hauteur (6 m) et la vitesse, en divisant le débit moyen journalier par la surface précédemment calculée.

Le tableau suivant reprend les différents résultats obtenus :

Q (m ³ /h)	TRH (h)	Hauteur (m)	Volume (m ³)	Surface (m ²)	Vs (m/h)
196,78	14	6	2755	459	0,4

Tableau 13 : Résumé des résultats obtenus en vue de l'obtention du volume total des réacteurs UASB de la STEP d'El Attaouia (selon le TRH)

Pour rappel, il faut prendre le plus grand volume des trois obtenus ci-dessus, afin d'être certain de ne pas avoir un sous-dimensionnement pour l'une des caractéristiques. Le volume total des réacteurs sera donc de **2800 m³**. Pour les mêmes raisons que pour les RAFADE, il n'est pas indiqué d'avoir des réacteurs avec un volume supérieur à 1000 m³.

Si chacun est dimensionné avec un volume de 1000 m³, 2,8 réacteurs seront nécessaires pour traiter l'influent. Le nombre est arrondi vers le haut ce qui fixe à 3, le nombre de réacteur UASB nécessaires.

NB : Il est possible de connaître le temps de séjour exact dans chacun des réacteurs. Pour cela il faut diviser le volume du réacteur par le débit d'alimentation de celui-ci. Le volume est connu (1000 m³), il reste à trouver le débit d'alimentation. Pour l'obtenir, il suffit de diviser le débit moyen journalier (196,78 m³/h) par le nombre de réacteurs. Le débit d'alimentation des trois UASB sera de **66 m³/h**. Ceci nous permet de trouver que le TRH dans les réacteurs vaudra **15h**.

2) Forme des réacteurs

Encore une fois, les deux options possibles sont la forme cylindrique ou rectangulaire. Pour les mêmes raisons que les RAFADE, la forme rectangulaire semble être la meilleure option.

3) Profondeur des réacteurs

La profondeur du réacteur dépend de la vitesse ascensionnelle visée dans celui-ci. La vitesse ascensionnelle maximale dépend du type de boues présentes ainsi que de la charge (DCO) de l'influent. D'après (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005), la vitesse ascensionnelle des réacteurs UASB, qui fonctionnent avec des boues floculées et dont la charge de l'influent se situe entre 5 et 6 kg/DCO/m³.j, devrait se situer autour des 0,5 – 0,7 m/h.

Dans ce cas de figure, des pics allant de 1,5 m/h à 2 m/h peuvent être tolérés pendant 2 à 4 heures. (Akvpedia, 2015)

Pour ce qui est de la profondeur, il est conseillée de la prendre entre 3 et 6 m dans le cas du traitement des eaux usées domestiques ayant les caractéristiques suivantes : une vitesse ascensionnelle inférieure à 1 m/h, un temps de séjour hydraulique entre 6 et 10 heures et pour des températures moyennes entre 20 et 26 °C. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

La détermination des volumes des réacteurs de la STEP d'El Attaouia, a permis de calculer la vitesse ascensionnelle que l'on retrouvera à l'intérieur de ceux-ci (cf. tableau 13). Malheureusement, les 0,4 m/h trouvés se situent en dessous des valeurs recommandées dans la littérature (min. 0,5 m/h). Une solution pour pallier ce problème, est d'augmenter la hauteur qui avait été fixée à 6 m. Si elle est augmentée d'un mètre, la vitesse ascensionnelle atteint alors les 0,5 m/h.

4) Surface des réacteurs

L'aire d'un réacteur peut être calculée par la formule suivante :

$$A = \frac{V}{H}$$

Où, V = volume du réacteur, H = profondeur du réacteur et A = aire du réacteur

On remplace les termes dans l'équation

$$A = \frac{1000}{7} = \mathbf{143 \text{ m}^2}$$

Chaque réacteur aura une superficie de 143 m². La surface totale occupée par les trois réacteurs est égale à **429 m²**.

5) Longueur et largeur des réacteurs

Une fois la superficie des réacteurs connue, il est aisément d'en calculer la longueur et la largeur. Il suffit de fixer une des deux grandeurs, par exemple la largeur, puis d'utiliser la formule ci-dessous pour trouver l'autre grandeur.

Par exemple, une largeur de **8** mètres est choisie dans le cas d'El Attaouia. Une fois les termes remplacés dans la formule :

$$L = \frac{A}{l} = \frac{143}{8} = 18 \text{ m}$$

Les réacteurs auront une longueur de **18 m**. Il est possible de jongler à souhait avec ces grandeurs.

d) Résumé des dimensions

Le tableau suivant, reprend toutes les dimensions que devront avoir les réacteurs UASB à la station d'El Attaouia.

Vol total (m ³)	Nbr. Réac	Vol/Réac (m ³)	Haut (m)	V asc. (m/h)	A/Réac (m ²)	I (m)	L (m)
2800	3	1000	7	0,5	143	8	18

Tableau 14 : Résumé des dimensions des réacteurs UASB de la STEP d'El Attaouia

e) Règles pour la construction

Avant d'exposer les règles principales à prendre en considération lors de la conception, voici une illustration des différents éléments constituant le réacteur et de leur organisation pour plus de clarté.

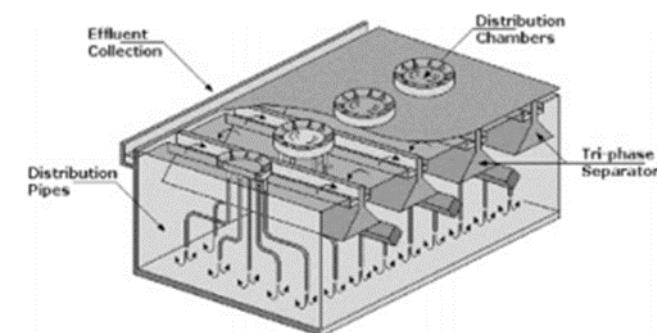


Figure 26 : Représentation schématique d'un UASB rectangulaire (source :(Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))

1) Matériaux utilisés

Les réacteurs UASB étant également des réacteurs anaérobies, la dégradation de certains éléments peut mener à la production de produits hautement corrosifs. Il faut donc en tenir compte dans le choix des matériaux qui devront être résistants à la corrosion. La majorité des réacteurs UASB sont construits avec du béton (armé) et de l'acier qui peuvent être recouverts (à l'intérieur) d'un manteau de protection (base polyépoxyde). (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

A noter que séparateur « triphase » gaz-solide se situe dans les parties supérieures et est donc plus exposé à la corrosion. Il convient alors d'opter pour un matériau plus résistant à la corrosion lors de sa fabrication, l'acier inoxydable par exemple. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

On peut également utiliser d'autres matériaux pour la construction des réacteurs, comme du PVC, de la fibre de verre ou de l'acier inoxydable qui ont l'avantage d'être moins volumineux et moins sensibles à la corrosion que le béton. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Pour les réacteurs de la STEP d'El Attaouia, l'option la plus simple semble être celle du béton armé. Il faut tout de même s'assurer que le béton utilisé soit adapté à ce genre d'ouvrage. Il doit en effet être suffisamment résistant chimiquement et être le plus perméable possible.

Pour ce faire il faut choisir un ciment qui a un ratio eau-ciment le plus faible et qui est le plus résistant possible aux vibrations. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Il est conseillé, le béton une fois placé et séché, d'y appliquer un manteau de protection qui agira comme barrière de protection face à l'environnement corrosif du réacteur. On peut par exemple imaginer appliquer sur les parois du caoutchouc chloré ou de l'epoxy (polyépoxyde) bitumineux. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

2) Entrée de l'influent

Comme déjà dit plus haut, l'alimentation en eaux usées se fait par le bas. En plus d'augmenter le contact entre la biomasse et les polluants, cela permet également d'éviter que l'eau utilise des chemins préférentiels à travers le lit de boue et donc d'avoir un lit d'une faible hauteur, avec des boues très concentrées qui décentrent plus facilement. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Il faut également que l'influent soit réparti de manière homogène dans le réacteur afin d'assurer un bon mélange et d'éviter l'apparition de zones mortes. Une répartition homogène sera assurée par le système de distribution des eaux usées. Il faut donc une distribution homogène entre les différents tuyaux d'alimentation. Pour ce faire, la répartition entre les tuyaux se fait à l'aide de compartiments (box) qui sont alimentés par des déversoirs. Chaque tuyau a son propre compartiment au niveau du répartiteur (voir figure 23) qui descend jusqu'au fond du réacteur. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) En plus de permettre une répartition égale entre les différents tuyaux, les compartiments permettent de détecter facilement et rapidement un bouchon dans les tubes. Il est également plus facile d'éliminer le bouchon, car les tuyaux sont aisément accessibles.

Certaines caractéristiques doivent être respectées lors du dimensionnement des tuyaux :

- **Le diamètre**

Le diamètre va être influencé par trois conditions qu'il doit respecter :

Le diamètre des tuyaux doit être suffisamment large pour permettre à l'influent d'avoir une vitesse inférieure à 0,2 m/h. Le but de cette faible vitesse est de permettre aux bulles d'air qui auraient été entraînées avec les eaux usées, de revenir en arrière (sens inverse de l'influent). (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Il faut éviter l'introduction de bulles d'air dans le réacteur car elles pourraient causer une aération des boues anaérobies et gêner la méthanolisation et/ou produire un mélange potentiellement explosif avec le biogaz accumulé au niveau du séparateur. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Un diamètre de **75** mm assure une vitesse de 0,2 m/h dans les tuyaux.

Mais il faut que le diamètre soit suffisamment large pour laisser passer les solides présents dans les eaux usées, en évitant l'apparition de bouchons. Dans la pratique, un diamètre compris entre **75** et **100** mm, permet de réduire au maximum l'apparition de bouchons dans les tuyaux. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

La dernière condition à prendre en compte lors du dimensionnement des tuyaux de distribution, est que la vitesse ascensionnelle doit être suffisante pour garantir un bon contact entre l'eau usée et le lit de boue ainsi que pour assurer un bon mélange dans le réacteur. Cette condition est en opposition avec les deux précédentes car elle implique la réduction du diamètre (augmente la vitesse de l'influent). D'après (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) un diamètre compris entre **40** et **50** mm assure une vitesse ascensionnelle supérieure à 0,40 m/s (à la sortie des tuyaux), qui est suffisante pour éviter la sédimentation des boues.

Il faut donc trouver le meilleur compromis entre les différents diamètres, afin d'optimiser la distribution de l'effluent au sein du réacteur. **75** mm semble être un bon compromis pour le diamètre des tuyaux de distribution.

Le bout du tuyau de distribution doit également présenter un rétrécissement comme pour les RAFADE pour accélérer l'influent. (cf. figure 24)

- **Le nombre de tuyaux de distribution**

Le deuxième paramètre très important dont il faut tenir compte pour la mise en place du réseau de distribution, est la répartition des tuyaux au fond de l'UASB. Il faut à nouveau s'assurer de maximiser le contact effluent-biomasse et éviter l'apparition de zones mortes. Le nombre de tubes nécessaire pour assurer une distribution homogène est donné par la formule suivante qui est le rapport de la surface du réacteur sur l'aire d'influence du tuyau de distribution (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) :

$$Nd = \frac{A}{Ad}$$

Où, Nd = nombre de tuyaux, A = aire du réacteur et Ad = aire d'influence du tuyau

L'influence du tuyau de distribution va dépendre du type de boue et de la charge organique qui est appliquée au système. Sur le tableau suivant on peut voir l'aire d'influence des distributeurs selon le type de boue et la charge organique :

Sludge type	Organic load applied (kgCOD/m ³ ·d)	Influence area of each distributor (m ²)
Dense and flocculent (concentration >40 kgTSS/m ³)	<1.0	0.5 to 1.0
	1.0 to 2.0	1.0 to 2.0
	>2.0	2.0 to 3.0
Relatively dense and flocculent (concentration 20 to 40 kgTSS/m ³)	<1.0 to 2.0	1.0 to 2.0
	>3.0	2.0 to 5.0
Granular	<2.0	0.5 to 1.0
	2.0 to 4.0	0.5 to 2.0
	>4.0	>2.0

Tableau 15: Aire d'influence des distributeurs selon le type de boue et la charge organique de l'influent (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))

La charge organique théorique des eaux usées arrivant à la station d'El Attaouia est de 3568,3 kg d'O₂ DCO/I.j. Pour ce qui est de la densité du lit de boue, les eaux marocaines étant fortement chargées en MES, celui-ci devrait être dense (>40 kg TSS/m³)

Nous avons donc une aire d'influence des tuyaux de distribution qui sera comprise entre 2 et 3 m². Une aire de 2,5 m² sera utilisée pour déterminer le nombre de tuyaux nécessaires.

Il est maintenant possible de remplacer les termes dans l'équation :

$$Nb = \frac{143}{2,5} = 57$$

Il faut donc **57** tuyaux d'alimentation par réacteur UASB.

3) Séparateur « triphase »

Pour rappel, le rôle de ce séparateur est de récolter le biogaz produit au cours de la méthanogénèse, mais également de renvoyer vers le réacteur, les boues qui auraient été emportées par la vitesse ascensionnelle des eaux usées (permet au réacteur de fonctionner avec des temps de rétention de solides élevés, âge des boues élevé). (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Le dimensionnement du séparateur va dépendre des caractéristiques des eaux usées, du type de boue, de la charge organique appliquée et de la production théorique de biogaz. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Le séparateur doit être dimensionné de telle sorte, qu'à l'intérieur du collecteur de gaz, il y ait la formation d'une interface liquide-gaz suffisante pour permettre au gaz piégé dans la boue de s'extraire facilement. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

- **Collecteur de gaz**

Le taux de libération du biogaz doit être suffisamment élevé pour passer une couche éventuelle de boue, mais suffisamment faible pour rapidement relâcher le gaz, en évitant que la boue soit entraînée et s'accumule au niveau du tuyau de sortie du collecteur. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) Il n'existe pas vraiment de règles quant au dimensionnement des collecteurs. Le but étant de collecter un maximum de biogaz, ceux-ci doivent recouvrir un maximum de la surface des réacteurs, en jouant avec le nombre, leur largeur et leur longueur. On peut par exemple opter pour la configuration suivante : cinq collecteurs, d'une largeur de **4** mètres et de **7** mètres. Les configurations possibles sont très nombreuses.

- **Séparateur de solides (compartiment de sédimentation)**

Une fois que le gaz est extrait, le mélange solides-liquides (qui ont quitté le lit de boue) à accès au compartiment de sédimentation. Les conditions idéales pour la sédimentation sont réunies dans ce compartiment dues à la vitesse ascensionnelle faible et l'absence de bulles de gaz. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Certaines conditions doivent être respectées pour assurer une sédimentation (retour vers le réacteur) optimale à savoir :

Placer des déviateurs directement en dessous de l'ouverture du compartiment de sédimentation, pour assurer la séparation gaz-mélange liquide-solide, ne laissant donc rentrer que le mélange dans le compartiment. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Ensuite les murs du compartiment doivent avoir un angle supérieur à 45° (les boues glissent plus facilement vers le réacteur) et la profondeur doit être comprise entre 1,5 et 2 mètres.

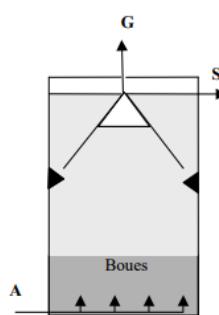


Figure 27 : Représentation schématique d'un réacteur UASB (source : (Moletta, 2002))

Le temps de rétention hydraulique dans cette partie en fonction des différentes situations est repris dans le tableau suivant :

Influent flow	Surface loading rate (m/hour)	Hydraulic detention time (hour)
Average flow	0.6 to 0.8	1.5 to 2.0
Maximum flow	<1.2	>1.0
Temporary peak flows ^(*)	<1.6	>0.6

(*) Peak flow lasting between 2 and 4 hours

Tableau 16: Temps de rétention hydraulique dans le compartiment de sédimentation (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))

L'ouverture du compartiment de sédimentation doit permettre une rétention des solides dans le digesteur et cela en maintenant une vitesse ascensionnelle inférieure aux valeurs recommandées dans le tableau suivant :

Influent flow	Velocity (m/hour)
Average flow	<2.0 to 2.3
Maximum flow	<4.0 to 4.2
Temporary peak flows ^(*)	<5.5 to 6.0

(*) Peak flows lasting between 2 and 4 hours

Tableau 17 : Vitesse ascensionnelle dans le compartiment de sédimentation (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))

Le retour des boues dans le digesteur sera donc assuré, si l'ouverture maintient une vitesse ascensionnelle compatible et que les autres conditions (pente des murs, le séparateur gaz-liquide adapté, etc.) sont réunies. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

4) Collecte de l'effluent

Après son passage dans le réacteur UASB, l'eau va être récoltée dans la partie supérieure de celui-ci. Les deux systèmes les plus souvent utilisés pour collecter l'effluent, sont constitué de déversoir en V ou de tuyaux perforés qui sont immergés. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

- **Déversoir en V**

Dans le cas du déversoir en V, une attention toute particulière doit être portée sur le nivellement du collecteur, car une petite pente peut avoir un impact non négligeable sur la répartition du flux collecté au niveau des différents points de collecte. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Il est également conseillé de placer un bloqueur d'écume immergé à 20 cm de profondeur qui aura pour rôle de retenir les boues présentes dans l'effluent.

Enfin, pour éviter la prolifération de mauvaises odeurs, le collecteur peut être recouvert par une bâche. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

- **Tuyaux perforés immergés**

L'utilisation de ce type de collecteur présente certains avantages par rapport à l'autre système du fait que les tuyaux soient immergés. Ceci à comme conséquence que le flux évacué par les trous reste constant, que le risque d'apparition de turbulence est réduit et qu'une barrière pour bloquer les boues n'est pas nécessaire.

Le seul petit inconvénient est l'accumulation possible au niveau des trous et dans le tuyau. Pour minimiser ce risque, une solution est de poser les tuyaux avec une légère pente (1%), afin qu'ils puissent s'auto épurer. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

5) Gestion des boues dans le digesteur

Il faut prévoir lors du dimensionnement du réacteur UASB, un groupe de valves et de tuyaux nécessaire pour l'échantillonnage et la décharge de boues présentes dans le digesteur. Ces valves doivent être placées à différentes hauteurs du compartiment. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

- **Valves pour l'échantillonnage**

Le but de l'échantillonnage est de contrôler la croissance et la qualité de la biomasse dans le réacteur. C'est l'une des opérations de routine la plus importante qui devra être réalisée par l'opérateur qualifié de la station. Elle permet d'évaluer l'activité de la biomasse et donc de contrôler l'état du digesteur. L'opérateur saura déterminer la hauteur et la concentration du lit de boue, ce qui lui permettra par la suite d'établir sa stratégie pour les décharges de boues (excédent de boue), quand éliminer le surplus de boue et en quelle quantité. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Il est conseillé d'organiser les valves comme tel : espacement de **50 cm** entre les valves en partant du bas du réacteur, avec un diamètre compris entre **3,81 et 5,08 cm** et de type valve à bille. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

- **Système de retrait des boues**

Le but de ces valves est d'éliminer du réacteur, lorsque c'est nécessaire, le surplus de boues. Ce système permet également d'éliminer des matières inertes qui se seraient accumulées au fond du réacteur. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Au minimum deux valves doivent être prévues, l'une au fond du réacteur et la seconde à environ **1 – 1,5 m** de la partie inférieure du digesteur. Le diamètre des tuyaux d'évacuation doit être égal ou supérieur à **100 mm**. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

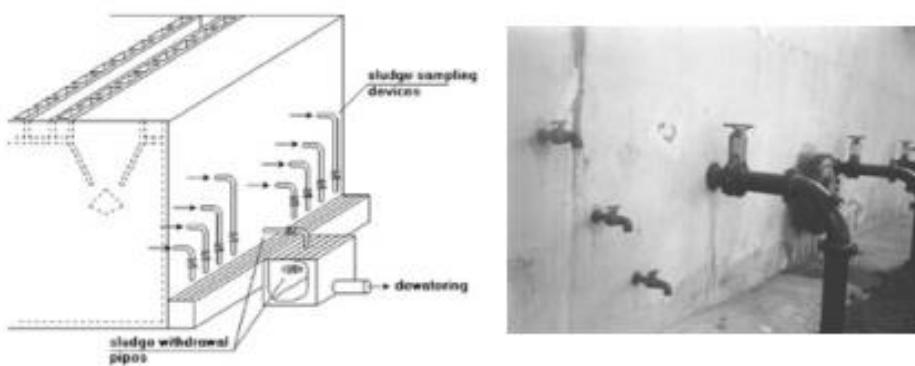


Figure 28: Illustration des valves sur un réacteur UASB (source : (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005))

6) Résumé

Le tableau ci-dessous reprend les dimensions des différents ouvrages (collectes, distribution, etc.)

Tuyaux de distr	Diamètre (mm)	Nmbr./Réac
	75-100	0
Collecteur gaz	Nbr.	Largeur (m)
	5	4
Séparateur solides		Angle des murs
	1,5-2	45°
Valves échant.	Espace (cm)	Diamètre (cm)
	50	4 à 5
Valves retrait	Nbr. (minimum)	Espace (m)
	2	1-1,5
		Diamètre (mm)
		100

Tableau 18: Résumé des dimensions des différents systèmes (collecte, distribution, etc.) des réacteurs UASB

Choix du réacteur anaérobiose pour la STEP d'El Attaouia

Après avoir dimensionner les deux types de réacteurs possibles pour la STEP d'El Attaouia, le choix se tourne vers les réacteurs UASB. Les raisons de ce choix sont que les UASB sont plus performants que les RAFADE, le nombre nécessaire est beaucoup plus faible, 3 au lieu de 8 pour les RAFADE. Ceci diminue la superficie nécessaire pour la STEP et donc le coût. De plus il ne faut pas de décanteur pour les UASB donc un gain de superficie supplémentaire. Le seul point négatif est qu'ils nécessitent une gestion par une personne qualifiée, qui doit gérer les boues au sein des réacteurs.

Il n'est donc pas nécessaire pour la suite du travail de dimensionner un décanteur et un filtre à gravier, non requis pour les réacteur UASB.

3.1.1.2. Traitement tertiaire

Le traitement tertiaire de ce type de procédé d'épuration (RACAH), est assuré par un chenal algal à haut rendement suivi d'un bassin de maturation.

1) Chenal algal à haut rendement (CAHR)

Avant de s'attaquer au dimensionnement, il convient de préciser que deux options différentes sont envisageables pour le CAHR d'El Attaouia. Pour rappel, un critère important à prendre en considération lors de la conception de la STEP, est son coût, qui doit ne doit pas être trop conséquent. Dans cette optique, il semble logique d'utiliser le CAHR déjà existant à El Attaouia et de construire une nouvelle structure, qui viendra l'épauler. Les eaux usées seront alors réparties entre l'ancien CAHR et le nouvel ouvrage qui sera mis en parallèle. Les deux options envisagées pour El Attaouia sont : la construction d'un nouveau CAHR ou d'une lagune aérée (aéré facultatif).

La principale différence entre la lagune aérée et le CAHR est que pour la lagune, l'aération ne se fait pas via les algues mais via un système d'aération. La lagune aérée affiche de meilleures performances que le CAHR et permet d'avoir un ouvrage plus compact mais a un coût de fonctionnement plus important du fait de l'aération nécessaire (cf. plus loin)

NB : Il faut bien entendu réhabiliter le CAHR existant, à savoir remplacer la géomembrane et éventuellement placer un textile en dessous de celle-ci pour la protéger (apparition de trous, etc.) Il faudra tenir compte de cette réhabilitation lors de l'estimation ultérieure des coûts.

a) Rôle

Comme déjà expliqué plus haut, le CAHR est une unité de traitement de type tertiaire dont le rôle est d'éliminer des eaux usées les nutriments comme les nitrates et les phosphates. Le principe du système consiste à faire proliférer des algues et des bactéries qui doivent être en équilibre. Il est par conséquent très important d'avoir une bonne pénétration de la lumière dans l'eau et d'y avoir suffisamment d'oxygène via une aération adéquate.

Dans le CARH on cherche donc à favoriser une symbiose entre des bactéries aérobies et les algues. Les bactéries dégradent la matière organique et ont besoin, pour ce faire de beaucoup d'oxygène qui sera fournie par les algues. L'azote, le phosphore et le CO₂ résultant de la dégradation de la matière organique vont être prélevés par les algues et utilisés pour le développement algal dans le CAHR. (Hamouri, 2005; KPELI & CAMARA, 2010)

Un paramètre important dans la conception du CAHR est la profondeur car elle est inversément proportionnelle à l'intensité lumineuse. Comme expliqué plus haut, ce sont les algues qui vont fournir l'oxygène nécessaire à la dégradation des matières organiques et ces algues ont besoin d'énergie solaire pour produire cet oxygène. (KPELI & CAMARA, 2010) Il ne faut donc pas qu'elle soit trop importante.

Par contre une augmentation de la profondeur du CARH entraîne une hausse du rapport volume/surface, qui s'accompagne d'une stabilité thermique en hiver. (KPELI & CAMARA, 2010)

Dans la littérature, il est donc souvent conseillé d'augmenter la profondeur du CAHR afin de réduire les fluctuations des températures entre le jour et la nuit. Un rapport volume/surface égal à 3,3 m⁻¹ permet de réduire l'impact des saisons sur le suivi des coliformes fécaux et la dépendance des saisons augmente avec la diminution du rapport. (KPELI & CAMARA, 2010)

Un autre paramètre très important pour la conception du CAHR est le système d'agitation mécanique. Ses rôles sont multiples : maximiser l'exposition des algues en suspension à la lumière et améliorer la conversion de l'énergie solaire en biomasse. (KPELI & CAMARA, 2010) Favoriser le contact des cellules avec les nutriments en solution et assurer une répartition homogène de l'oxygène, diminuant le risque de l'apparition de couches anoxiques (oxydation formes réduites d'azote et de soufre. (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016)

L'agitateur permet également d'éviter que l'eau stagne dans le CAHR et que les algues sédimentent ou soient exposées de manière prolongée à la lumière (risque de photo-inhibition).

La limite du CARH est que les concentrations en DBO et en MES doivent être supportables pour le système. Trop de matières organiques induirait une prolifération de bactéries au détriment des algues et trop de MES réduirait la pénétration de la lumière dans l'eau (turbidité). (KPELI & CAMARA, 2010)

C'est pour cette raison que le chenal algal doit être précédé d'unités de prétraitement, les réacteurs anaérobies. (KPELI & CAMARA, 2010)

b) Dimensionnement

Le dimensionnement du CAHR va dépendre de deux paramètres, le temps de rétention hydraulique et le débit journalier entrant dans l'ouvrage. Le temps de rétention est important puisqu'il détermine la durée du séjour de l'eau dans le CAHR et par conséquent le rendement épuratoire qu'aura l'ouvrage. Plus le temps de rétention est élevé et plus le taux d'abattement sera meilleur mais plus grand sera l'ouvrage. D'après (Hamouri, 2005), le temps de séjour dans un CAHR ne doit pas dépasser les trois jours.

Il est également possible de dimensionner le CAHR sur base des données cinétiques relatives au prélèvement du N et du P par les algues, si des limites de rejet existent pour ces deux éléments. (Hamouri, 2005)

Les constantes de premier ordre, k 20°C d'élimination de N et P qui seront utilisées pour déterminer le temps de séjour dans le chenal, ont été déterminées par traçage chimique et par le suivi des performances d'élimination sur plusieurs années à la station de l'IAV. (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016; Hamouri, 2005)

Ce temps de séjour doit donc permettre d'atteindre les concentrations requises.

Si on établit que le modèle piston peut être retenu pour exprimer le rapport entre les concentrations entrantes et sortantes du CAHR, la formule pour trouver la constante de premier ordre est :

$$Se/Si = e^{-kt}$$

Où, Se = concentrations NTK à la sortie, Si = concentrations NTK à l'entrée, k = la constante de premier ordre et t = le temps de séjour.

Pour pouvoir dimensionner les deux options présentées plus haut (CAHR ou lagune), il est nécessaire de connaître le volume total requis pour traiter l'eau entrante (sur base du temps de séjour qui sera différent selon le type de procédé considéré). Ensuite il faut déterminer la proportion du débit journalier qui pourra être pris en charge par le CAHR existant pour savoir quelle partie du débit le nouvel ouvrage devra accueillir.

1) Volume total nécessaire

- Dimensionnement avec le TRH

La formule qui permet de trouver le volume est la suivante :

$$V = Q \times TRH$$

Le débit moyen journalier est égal à 4722,62 m³/j (projection pour 2030) et le TRH est fixé à 2 jours. Le volume du CAHR requis pour la STEP d'El Attaouia vaut **9445,5 m³**.

2) Volume du CAHR déjà existant à la STEP d'El Attaouia

Il faut donc calculer la capacité du CAHR déjà existant, afin de connaître les dimensions du nouveau qu'il faudra construire à côté. Les dimensions qui permettront de connaître le volume de l'ouvrage existant sont les suivantes : il y a six chenaux (tournants) qui d'après (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016) et (Abdelhadi, 2006), ont chacun une longueur moyenne de 124 m, une largeur de 10 mètres et une profondeur de 0,5 m. Le volume calculé à partir de ces données est égal à **3720 m³**. Le débit (m³/j) pouvant être pris en charge par cet ouvrage est de **1860 m³/j**, ce qui représente environ 40% du débit moyen journalier entrant sur la STEP d'El Attaouia.

3) Volume du nouvel ouvrage

Pour connaître le débit journalier entrant dans la nouvelle structure, il suffit de soustraire au débit total, celui pris en charge par le CAHR existant. Il reste donc 4722,75-1860 = **2863 m³/j**, soit 60% du débit journalier entrant qui sont à répartir sur le nouvel ouvrage. Le temps de rétention hydraulique étant fixé à 2 jours, le volume requis est de **5726 m³**.

Cette donnée connue, les deux options, nouveau CAHR et lagune aérée, peuvent être explorées.

Nouveau Chenal algal à haut rendement

a) Dimensionnement

Pour le dimensionnement du nouvel CAHR, la même profondeur de 0,50 m sera utilisée. Comme le volume nécessaire vaut 5726 m³, la superficie totale requise sera alors de 11451 m².

La largeur est fixée à 11 m (permet de réduire la longueur des chenaux). Reste donc à déterminer la longueur des chenaux. Dans ces conditions, il faudra **8** chenaux qui auront une longueur moyenne de **130 m**. Si on l'ajoute à celle du CAHR déjà existant, la surface totale nécessaire pour le traitement tertiaire est de 18891 m².

b) Règles pour la construction

1) Matériaux utilisés

Pour les murs de séparation entre les différents chenaux, le béton armé est la meilleure option. Pour ce qui est du revêtement du sol du CAHR, il existe deux options : soit recouvrir le sol d'une géomembrane soit d'utiliser du béton pour la couverture du sol. La géomembrane a comme avantage d'être beaucoup moins couteuse et d'être moins sensible à la corrosivité des eaux usées. Il faut observer certaines règles dans le cas de l'utilisation de la géomembrane. Il convient d'enlever tout ce qui pourrait percer la géomembrane, à savoir des plantes (arbustes peuvent la percer) et les pierres (avec le poids de l'eau, risque de la troubler). Il est également possible, par sécurité de poser une couche de bâche en textile en dessous de la géomembrane.

Il est ensuite important de tendre suffisamment la géomembrane lors de sa pose afin d'éviter qu'à certains endroits, des bourrelets apparaissent. Les bourrelets pourraient être à l'origine de zones mortes, ce qui réduirait les performances du CAHR.

Pour ce qui est de l'agitateur mécanique, il existe deux systèmes, la roue à palette et le système air lift. La question de l'agitateur mécanique sera abordée un peu plus bas.

2) Forme du CAHR

Il est également indiqué d'opter pour une forme en serpentin, avec les murs en communs pour 2 chenaux, afin de réduire l'emprise au sol de l'ouvrage ainsi que pour les matériaux nécessaires à la construction.

c) Résumé des dimensions du nouvel CAHR

Hauteur (m)	Largeur (m)	Longueur tot (m)	L/chenal (m)	Nbr. Chenaux	Surface (m ²)
0,5	11	1041	130	8	11451

d) Système d'agitation

Comme expliqué dans la première partie de ce point, l'agitation est d'une importance capitale dans un chenal algal. D'après (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016) les vitesses d'écoulement dans le chenal doivent être comprises entre 5 et 30 cm/s. Deux types de système d'aération peuvent être employés : la roue à aube et l'air lift. L'avantage de l'air lift est qu'en plus d'assurer une agitation dans le CAHR, il aère l'effluent. (Elan ingénierie & consulting SARL, 2016)

Ce type d'aérateur semble être indiqué pour la STEP d'El Attaouia et qui devrait être installé.

1) Principe

Le système air-lift est un système de pompe de relevage d'eau par injection d'air. Le principe de fonctionnement consiste en l'injection d'air comprimé dans une canalisation verticale pour entraîner l'eau qui s'y trouve. (Wikipédia, n.d.)

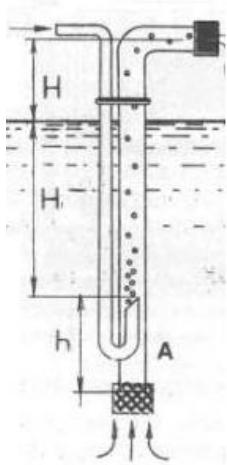


Figure 29: Illustration d'un système air lift (source :(Wikipédia, n.d.))

L'énergie utilisée dans un air-lift est l'air comprimé. Mais pour avoir de l'air comprimé, il faut un surpresseur ou un compresseur d'air qui lui consomme de l'énergie électrique. C'est un point négatif de ce système étant donné que la quantité d'air à compresser est relativement importante par rapport au débit de liquide pompé (consommation relativement importante en électricité). Dans la pratique, un puit est construit avant le dispositif d'air-lift, afin qu'il puisse remonter l'eau qui s'y trouve. La profondeur doit rester faible, car plus elle est grande, plus l'énergie nécessaire pour remonter l'eau sera importante.

2) Disposition

La disposition du système air-lift dans le CAHR de la station d'El Attaouia proposée dans ce point, provient du travail de Monsieur Jupsin Hugues (Ulg Arlon). Dans son travail il explore deux alternatives possibles à savoir, faire une seule grande fosse (puits) pour tout le CAHR ou faire 3 petites fosses qui seront réparties le long du chenal algal. L'avantage de la deuxième variante est qu'elle permet une meilleure répartition air/vitesse. La différence entre qu'il y a entre les deux alternatives, sera le nombre de diffuseurs par fosse et la puissance du surpresseur.

Les hypothèses faites pour le dimensionnement sont les suivantes : le diamètre des bulles vaut 3,5 mm, la vitesse cible est fixée à 10 cm/s et le besoin en air (débit d'air) se fait via le calcul par pertes de charges ($350 \text{ Nm}^3/\text{h}$).

- Pour la première variante un puits (fosse) de 10 m de large, de 4 m de long et de 2,5 m de profondeur est préconisé par Monsieur Jupsin. Pour les diffuseurs d'air, il y a par exemple des diffuseurs à membranes (production de bulles) de la marque Merrem Otto Magnum Clip (cf. site pour plus d'informations) qui ont une perte de charge max de $10 \text{ Nm}^3/\text{h} \cdot \text{diffuseurs}$. Il faudrait donc 40 diffuseurs pour cette fosse. Pertes de charges des diffuseurs au total est égale à $350 \text{ Nm}^3/\text{h}$.

Pour le surpresseur, il existe comme pour le diffuseur différentes marques. Le tableau suivant reprend les caractéristiques du surpresseur de la marque Aerzen, modèle GM 7 L-G5.

Pression différentielle (mbar)	Débit volumique (m ³ /h)	Puissance moteur (kW)	Niveau sonore, max. dB(A)
700	493	15	70

Tableau 19 : Caractéristiques du surpresseur Aerzen, GM 7 L-G5 (source : Jupsin Hugues)

- La deuxième variante prévoit donc trois fosses qui sont réparties le long du CAHR. Les dimensions des trois puits sont les suivantes : 10 m de large, 2 m de long et 2,5 m de profondeur. Etant donné qu'il y a 3 fosses les dimensions sont logiquement moins importantes que pour la première variante. La puissance du surpresseur ainsi que le nombre de diffuseurs nécessaires seront moins élevés. Avec cette configuration, 12 diffuseurs seront nécessaires et le débit par fosse sera de 120 m³/h. (exemple de surpresseur : Robushi ES15 3KW)

Le coût de l'installation et de fonctionnement du système air-lift devront être intégrés dans l'étude qui estime les coûts de la réhabilitation de la STEP.

Lagune aérée

La lagune aérée est donc la deuxième option pour compléter le traitement tertiaire des eaux de la STEP d'El Attaouia. Son rôle est identique à celui d'un CAHR.

a) Principe

La lagune aérée (« aéré facultatif ») est une version intensive du lagunage, où l'activité aérobie est augmentée par brassage et aération mécaniques, flottants ou fixes ou par insufflation d'air. (Zouhir & Jupsin, 2016c)

Le principe de fonctionnement est similaire à celui des boues activées, mais sans la recirculation de la biomasse. La concentration en microorganismes dans la lagune est donc faible et la décantation y est lente. Une fois les boues sédimentées, une dégradation anaérobie va alors s'opérer (dans les sédiments, consommation d'oxygène pour la dégradation). L'organisation de ce type de traitement se fait comme suit : d'abord une phase d'aération puis lagune de finition, plusieurs si un abattement des germes est souhaité. (Zouhir & Jupsin, 2016c) Un bassin de maturation (prévu pour éliminer les germes) étant prévu pour la STEP d'El Attaouia, il ne sera pas nécessaire de prévoir plusieurs lagunes de finition. La puissance nécessaire pour l'aération, est de l'ordre de 2 à 3 Watts/m³.

b) Dimensionnement de la lagune aérée

Le dimensionnement de la lagune aérée est similaire à celui du CAHR. Il n'y a pas de d'exigences en termes de surface nécessaire due au fait que le processus est indépendant de la photosynthèse. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) Les critères qu'il faut prendre en considération pour le dimensionnement sont le temps de rétention hydraulique et la profondeur.

1) Profondeur

La profondeur de la lagune doit être choisie de façon à satisfaire les critères suivants :

- Elle doit être compatible avec le type d'aération. On distingue deux types d'aérateurs, celui de surface et à insufflation d'air. Le deuxième permet une meilleure aération (répartition plus homogène de l'oxygène) mais à un prix plus élevé que le premier, aussi bien à l'installation qu'au fonctionnement (surpresseur à installer). La profondeur de la lagune avec un aérateur, doit être comprise entre 2,2 et 4 mètres et entre 6 et 8 avec insufflation d'air. (Piroton, 2012a)
- Il faut qu'il y ait une couche aérobie d'approximativement 2 m pour oxyder les gaz issus de la décomposition anaérobie (dans le fond de la lagune, dans les sédiments). (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) Généralement, la profondeur varie de 2,5 à 4 m.

Les deux lagunes aérées d'El Attaouia auront une profondeur qui est fixée à **1,5 m.**

2) Volume

Il existe différentes façons de déterminer le volume d'une lagune aérée. Le modèle utilisé pour le dimensionnement est basé sur charge organique applicable par unité de volume. (Zouhir & Jupsin, 2016c) :

$$S_0 \times Q - S \times Q = r \times V$$

Où, $S_0 = \text{DBO}_5$ à l'entrée (sortie des réacteurs), $S = \text{DBO}_5$ à la sortie, $V = \text{volume de la lagune}$ et $r = \frac{dS}{dt} = K \times S$

Donc on obtient le volume en isolant V dans la formule :

$$V = \frac{S_0 \cdot Q - S \cdot Q}{K \cdot S}$$

Mais on peut également l'obtenir en divisant la $\text{DBO}_5 \times 1000$ par la charge surfacique * la profondeur de la lagune.

Le volume de la première lagune avec cette formule, vaut alors **3368 m³**.

Pour le volume du second bassin, on utilise les mêmes formules mais on utilise comme DBO_5 d'entrée (S_0) celle qui sort du premier bassin (S), soit 28 mg/l. Le rendement n'est également pas identique et il est calculé avec une charge superficielle de 70 g $\text{DBO}/\text{m}^2 \cdot \text{j}$. Le rendement dans le deuxième bassin vaut alors 62 % (taux d'abattement). La DBO_5 à la sortie du deuxième bassin avec ce rendement sera égal à 10 mg DBO/l et son volume vaut **1705 m³**.

3) Largeur et longueur

Avant de pouvoir déterminer la largeur et la longueur, il faut d'abord trouver la superficie que devra avoir la lagune. Comme le volume et la profondeur sont connus, la superficie est facilement calculable et pour la première lagune **2245 m²** et **1137 m²** pour la seconde lagune.

Comme pour les autres ouvrages, il faut fixer l'une des deux grandeurs (largeur) pour connaître l'autre. Si on fixe la largeur des deux lagunes à 30 m, la longueur de la première vaut **75 m** et de la seconde **38 m**. Ces valeurs sont trop grandes et non réalistes à mettre en œuvre. Une solution est de repartir la charge sur deux lagunes aérées. Ces deux lagunes peuvent soit être mise en séries, soit en parallèles. Le fait de les mettre en série permet de diminuer le temps de rétention hydraulique dans chacune des lagunes et donc leur volume.

4) TRH

Le temps de rétention hydraulique à adopter, doit permettre un taux d'abattement de la DBO_5 satisfaisant. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) Le temps de séjour idéal varie de 5 à 10 jours. Pour la STEP d'El Attaouia, il peut être calculé en divisant le volume de la lagune par le débit que la lagune doit prendre en charge, soit 2862,75 m³/j. Le TRH dans la première lagune est de 1,6 jours et de 0,6 jours dans la seconde lagune.

b) Résumé des dimensions de la lagune aérée

Le tableau ci-dessous reprend les dimensions du CAHR de la STEP d'El Attaouia :

	Volume (m ³)	Hauteur (m)	Surface (m ²)	Longueur (m)	Largeur (m)	TRH (j)
Lagune 1	3368	1,5	2245	75	30	1,2
Lagune 2	1705	1,5	1137	38	30	0,6

Tableau 20: Dimensions des deux lagunes aérées de la STEP d'El Attaouia

c) Système d'aération

Comme déjà évoqué plus haut, il existe deux types d'aérateurs pour les lagunes aérées, celui de surface ou celui par insufflation d'air. Le choix se porte vers l'insufflation d'air pour la station d'El Attaouia. Pour connaître les dimensions que devront avoir les aérateurs, il est nécessaire de d'abord déterminer quels sont les besoins en oxygène.

Les données utilisées pour calculer les besoins en oxygène sont les suivantes :

- Facteur de correction de transfert : 1,5
- Kg d'O₂ / kg DBO₅ : 1,5
- Période d'aération (h) : 18
- Kg O₂ / Kg N-NH₄ éliminé : 4,57
- Besoins d'O₂ des sédiments (g/m².j) : 4
- Charge à l'entrée de la lagune : 247 kg/DBO/j
- Charge à la sortie de la lagune : 30 kg/DBO.j

Il faut en premier lieu, connaître la quantité d'oxygène qu'il faudra fournir aux deux lagunes.

Il est possible, avec les données ci-dessus, de déterminer la quantité d'O₂ nécessaire par jour dans la partie « liquide ou aqueuse » des lagunes. Il suffit de calculer le taux d'abattement de la DBO dans les lagunes et de le multiplier par le kg d'O₂ nécessaire par kg de DBO₅. La quantité de d'oxygène nécessaire par jour est égale à 325,64 kg.

Ensuite les besoins en oxygène des sédiments peuvent être obtenus en divisant la surface totale des deux lagunes par les besoins en g/m².j (cinquième donnée) et on obtient 13,53 kg O₂/j.

Enfin il faut déterminer la quantité d'oxygène nécessaire pour éliminer les NH₄. La quantité totale de NH₄ présente dans l'influent a été estimée à 524,75 kg NH₄/j. Pour les dégrader, il faut fournir 2398,11 kg O₂/j (multiplie la quantité par la quatrième donnée ci-dessus).

Le nombre de kilogrammes que l'aérateur devra fournir par jour est égal à **2737,28** (kg/j)

Il faut multiplier cette valeur par le facteur de correction de transfert (facteur alpha) et on obtient un besoin de **4106** kg O₂/j.

Les besoins totaux connus, il est maintenant possible de savoir combien d'O₂ les aérateurs devront fournir par heure. Il suffit de diviser la valeur trouvée juste avant par la période d'aération. Il faudra donc fournir **228,10** kg O₂/h dans les deux lagunes.

La répartition des besoins en oxygène dans les deux bassins est la suivante :

- Lagune 1
 - Besoin O₂ DBO kg/j : 377
 - Besoin O₂ Sédiments (kg/j) : 13
 - Soit un total de 390 kg O₂/j
- Lagune 2
 - Besoin O₂ DBO kg/j : 112
 - Besoin O₂ NH₄ kg/j : 3597
 - Besoin O₂ Sédiments (kg/j) : 7
 - Soit un total de 3716 kg O₂/j

Le nombre de tubes par lagune est obtenu en divisant les besoins en O₂ dans la lagune par les besoins totaux (somme des 2 lagunes) multipliés par le nombre total de tubes nécessaires. Le nombre de tubes nécessaire est calculé en fonction du débit d'air nécessaire (en fonction des besoins totaux en oxygène). On obtient ainsi que 90 tubes sont nécessaires pour la première lagune et 859 pour la seconde.

2) Bassins de maturation

a) Rôle

Le bassin de maturation a pour rôle d'assainir les eaux en éliminant les germes pathogènes (coliformes fécaux) qu'elles contiennent. Il doit être dimensionné de telle sorte que le temps de séjour de l'eau soit le plus long possible pour que les germes pathogènes soient exposés le plus longtemps à l'énergie solaire (photo-inhibition). Il faut donc que la profondeur du bassin ne soit pas trop élevée, pour permettre une pénétration des rayons lumineux dans l'eau. Le temps de séjour est généralement pris égal à 5 jours. (Boughanzai, Merzouki, & Ouzina, 2012)

b) Dimensionnement

1) Volume

Le paramètre qui influence la performance épuratoire est encore une fois le temps de rétention hydraulique. Le volume que devra avoir le bassin de maturation est donné par la formule

$$V = Q \times TRH$$

Il faut donc déterminer le temps de rétention hydraulique nécessaire pour maximiser l'élimination de pathogènes. Le TRH peut être calculé grâce à la formule de Marais qui prédit la concentration de coliformes fécaux à la sortie du bassin. Le TRH est donné par la formule suivante :

$$TRH = \frac{Ni - Ne}{Ne \times Kt}$$

Où, Ni = concentration en coliformes fécaux à l'entrée du bassin, Ne = concentration en coliformes fécaux à la sortie du bassin et Kt qui est déterminé avec la formule suivante :

$$Kt = 2,6 \times 1,19^{T-20}$$

Où le T = la température moyenne, soit 25 °C.

La résolution de l'équation donne un Kt de **6,2**, reste à déterminer Ni et Ne. La concentration à la sortie du bassin est donnée par les normes de rejets. En effet dans la littérature, il est précisé que si les eaux sont destinées à l'irrigation, la concentration en coliformes fécaux doit être inférieure à **1000 CF/100 mL**. (Boutayeb & Bouzidi, 2013) L'eau étant une ressource relativement rare, utiliser l'eau des STEP pour l'irrigation est une idée judicieuse. Pour le dimensionnement, il sera supposé que l'eau de la station est utilisée pour l'irrigation.

Pour la concentration des coliformes à l'entrée du bassin (Ni), elle est prise égale aux valeurs mesurées à la STEP de Marrakech (référence) et vaut 27000 Ulog/100 mL.

Les termes vont pouvoir être remplacés dans l'équation de base et le temps de rétention hydraulique déterminé, soit **4,2** jours.

Le temps de rétention connu, il est maintenant possible de déterminer le volume que devra avoir le bassin de maturation : **19791 m³**.

2) La profondeur

Comme expliqué au point précédent, la profondeur du bassin ne doit pas être trop importante. Elle sera fixée à 1 mètre pour le bassin de la STEP d'El Attaouia.

3) La surface

La surface qu'occupera le bassin de maturation est facilement calculée avec le volume et la profondeur. La surface nécessaire est de **19791 m²**.

4) Forme

Le bassin de maturation de la station sera organisé en serpentin car c'est une forme qui permet d'assurer de bonnes conditions hydrauliques. Trois bassins séparés seront nécessaires, d'une largeur de **15 mètres** et d'une longueur de **147 mètres** en moyenne. L'eau passera d'un bassin à l'autre via un système de trop plein. Ils doivent être organisés de telle manière que l'écoulement se fasse par gravité. Chaque bassin a une superficie de **2205 m²**.

5) Résumé des dimensions

Le tableau ci-dessous reprend les différentes grandeurs du bassin de maturation de la STEP d'El Attaouia :

Surface (m ²)	Profondeur (m)	Largeur (m)	Nbr.	Longueur (m)	Surface/bassin (m ²)
19791	1	15	3	146,6	2199

Tableau 21 : Dimensions des bassins de maturation de la STEP d'El Attaouia

3.2. Production de résidus d'épuration dans les différents ouvrages

La plupart des processus d'épuration produisent des déchets qu'il faudra traiter, éliminer. Il s'agit principalement de sables et de boues. Il est possible d'estimer leur production grâce à des formules empiriques. Bien que les réacteurs RAFADE aient été abandonnés, cette partie comprend une estimation de la production de boues et de biogaz, à titre de comparaison avec les UASB

3.2.1. Prétraitement

1) Dégrilleur

Le dégrilleur va principalement bloquer des matières inertes comme des déchets ménagers (plastiques, emballages, ...), des pierres, des gros bois, etc. Le dégrilleur de la STEP d'El Attaouia étant un dégrilleur manuel, ces déchets devront être enlevés par l'opérateur présent sur place afin d'éviter un colmatage (qui ne permettrait plus au dégrilleur de fonctionner correctement). La fréquence du nettoyage est difficilement prévoyable et dépend de la charge présente dans les eaux usées brutes.

2) Dessableur

Il est possible d'estimer grossièrement la production annuelle de sables sur base de données issues de STEP existantes. Elle est estimée, dans la littérature, entre 2 et 15 litres par an et par habitant. Ces données sont peu précises mais permettent d'avoir un ordre de grandeur. (A.G., 2002; hmf.enseeih, 2015)

Pour avoir la production en m³, il suffit de multiplier les deux valeurs par l'estimation du nombre d'habitants pour l'année 2030, soit 52475 habitants.

Pour avoir l'ordre de grandeur, la production sera calculée pour ces deux valeurs, selon la projection. La production annuelle de sables de la STEP d'El Attaouia, se situera donc théoriquement entre **262** et **787 m³**.

3) Réacteurs anaérobie

Pour rappel aucun système d'extraction des boues n'est prévu pour les RAFADE. Le curage de ce type de réacteur se fait tous les 4 à 5 ans.

a) RAFADE

La quantité de boues produite dans les RAFADE, dépend des MES admises ou éliminées par le réacteur. (Hamouri, 2005) Le RAFADE génère 0,22 g MES/g DCO admise ou 0,28 g MES/ g DCO éliminé. Le calcul sera effectué séparément pour les réacteurs en série (1 calcul pour les R1 et un calcul pour les R2).

- Production boue R1

La quantité de DCO éliminée dans les premiers réacteurs (quatre R1) vaut 496,1 g/m³. Le débit entrant étant de 4722,75 m³, la quantité de DCO éliminée dans les réacteurs vaudra 2342,96 kg. Avec cette charge on peut déterminer la production de boue dans les réacteurs, soit **656,02 kg/j.**

- Production de boue R2

La quantité de DCO éliminée dans les R2 vaut 101,5 g/m³. La charge totale admise est obtenue en multipliant la DCO éliminée et le débit entrant, 4722,75 m³. La quantité de boue produite vaut **134,22 kg/j.** Cette valeur est à répartir entre les 4 réacteurs RAFADE qui sont en parallèles.

b) UASB

La production journalière de boue solide peut être déterminée mathématiquement avec la formule suivante :

$$P_s = Y \times DCO$$

Où, Y = coefficient de production de solide (kgTSS/kgDCO) et DCO = La charge appliquée au réacteur (kg DCO/j)

Les valeurs du Y pour le traitement d'eaux usées domestiques varient entre 0,10 et 0,20 kgTSS/kg DCO. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005)

Si on prend une valeur de Y, de 0,15 kg TSS/kg DCO (par sécurité) on aura une production de boue en matière sèche égale à : $4260 \times 0,15 = 639 \text{ kg MS/j}$

Comme expliqué plus haut, ce ne sont que les boues en excès qui sont extraites des réacteurs.

La quantité de boue en excès (extraites du réacteur) en matières sèches produite, se situe entre 30 et 50 g MS/kg de DCO éliminé. La quantité en excès liquides correspondantes varie de 0,3 à 0,5 l/kg de DCO éliminé. (Agence de l'eau Adour Garonne, 2006)

Sachant que 2981,94 kg de DCO sont éliminés par jour, la quantité de boues en excès varie entre **89,46 et 149,10 kg/j.** Cette quantité est à répartir entre les trois réacteurs

La concentration des boues en excès est comprise entre 90 et 100 g/l (après décantation de 10 minutes). (Agence de l'eau Adour Garonne, 2006)

3.3. Production de méthane dans les réacteurs anaérobies

Le but de cette partie est d'estimer la quantité de méthane qui sera produite dans les différents réacteurs anaérobies. Cette évaluation permettra de définir s'il est justifié ou non, sur le plan économique, de mettre en place un réseau de collecte du biogaz avec un moteur (valorisation). Le moteur utilisera le biogaz pour produire de l'énergie, servant par exemple à maintenir dans les réacteurs une température optimale en hiver et éviter les trop grands écarts été-hiver.

Dans le cas où la production est suffisante pour justifier économiquement la collecte et l'utilisation du biogaz, le système comportera : des tuyaux collecteurs, un compteur de biogaz, un compartiment avec joint hydraulique et un brûleur de biogaz (si trop de gaz pour stocker) et un réservoir. (Sperling & Lemos Chernicharo, 2005) Le brûleur doit être suffisamment éloigné du réacteur par mesure de sécurité.

a) UASB

L'évaluation de la production de biogaz peut se faire à partir de la concentration estimée en DCO de l'influent. Il est possible de déterminer (de manière simplifiée) la conversion de la DCO en méthane à l'aide de la formule suivante :

$$DCO_{CH4} = Q \times (S_0 - S) - Y_{obs} \times Q \times S_0$$

Où, Q = le débit journalier entrant dans la STEP, S_0 = concentration en DCO de l'influent, S = concentration en DCO de l'effluent et Y_{obs} = le coefficient de production de solides en termes de DCO

Le Y_{obs} pour les eaux usées domestiques varie de 0,11 à 0,23 kg DCO_{boue}/kg DCO_{appl.}

Tous les termes sont connus, il suffit de les remplacer dans l'équation :

La production de biogaz dans les réacteurs UASB se situe entre 2215,16 et 2726,34 kg par jour. Pour avoir le nombre de mètres cubes, il faut utiliser cette formule :

$$Q_{CH4} = DCO_{CH4}/K(t)$$

Où K(t) = le facteur de correction pour la température de fonctionnement du réacteur.

$$K(t) = \frac{P \times KDCO}{R \times (273 + T)}$$

Où, P = pression atmosphérique (1 atm), KDCO = DCO correspondant à une mole de CH₄ (64 gDCO/mol, R = constante du gaz (0,08206 atm.L/mole.K) et T = température de fonctionnement du réacteur (25 °C).

NB : la température de fonctionnement est une moyenne, en été elle peut augmenter au-dessus des 35°C et baisser jusqu'à 15 °C en hiver. On aura une surproduction de biogaz en été et une sous-production en hiver. Ces écarts peuvent être atténués dans le cas où le moteur est installé avec un système de chauffage, qui maintiendrait la température en hiver aux alentours des 25 °C.

Le K(t) ainsi calculé, vaut **2,57** kg DCO/m³.

Le volume théorique de méthane produit par jour peut alors être déterminé, en remplaçant les termes dans l'équation : il varie de **852** à **1048** m³/j.

A partir de la production théorique du méthane il est possible d'estimer la production totale de biogaz par jour. La fraction de méthane dans le biogaz est de l'ordre de 80%

Remarques : Pour savoir si l'installation d'un système de valorisation du biogaz (collecte et d'un moteur) est justifiée économiquement (amortissement du coût de l'installation), une étude plus approfondie est nécessaire. Il faut encore une fois préciser qu'il s'agit de la production théorique de méthane et que ces valeurs peuvent plus ou moins différer des chiffres réels. Cette estimation est donc à prendre avec précaution et non comme argent comptant.

b) RAFADE

Pour déterminer la production de biogaz dans les réacteurs RAFADE, les mêmes principes et équations que pour les UASB seront utilisées. C'est donc via l'élimination de la DCO dans les réacteurs que la production sera déterminée. La formule est la même que pour les UASB :

$$\text{DCO}_{\text{CH}_4} = Q \times (S_0 - S) - Y_{\text{obs}} \times Q \times S_0$$

Où, Q = le débit journalier entrant dans la STEP, S_0 = concentration en DCO de l'influent, S = concentration en DCO de l'effluent et Y_{obs} = le coefficient de production de solides en termes de DCO

Dans ce cas-ci il faudra réaliser deux calculs, un pour les réacteurs R1 et un pour les R2, les concentrations à l'entrée et à la sortie n'étant pas identiques.

- **R1**

Le S_0 à l'entrée des R1 est égal à 0,902 kg DCO/m³ et le S (concentration à la sortie), 0,406 kg/m³. Le débit moyen journalier est connu et le Y_{obs} varie entre 0,11 à 0,23 kg DCO_{boue}/kg DCO_{appl.}.

Le DCO_{CH₄} des R1 (premier des deux en séries) varie donc entre 1363,17 et 1874,36 kg/m³.

- **R2**

Pour les deuxièmes réacteurs, le S_0 est égal à la concentration à la sortie des premiers soit 0,406 kg/m³. La concentration de la DCO à la sortie des R2 vaut 0,304 kg/m³. Le Y_{obs} et le débit entrant restent les mêmes, ce qui donne un DCO_{CH₄} qui varie entre **38,34** et **268,37** kg/m³ pour les R2.

Il faut maintenant calculer le volume théorique de méthane produit dans les R1 et R2. La formule est à nouveau la même que pour les UASB, à savoir :

$$Q_{\text{CH}_4} = \text{DCO}_{\text{CH}_4} / K(t)$$

Où K(t) = le facteur de correction pour la température de fonctionnement du réacteur.

Le Kt est le même que pour les UASB (ne dépend que de la température de fonctionnement des réacteurs qui sera la même que pour les UASB), soit 2,60 kg DCO/m³

- **R1**

En remplaçant les termes dans l'équation on obtient un volume journalier qui varie de 524 et 721 m³/j.

- **R2**

Le volume théorique de méthane produit par jour dans les R2, varie entre 15 et 103 m³/j.

Si on additionne ces résultats on aura une production journalière de 425 m³/j de méthane.

Les remarques faites pour les UASB sont également d'application pour les RAFADE. Une étude plus approfondie est nécessaire pour déterminer la pertinence de l'installation d'un système de valorisation du biogaz.

3.3. Organisation générale de la nouvelle station d'El Attaouia

Les deux schémas qui suivent ont été réalisés par Eloë Sadatchy. On peut y voir l'organisation générale de la station en fonction des deux options : nouveau CAHR ou lagune aérée.

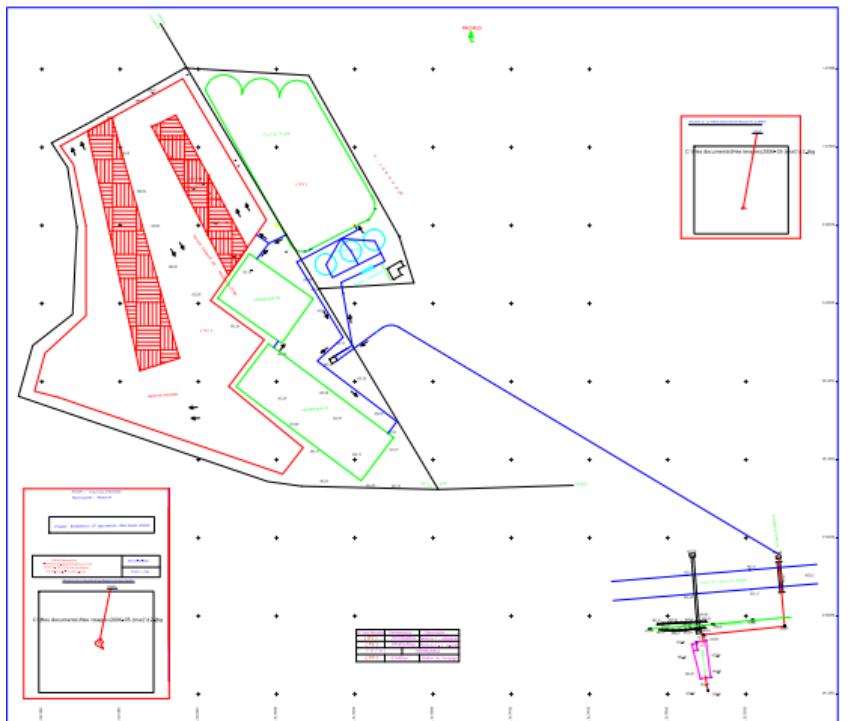


Figure 30: Schématisation de l'organisation générale de la STEP d'El Attaouia, avec l'option lagune aérée (auteur : Eloë Sadatchy)

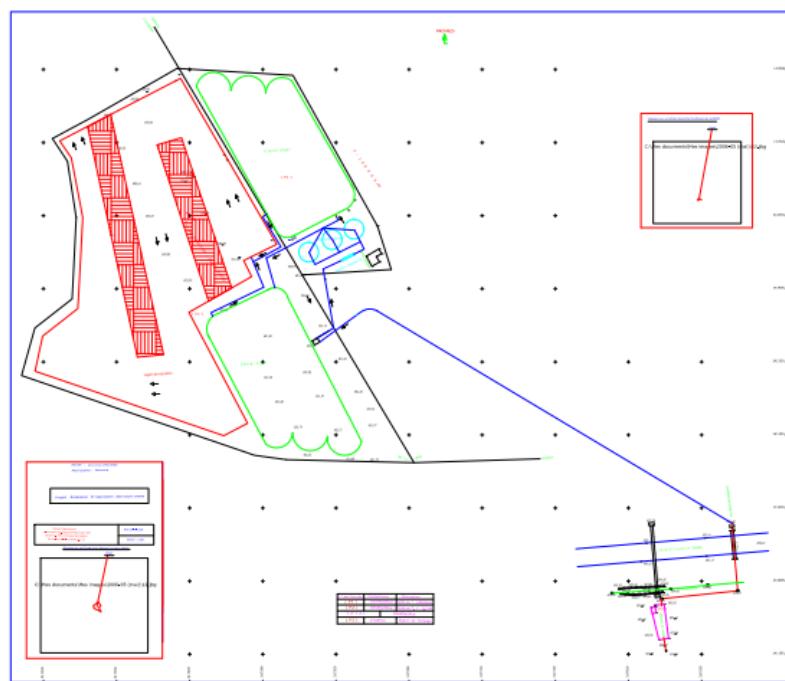


Figure 31 : Schématisation de l'organisation générale de la STEP d'El Attaouia, avec l'option nouveau CAHR (auteur : Eloë Sadatchy)

Ces deux organisations ne sont bien entendu pas définitives et ne servent qu'à donner une idée ce à quoi la STEP d'El Attaouia pourrait ressembler.

Si on additionne les surfaces des différents éléments dimensionnés pour la réhabilitation de la STEP d'El Attaouia, on arrive à une superficie requise de 4,25 hectares (42492,94 m²).

Conclusion

A la suite de l'étude effectuée au cours de ce travail, il est possible de proposer la stratégie suivante de réhabilitation pour la station d'El Attaouia. Elle devra avoir la configuration suivante : un dégrilleur à nettoyage manuel, un dessableur double à nettoyage manuel, trois réacteurs anaérobies de type UASB, le chenal algal existant remis en état, additionné de deux lagunes aérées suivi de trois bassins de maturation.

Cette configuration est donc destinée à traiter les eaux usées de la commune d'El Attaouia pour au moins jusqu'en 2030. La population, pour cette année est estimées par les autorités locales, à 52475 habitants.

La superficie minimale requise pour les différentes unités de traitement qui ont été dimensionnés sur base des projections pour l'année 2030, est de 4,25 hectares (42492,94 m²)

Une étude ultérieure devra estimer le coût total de cette réhabilitation. Il faut également que toute la station soit organisée de telle sorte que l'eau puisse la traverser uniquement par écoulement gravitaire.

Cette étude est une proposition de réhabilitation pour la STEP, libre à la commune d'El Attaouia de ne pas suivre ces conseils et d'opter pour une organisation différente de la station ou d'opter pour d'autres types de traitements. Mais les choix fait dans ce travail se basent sur l'expérience dans le domaine de l'épuration de l'équipe de l'Ulg Arlon et a tenté de concilier efficacité et coût raisonnablement bas. Je pense donc que ce soit le choix le plus approprié pour épurer les eaux usées domestiques de la commune d'El Attaouia.

Bibliographie

A.G., S. (2002). *Méthode de calcul d'une filière de traitement "boues activées - très faible charge - nitrification et dénitrification - traitement du phosphore"*

Abdelhadi, M. (2006). *Performances et dimensionnement du réacteur anaérobio à flux ascendant à deux Etages (RAFADE) : de la station prototype de l'IAV à la station d'El Attaouia*. Marrakech.

Agence de l'eau Adour Garonne. (2006). La méthanisation des effluents industriels : Retours d'espérience sur le bassin Adour-Garonne. *Les études de l'Agence de l'eau Adou-Garonne*.

Akvopedia. (2015). Digesteur anaérobio à flux ascendant. *Digesteur anaérobio à flux ascendant* . Retrieved July 25, 2017, from http://akvopedia.org/wiki/Digesteur_anaérobio_à_flux_ascendant

AQUAcorp. (n.d.). Réacteur UASB : traitement anaérobio des eaux - AQUA Corp. Retrieved July 3, 2017, from <http://www.aquacorp.fr/traitement-anaerobie-reacteur-uasb>

Boughanzai, L., Merzouki, M., & Ouzina, A. (2012). Dimensionnement d'une station d'épuration de type lagunage naturel au centre d'Ain Cheggag, Fès, Maroc. *Revue Agrobiologia*, 2(29), 5.

Boutayeb, M., & Bouzidi, A. (2013). Optimisation du dimensionnement des bassins d'épuration par lagunage naturel dans la région de la Chaouia Ouardigha-Maroc. *Nature & Technologie*, 10, 6.

Elan ingénierie & consulting SARL. (2016). *Étude de la réhabilitation et la mise en marche de la Station d'Epuration de la Commune Territoriale El Attaouia*. Marrakech.

Hamouri, B. El. (2005). *Réacteur Anaerobie et Chenal à Haut Rendement : Pour l'épuration des eaux usées des petites communautés*.

hmf.enseeiht. (2015). Dimensionnement des unités de traitement. Retrieved July 6, 2017, from <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/2369>

hmf.enseeiht.fr. (n.d.). Dimensionnement des dégrilleurs. Retrieved July 5, 2017, from <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/bei/beiere/book/export/html/1427>

KPELI, K. M., & CAMARA, A. (2010). *Station de l'IAV Hassan II ; treize ans après sa mise en fonctionnement: performances du réacteur anaérobio à flux ascendant à deux étages (RAFADE) et devenir de l'azote dans le chenal algal à haut rendement*. Rabat.

Moletta, R. (2002). *Technologies du traitement des effluents par méthanisation*.

Nacir, S., Ouazzani, N., Vasel, J.-L., Jupsin, H., & Mandi, L. (2010). Traitement des eaux usées domestiques par un chenal algal à haut rendement (CAHR) agité par air lift sous climat semi-aride. *Revue des sciences de l'eau*, 23(1), 57. Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE).

Piroton, S. (2012a). *Epuration des eaux usées*. La Reid.

Piroton, S. (2012b). *Epuration des eaux usées complément*. La Reid.

Sadowski, A.-G. (2006). *Exemple de calcul d'une filière de traitement biologique de type boue activée avec nitrification/dénitrification & déphosphatation physico-chimique*.

SCRIBD. (2011). Dimensionnement dessableur. Retrieved July 10, 2017, from <https://fr.scribd.com/doc/52083215/dimensionnement-dessableur>

Sperling, M. Von, & Lemos Chernicharo, C. A. De. (2005). Biological Wastewater Treatment in Warm Climate Regions. *IWA Publishing*, 1–856.

SSWM, Eawag, & Spuhler, D. (2015). UASB Reactor. *SSWM*. Retrieved August 19, 2017, from <http://www.sswm.info/category/implementation-tools/wastewater-treatment/hardware/semi-centralised-wastewater-treatments/u>

Sy, S., & Tall, P. S. (2003). *Etude de réhabilitation de la station d'épuration de Saly Portudal*. Dakar.

TriMatic. (n.d.). Tables des masses volumiques de diverses substances. Retrieved July 10, 2017, from http://cfppah.free.fr/docs/Table_des_masses_volumiques.pdf

UVED. (2013). Module d'enseignement ASTEP - Le dégrillage. Retrieved July 5, 2017, from http://uved-ensil.unilim.fr/co/Le_degrillage.html

Wikipédia. (n.d.). *Fluid mechanics* (6th ed.). McGraw-Hill.

Wikipédia. (n.d.). Airlift. Retrieved August 19, 2017b, from <https://fr.wikipedia.org/wiki/Airlift>

Zouhir, F., & Jupsin, H. (2016a). *Séparation liquide-solide par décantation*. Arlon.

Zouhir, F., & Jupsin, H. (2016b). *Cultures anaérobies*. Arlon.

Zouhir, F., & Jupsin, H. (2016c). *Lagunage aéré : Théorie et technologie*. Arlon.