

Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II



# Réacteur Anaérobie et Chenal à Haut Rendement

Pour l'épuration des eaux usées des petites communautés



**Réalisation, exploitation et performances**

**Bouchaïb El Hamouri**

**Ce document est préparé avec le soutien de  
l'Organisation Mondiale de la Santé,  
Centre Régional des Activités pour la Santé de l'Environnement  
(CEHA), Amman, Jordan**

## Sommaire

Préface	
Remerciements	
Introduction	11
1. Principes à la base du développement de la technologie RACHAHR	12
1.1. Limites du bassin anaérobie découvert	12
1.2. Limites du Chenal algal à haut rendement utilisé en mode secondaire/tertiaire	13
1.3. Approche adoptée pour la mise au point de la technologie RACHAHR	15
1.3.1. Principes de base	15
1.3.2. Opter pour les réacteurs anaérobies à haut rendement	16
1.3.3. Opter pour le Chenal algal à haut rendement conduit en mode tertiaire	16
2. Application de la technologie RACHAHR	19
2.1. L'unité de prétraitement ou le RAFADE	19
2.1.1. Les réacteurs $R_1$ et $R_2$	20
2.1.2. Collecte de biogaz et système anti-odeur	21
2.1.3. Le décanteur	22
2.1.4. Le filtre à gravier	23
2.2. L'unité de Post-traitement	
2.2.1. Le Chenal algal à haut rendement	24
2.2.2. Le bassin de maturation	25
2.3. Exigence en superficie	25
3. Performances de la station de l'IAV	25
3.1. Performance de l'unité de pré-traitement	25
3.1.1. Stabilité et homogénéité du contenu des réacteurs	26
3.1.2. Performances des réacteurs	27
3.1.2.1. Expression de la performance des réacteurs	27
3.1.2.2. Élimination des particules de boue	27
3.1.3. Rôle spécifique des réacteurs $R_1$ et $R_2$	29

3.2. Performance de l'unité de post-traitement	31
3.2.1. Élimination des nutriments (N et P)	31
3.2.2. Abattement des pathogènes	36
3.2.2.1. Élimination des œufs d'helminthes	36
3.2.2.2. Élimination des coliformes fécaux	36
4. Dimensionnement et exploitation	37
4.1. Dimensionnement des réacteurs	37
4.1.1. Volume du réacteur	37
4.1.2. Forme géométrique	37
4.1.3. Profondeur du réacteur	37
4.1.4. Distribution de l'influent et collecte de l'effluent	38
4.1.5. Collecte du biogaz et système anti-odeur	39
4.2. Dimensionnement du CAHR	40
4.2.1. Forme géométrique	41
4.2.2. Roue à palettes	41
4.3. Dimensionnement du bassin de maturation	42
4.4. Paramètres de conduite	42
4.4.1. Caractéristiques des eaux usées et charge volumique	42
4.4.2. Concentration et âge des boues	43
4.4.3. Profil des boues dans le réacteur	44
4.4.4. Évacuation des boues des réacteurs	44
4.4.5. Lits de séchage des boues	45
5. Personnel et procédure d'exploitation et de maintenance	46
5.1. Qualification du personnel	46
5.2. Procédure pour l'exploitation et la maintenance	46
5.3. Procédure pour remédier aux dysfonctionnements	46
6. Conditions d'applicabilité de la technologie RACHAHR	47
6.1. Rareté et qualité de l'eau	47
6.2. Groupes-cible pour la dissémination	48
6.3. Conditions climatiques	48
6.4. Infrastructure recommandée	48
6.5. Budget d'exploitation et de maintenance	48

7. Coût d'exploitation et de maintenance	51
8. Réutilisation de l'effluent	51
Références	54
Annexe 1	56
Dimensionnement et exemple de plans d'exécution	
Annexe 1.1. Programme Excel pour le dimensionnement de La technologie RACHAHR	
Annexe 1.2. Exemple de plans d'exécution pour d'une station pour 500 habitants.	
Annexe 2	64
Procédure d'exploitation et de maintenance	
Annexe 3	84
Coût de construction prévisible	
Annexe 4	87
Procédure pour remédier aux dysfonctionnements	
Annexe 5	95
Réutilisation de l'effluent	
Annexe 6	100
Album photos	

## Liste des figures

Figure 1.	Principe de fonctionnement du CAHR selon le modèle Oswald.	15
Figure 2.	Fonctionnement du CAHR conduit en mode strictement tertiaire.	17
Figure 3.	Enregistrement continu de l'OD (bleu) et de la température de l'eau dans le CAHR pendant la période la plus froide de l'année.	18
Figure 4.	Schéma de la station d'épuration de l'IAV.	20
Figure 5.	L'unité de pré-traitement.	21
Figure 6.	Distribution de la taille des grains du filtre à gravier.	24
Figure 7.	Moyenne de la température de l'influent et de l'effluent.	25
Figure 8.	Température et pH des réacteurs enregistrés en saison froide à la profondeur de 3 m.	26
Figure 9.	Moyenne annuelle du profil pH dans les réacteurs R <sub>1</sub> et R <sub>2</sub> .	26
Figure 10.	Taux d'abattement de la DCO obtenus sur le RAFADE pendant une période de suivi de 5 ans.	29
Figure 11.	DCO appliquée et enlevée par les réacteurs R <sub>1</sub> et R <sub>2</sub> .	30
Figure 12.	Bilan de l'azote dans le CAHR.	33
Figure 13.	Valeurs du rapport NH <sub>3</sub> /NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> et pH enregistrés sur le CAHR.	34
Figure 14.	Bilan du phosphore dans le CAHR conduit comme unité de traitement tertiaire.	34
Figure 15.	Phosphore précipité en fonction de la valeur du pH dans le CAHR.	35
Figure 16.	Distribution de l'influent et collecte de l'effluent dans les réacteurs.	38
Figure 17.	Détails de placement des conduites à l'intérieur du réacteur.	39
Figure 18.	Système anti-odeurs du RAFADE.	40
Figure 19.	Détails de la roue à palettes.	42
Figure 20.	Profil des boues dans les réacteurs.	44

## Liste des tableaux

Tableau1.	Valeurs de $k_{20^{\circ}\text{C}}$ d'élimination de la DCOt, de l'azote et du phosphore obtenues sur le CAHR.	17
Tableau2.	Paramètres recommandés pour la conduite du CAHR en mode strictement tertiaire.	19
Tableau3.	Dimensions et paramètres de conduite du RAFADE.	22
Tableau4.	Performance moyenne de la ligne R1 + R2 + décanteur.	28
Tableau5.	Effet du filtre à gravier sur la qualité de l'effluent final du RAFADE.	29
Tableau 6.	Caractéristiques physico-chimiques importance pour la digestion anaérobique dans les réacteurs $R_1$ et $R_2$ .	31
Tableau 7.	Performances moyennes du CAHR.	32
Tableau8.	Rôle et performances du bassin de maturation.	35
Tableau 9.	Groupes cibles pour la dissémination de la technologie RACHAHR (Maroc comme exemple).	49
Tableau10.	Coût d'exploitation pour une capacité de 1000 personnes.	52
Tableau11.	Directives recommandées pour la qualité microbiologique des eaux usées utilisées dans l'agriculture.	53

### Abréviations et acronymes

AGR	: Administration du Génie Rural.
AGV	: Acides gras volatiles.
BDS	: Bassins de stabilisation.
BM	: Bassin de maturation.
CAHR	: Chenal algal à haut rendement.
CEHA	: Centre Régional des Activités pour la Santé de l'Environnement, Amman, Jordan.
CF	: Coliformes fécaux.
RACHAHR	: Réacteur Anaérobie et du CHenal A Haut Rendement.
DBO <sub>5</sub>	: Demande biochimique en oxygène à 20°C en 5 jours.
DCO	: Demande chimique en oxygène.
DCost	: DCO sur échantillon décanté.
DCot	: DCO totale.
EMRO	: Bureau Régional de la Méditerranée Orientale (OMS).
IAV	: Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II.
k <sub>20°C</sub>	: Constante de vitesse de réaction de premier ordre à 20°C.
MENA	: Pays du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord.
MES	: Matières en suspension.
MSV	: Matières en suspension volatiles.
NTK	: Azote total Kjeldhal.
OD	: Oxygène dissous.
OMS	: Organisation mondiale de la santé.
ONEP	: Office National d'Eau Potable.
RAFADE	: Réacteur Anaérobie à flux Ascendant et à Deux Etapes.
SGSS	: Small-bore gravity sewer system.
TPM	: Tour par minute.
TRH	: Temps de rétention hydraulique.
UASB	: upflow anaerobic sludge blanket reactor.
WHO	: World health organization.

### **Préface**

L'assainissement liquide et l'épuration des eaux usées connaissent un retard important dans les pays du Moyen Orient et de l'Afrique du Nord (MENA). A titre d'exemple, les nouveaux concepts sur l'assainissement durable, les systèmes décentralisés, la réutilisation des eaux usées et le recyclage des nutriments sont rarement exploités. La dissémination de toute expérience positive dans ce domaine pourrait être bénéfique pour toute la région.

Les épisodes répétitifs de sécheresse qu'ont connu ces pays durant les dernières décennies ont accéléré la migration des populations rurales vers les villes où ils ont développé des zones d'habitation périphériques souvent dépourvues d'infrastructures et d'équipements municipaux.

Pour faire face à cette situation, les gouvernements ont dû faire des efforts importants pour maintenir les populations rurales dans les villages en favorisant l'électrification et l'approvisionnement en eau potable. A titre d'exemple, l'approvisionnement en eau potable des populations rurales au Maroc est passé de 14% en 1994 à plus de 50% en 2004.

Toutefois, ces efforts n'ont pas toujours été accompagnés d'un développement parallèle de l'assainissement. Le différentiel entre le rythme de mise en place des réseaux d'alimentation en eau et celui des investissements réservés à l'assainissement et à l'épuration des eaux usées reste important, d'où l'intérêt, pour rattraper le retard, de recourir aux technologies extensives, ou à faible coût, tant au niveau de la collecte qu'au niveau de l'épuration.

Par ailleurs, les pratiques alternatives capables de faire face à des capacités croissantes et servir des communautés plus importantes (plusieurs centaines ou milliers de foyers) doivent être mises en oeuvre là où l'assainissement individuel ou groupé a montré ses limites.

De même et pour être en concordance avec la tendance actuelle en matière de gestion rationnelle des ressources en eau et de respect de l'environnement, les solutions destinées aux petites communautés rurales doivent remplir les exigences suivantes :

- Faible investissement
- Faible exigence en superficie à couvrir
- Simplicité de construction et d'exploitation
- Production réduite de boues
- Transformation de la matière organique en énergie utilisable
- Minimisation du coût de collecte et de convoyage
- Recyclage des nutriments pour la production agricole
- Conservation de l'eau à travers une réutilisation en agriculture ou dans les usages urbains (espaces verts, lavage des rues)

Ce document décrit la mise au point d'une technologie à faible coût destinée aux petites communautés au Maroc. Cette technologie peut être appliquée dans la plupart des pays de la région MENA. Cependant, son adoption ne saurait seule répondre à l'ensemble des exigences présentées ci-dessus. Les conditions vi), vii) et viii) ne pourraient être satisfaites que dans le cadre, plus large, d'une approche basée sur une gestion durable des ressources en eau considérant, notamment, les eaux usées comme une ressource réutilisable.

Pr. Bouchaïb El Hamouri  
Novembre 2004

## Remerciements

L'auteur voudrait remercier Le Centre Régional des Activités pour la Santé de l'Environnement (CEHA) à Amman et le Bureau Régional de la Méditerranée Orientale (EMRO) de l'OMS pour avoir permis la réalisation de ce document.

L'auteur exprime sa gratitude à M. Hamed Bakir, conseiller pour la santé et l'environnement ruraux et Dr. Ali Khan, Directeur du CEHA, qui ont eu l'idée de la dissémination de l'expérience marocaine et qui ont dégagé les fonds nécessaires à cette activité.

La mise au point de la technologie décrite dans ce document n'aurait pas été possible sans l'appui de Dr. M'Hamed Sedrati, ancien directeur de l'Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II (IAV) et Tayeb Benchokroun de l'Administration du Génie Rural (AGR), Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural. L'auteur reconnaît également l'aide appréciable qu'il a reçue de la part de la Direction et du personnel de l'IAV.

Les recherches ayant mené à la mise au point de la technologie RACHAHR ont été, en grande partie, financées par l'IAV, l'AGR, le Fonds de Recherche Appliquée belge (FRAB) et la Commission de l'Union Européenne (projets Avicenne et INCO).

Plusieurs chercheurs, ingénieurs, étudiants et collaborateurs ont contribué à la mise au point de la technologie RACHAHR. L'auteur voudrait, en particulier, citer le travail des personnes suivantes :

Fatiha El Hafiane, Ahmed Rami, Robert Deal, Naima Rhallabi, Jamaledine Jellal et ses collaborateurs, Khalid Khallayoune, Mehdi Chalabi, Abdelghani Benkerroum, Rajaa Kessab, Soumeya Guedira, Jean Luc Vassel et ses collaborateurs. Mohamed Marghich, Lahoucine Berraoui, Mohamed Zakour and Fatiha Boulainaine.

### Introduction

L'idée de mettre au point la technologie basée sur la Combinaison du Réacteur Anaérobie et du Chenal à haut Rendement (RACHAHR) a pris naissance, il y a 15 ans, à la suite d'un travail de recherche initié à l'IAV de Rabat pour le traitement des eaux usées dans le chenal algal à haut rendement (CAHR) développé par le professeur W.J. Oswald à l'Université de Berkeley en Californie aux Etats Unis.

Rapidement, la nécessité d'ajouter un bassin anaérobie en amont du CAHR s'était imposée ce qui avait conduit à la construction d'une unité expérimentale associant un bassin anaérobie à un CAHR. Plus tard, le système fut complété par l'adjonction d'un bassin de maturation, placé en aval du CAHR, pour la désinfection de l'effluent.

En 1992, le système développé a été construit à grande échelle, côte à côte avec une filière de bassins de stabilisation (BDS) à Ouarzazate (El Hamouri *et al.* 1995 ; Actes, MOR 86/018, 1998). La comparaison de ces deux systèmes a conduit à la conclusion que le CAHR était plus performant que la série de trois bassins facultatifs des BDS et partant, une économie de superficie couverte d'au moins 40% pouvait être obtenue par rapport à ces derniers (El Hamouri *et al.* 2003).

Ce résultat nous a incité à poursuivre le travail sur l'adaptation du CAHR aux conditions marocaines. Mais, la très mauvaise adhésion des populations avoisinantes au projet de Ouarzazate, notamment à cause des émissions persistantes des mauvaises odeurs, a conduit à modifier le système. Les bassins anaérobies ouverts ont alors été remplacés par des réacteurs couverts donnant ainsi naissance de la technologie RACHAHR, dont la première station fut construite à l'IAV, Rabat en 1996.

Sur le plan de la conception, on peut résumer le principe de base ayant présidé à la mise au point de la technologie RACHAHR en quelques points. Il s'agit de combiner, dans l'ordre, un réacteur anaérobie, entièrement couvert à un réacteur aérobie, les deux étant des unités à haut rendement de telle manière que les principales fonctions biologiques, impliquées dans la dégradation des déchets, puissent être, plus ou moins, séparées et confinées dans des espaces limités pour éviter les inhibitions réciproques et la dilution.

Parallèlement et sur le plan hydraulique, l'approche a consisté à adopter des géométries qui permettent de tendre vers les écoulements de type piston pour améliorer les performances et réduire la taille des réacteurs.

L'ajustement des formes et des paramètres d'exploitation a finalement abouti à l'adoption de deux unités de traitement consécutives qui constituent la technologie RACHAHR;

- i) Une unité de pré-traitement comprenant le Réacteur Anaérobie à flux Ascendant et à Deux Etapes (RAFADE) suivi d'un décanteur puis d'un filtre à gravier
- ii) Une unité de post-traitement comprenant un CAHR suivi d'un bassin de maturation

Le prétraitement est chargé d'enlever les matières organiques solubles et les matières en suspension tout en minimisant la production des boues et de leur manutention. Le post-traitement, qui repose entièrement sur l'utilisation de l'énergie solaire, est chargé d'éliminer les nutriments et les pathogènes.

Le suivi de cinq années consécutives de la station pilote de l'IAV montre que la technologie RACHAHR permet d'atteindre des performances excellentes et offre une remarquable stabilité dans le temps.

Les principaux avantages de la technologie RACHAHR sont : le faible coût, la faible occupation du terrain, l'élimination des mauvaises odeurs et la simplicité de construction et d'exploitation notamment celle des boues.

Partant de ces avantages, on pourrait avancer que la technologie RACHAHR peut être recommandée aux petites communautés et aux installations touristiques éloignées des infrastructures municipales. Elle peut également s'insérer dans les schémas d'assainissement décentralisé dans lesquels, de petites stations d'épuration peuvent être construites dans le tissu urbain même. Cette approche permet de recycler les eaux épurées *in situ* pour l'arrosage des espaces verts avec un minimum de coût et de convoyage. En outre, elle pourrait même aider à éviter ou à remettre à plus tard l'extension des installations existantes.

### **1. Principes à la base du développement de la technologie RACHAHR**

#### **1.1. Limites du bassin anaérobie découvert**

L'utilisation du bassin anaérobie pour le pré-traitement des eaux usées domestiques est une pratique très courante. Cette approche s'est avérée efficace mais génère trois inconvénients.

- i) La faible performance puisque et à titre d'exemple, les données recueillies des expérimentations menées à travers le Maroc montrent une réduction de la DBO qui ne dépasse pas 50 à 60%. Ceci est souvent dû une hydrodynamique

déficiente, à la stratification thermique pendant la saison chaude et aux fortes amplitudes thermiques entre le jour et la nuit (Ouazzani, 1998 ; Pena et Mara, 2004).

ii) La nécessité de construire deux bassins similaires en parallèle. Pendant que l'un est mis en fonctionnement, le second est mis hors circuit pour permettre l'épaississement des boues accumulées en vue de leur évacuation.

Rappelons que les boues doivent être évacuées des bassins anaérobies tous les quatre à cinq ans (WHO, 1987) ce qui constitue la rubrique la plus importante dans les dépenses d'entretien et de maintenance des BDS.

De plus, cette opération est délicate car le recours aux engins conduit à des détériorations difficilement réparables du film de PVC ou de la couche d'argile compactée utilisés pour l'imperméabilisation des bassins.

iii) L'émission de mauvaises odeurs gênantes pour les populations notamment dans les sites, où la station ne peut pas être construite en aval des vents dominants (ceci peut arriver dans des situations où la direction des vents dominants et le sens de la pente topographique ne sont pas compatibles).

### **1.2. Limites du CAHR utilisé en mode secondaire/tertiaire**

Le CAHR est un réacteur photosynthétique dans lequel, cohabitent des algues microscopiques avec des bactéries hétérotrophes. Ce bassin à la forme d'un carrousel avec une faible profondeur (entre 35 et 50 cm). Le contenu est maintenu en circulation permanente grâce à une roue à palettes (Oswald et Gotaas 1957; Oswald, 1988).

Dans ce système, des concentrations saturantes en oxygène dissous (OD) et des valeurs élevées de pH sont obtenues pendant la journée ce qui empêche les bactéries anaérobies de coloniser le bassin (à condition qu'il n'y ait pas la formation d'une couche de boue au fond du bassin)

Le CAHR a une grande capacité de capture de l'énergie solaire ce qui force les algues à produire un maximum d'oxygène pour la dégradation des déchets par les bactéries aérobies. En retour, l'azote, le phosphore et le CO<sub>2</sub> qui résultent de la dégradation de la matière organique sont prélevés et servent à soutenir la croissance algale dans le bassin. Une telle complémentarité métabolique est souvent appelée une symbiose. Elle représente l'idée centrale ayant permis à Oswald d'utiliser le CAHR comme un système secondaire/tertiaire pour le traitement des eaux usées (figure 1).

Cependant, nous avons appris, en travaillant sur le CAHR au Maroc pendant quinze ans, que ce système a ses limites. La stabilité de ses performances et la durabilité de cet écosystème nécessite de le faire précéder d'une unité de prétraitement pour réduire les concentrations de DBO et de MES à des niveaux supportables. En absence d'une telle unité, la symbiose d'Oswald ne peut pas s'établir.

La pénétration de la lumière à travers la colonne d'eau est essentielle pour le fonctionnement du CAHR. De fortes concentrations en composés biodégradables favorisent la croissance bactérienne au détriment des algues. Si la pénétration de la lumière est fortement atténuée par le phénomène de diffusion par les cellules bactériennes et par les MES, le CAHR pourrait ne pas devenir vert !

Ne pas laisser les bactéries prendre le dessus et empêcher les algues de croître au delà de la limite acceptable pour un tel écosystème donne une idée sur la difficulté de conduire le CAHR d'Oswald selon le mode secondaire/tertiaire.

Green et Oswald écrivirent en 1993 "la stratégie [de conduite du CAHR] est de collecter suffisamment d'énergie solaire sous forme de biomasse algale pour oxyder les déchets, mais ne pas avoir plus d'algues qu'il est demandé pour la production d'oxygène"

Cette difficulté technologique est résolue dans les fermes de production de *Chlorelle*, où le CAHR d'Oswald est utilisé pour la production d'algues (nourriture à haute valeur ajoutée) sur de l'eau propre. Dans ce genre de procédé, les nutriments et le CO<sub>2</sub> sont fournis suivant les besoins de production et les algues récoltées à intervalles réguliers selon la reformulation suivante du principe de Green et Oswald "la stratégie est de collecter autant de biomasse algale que les nutriments et le CO<sub>2</sub> ajoutés permettent". En d'autres termes ceci revient à pousser la production de matière sèche algale au maximum possible.

Oswald et ses collaborateurs ont étudié les possibilités de valoriser les algues récoltées suite au traitement des eaux usées dans le CAHR pour l'alimentation animale ou pour la production de biogaz (Oswald, 1988). Ces études ont rapidement montré les limites d'une telle pratique en raison du coût de l'énergie, des équipements et des réactifs.

De plus, les cellules algales ont la capacité de concentrer des substances chimiques diverses rencontrées dans les eaux usées urbaines, particulièrement les métaux lourds introduisant un obstacle supplémentaire pour la valorisation des algues comme aliment animal.

Ces obstacles empêchent la mise en place par Oswald et ses collaborateurs d'une conduite basée sur une récolte régulière des algues afin de maintenir leur concentration dans les limites voulues

Une telle intervention est essentielle pour le fonctionnement dans ce genre de processus. A titre d'exemple, la concentration des cellules bactériennes dans le système des boues activées, où la croissance bactérienne est poussée au maximum par l'ajout d'oxygène et éventuellement de nutriments, est maintenue en permanence dans les limites optimales en recourant à la stratégie élimination/recyclage.

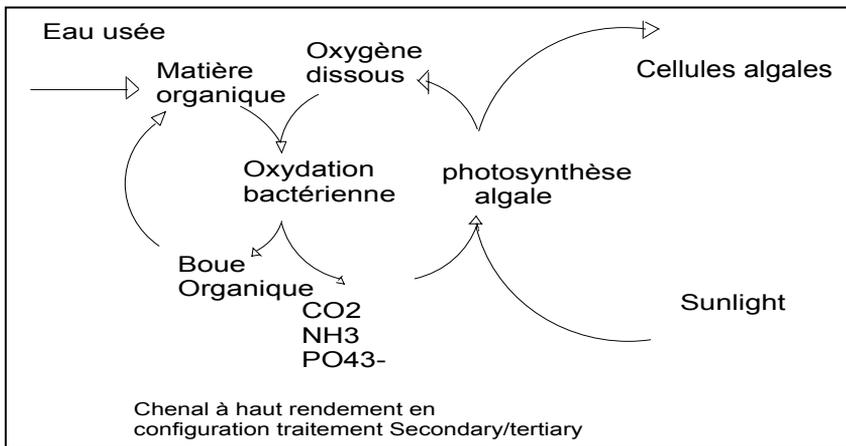


Figure 1. Principe de fonctionnement du CAHR selon le modèle Oswald.

### 1.3. Approche adoptée pour la mise au point de la technologie RACHAHR

#### 1.3.1. Principes de base

Le travail de recherche ayant conduit à la mise au point de la technologie RACHAHR a été basé sur les principes suivants :

i) Tenter d'atteindre une séparation, plus ou moins poussée, des activités biologiques qui se déroulent dans les systèmes complexes. En effet, quand deux ou plusieurs de ces activités, par exemple, les dégradations anaérobie et aérobie de la matière organique, se déroulent de manière simultanée dans le même espace, et qu'elles dépendent l'une de l'autre, le système obéit au principe du facteur limitant. La vitesse finale de l'épuration sera celle du processus le plus lent.

Ainsi et pour éviter les effets négatifs d'une activité sur une autre, nous avons opté pour des unités "spécialisées", capables d'exhiber des spectres d'activité étroit et complémentaire d'une unité à l'autre, que nous avons placées en série.

ii) Adopter des formes géométriques qui minimisent la superficie couverte par les ouvrages et qui permettant, en même temps d'éviter les courts-circuits et la stratification thermique et qui favorisent les écoulements de type piston.

### 1.3.2. Opter pour les réacteurs anaérobies à haut rendement

Dans les bassins anaérobies, la sédimentation des boues primaires, l'hydrolyse des substances organiques complexes et la transformation de l'acétate en méthane<sup>1</sup> se déroulent dans le même espace et dans le même temps expliquant, en partie, la faible performance de ce type de bassin qui ne dépasse pas 50 à 60% d'élimination de la DCO pour un temps de rétention hydraulique de 4 jours environ (voir § 3.2.).

L'adoption de réacteurs à alimentation ascendante s'est révélée être une excellente approche pour la digestion anaérobie des eaux usées. Elle augmente le contact entre le substrat (eau usée) avec les bactéries anaérobies menant à de meilleures performances et des temps de séjour plus courts ; c'est-à-dire à une faible occupation de terrain et de coût de l'ouvrage.

De plus, l'équipe de l'Université Agricole de Wageningen aux Pays-Bas a démontré que la concentration de la DCO particulaire dans les eaux usées urbaines est très élevée (entre 40 et 50% de la DCO totale) ce qui a poussé à proposer une étape préliminaire de sédimentation et d'hydrolyse en amont de l'étape de méthanisation. L'équipe recommande deux étapes plutôt qu'un réacteur en une seule étape particulièrement quand on travaille à basses températures (Wang, 1994)

Le système adopté à Rabat est un réacteur à flux ascendant et à deux étapes ou Réacteur Anaérobie à flux Ascendant et à Deux Etapes (RAFADE) pour lequel et pour des raisons de simplicité de la conduite, il n'est pas prévu d'intervention pour l'évacuation des boues.

Ceci le distingue du UASB (upflow anaerobic sludge blanket) dans lequel, l'opérateur intervient pour maintenir une concentration optimale de boues dans le réacteur. Il décide de la quantité, de la fréquence et de la profondeur à laquelle il prélève les boues. Dans le RAFADE, le réacteur fonctionne en mode "maximum sludge hold up" (van Haandel & Lettinga, 1994) lequel, offre l'avantage de sa simplicité pour la gestion des boues dans la station (voir § 4 procédure d'exploitation et de maintenance).

**Figure 2. Fonctionnement du CAHR conduit en mode strictement tertiaire.**

---

<sup>1</sup> Ouvrages de bases pour la digestion anaérobie des eaux usées Malina, 1962 et McCarty, 1964.

### 1.3.3. Opter pour le CAHR conduit en mode tertiaire

Dans la station pilote de l'IAV, le CAHR fait partie de l'unité de post-traitement placé derrière le RAFADE. Ce dernier assurait l'élimination de 80% de la DCOt totale (DCOt) et 90% des MES.

Les constantes de vitesse de réaction de premier ordre,  $k_{20^{\circ}\text{C}}$  pour l'élimination de la DCOt, de l'azote totale, et du phosphore total ont été déterminées pour le CAHR conduit selon cette configuration soit, un mode strictement tertiaire (tableau 1). Ce tableau montre qu'au lieu d'opérer une élimination du carbone (valeur positive de  $k_{20^{\circ}\text{C}}$ ), le CAHR voit sa concentration en DCO augmenter (valeur négative). Le CAHR est passé d'une unité qui dégrade le carbone organique à une unité où l'on assiste à une production de carbone organique et la croissance algale devient l'activité principale du CAHR. Toutefois et pour pouvoir soutenir la croissance algale assurée par les concentrations non limitantes en N et P, l'écosystème commence à importer du carbone atmosphérique sous forme de  $\text{CO}_2$  expliquant la valeur négative de  $k_{20^{\circ}\text{C}}$  de l'élimination de la DCO.

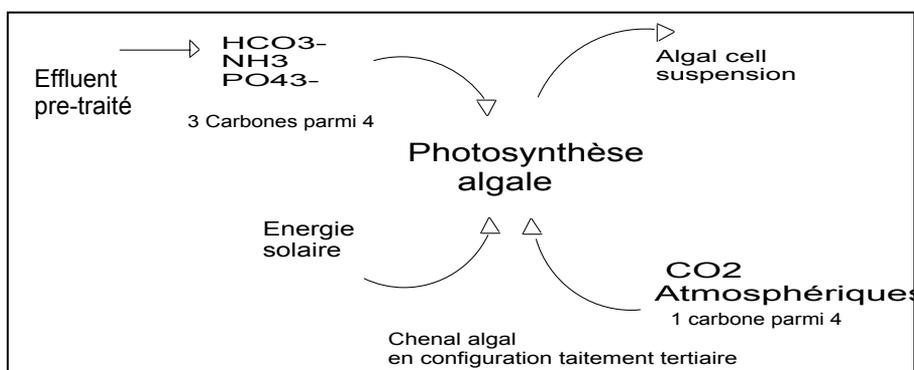


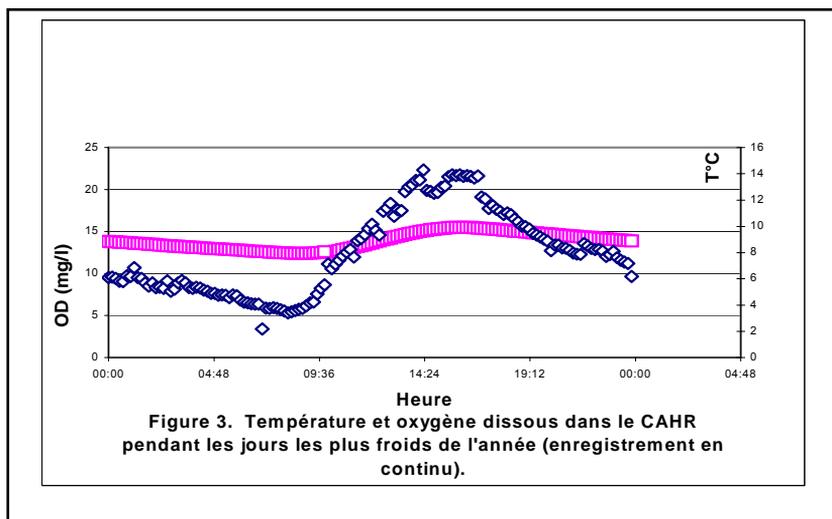
Figure 2. Fonctionnement du CAHR conduit en mode strictement tertiaire.

En d'autres termes, le RAFADE, qui enlève l'essentiel des substances biodégradables et en suspension, a entraîné le basculement du CAHR du mode secondaire/tertiaire, décrit par Oswald, vers un mode strictement tertiaire similaire à celui que le CAHR joue dans la production d'algues pour l'alimentation humaine (*Chlorella farms*) expliquant ainsi les valeurs positives et relativement élevées des  $k_{20^{\circ}\text{C}}$  d'élimination de N et P (tableau 1).

Tableau 1. Valeurs de  $k_{20^{\circ}\text{C}}$  d'élimination de la DCOt, de l'azote et du phosphore obtenues sur le CAHR.

	DCOt	Azote total	Phosphore total
$k_{20^{\circ}\text{C}}$ ( $\text{d}^{-1}$ )	-0,245	0,653	0,249

Dans cet écosystème, la concentration du carbone dans le CAHR devient le facteur limitant en raison de la faible proportion du CO<sub>2</sub> dans l'air. Cette spécificité est exploitée pour maintenir la concentration des cellules algales dans les limites compatibles avec le nouveau rôle du CAHR (figure 2).



=La conduite du CAHR en mode tertiaire empêche les changements réguliers de son contenu observés en conduite secondaire/tertiaire. Elle permet par ailleurs un meilleur contrôle de la concentration des cellules algales dans le CAHR. Ceci peut être observé sur l'évolution diurne de l'oxygène dissous (DO). La figure 3 présente la concentration en OD sur une durée d'une semaine enregistrée pendant la période la plus défavorable de l'année avec une température moyenne autour de 14-15°C. On peut noter que de fortes concentrations en OD sont enregistrées en milieu de journée (jusqu'à trois fois la concentration de saturation) et que la production d'oxygène est suffisamment importante pour couvrir les besoins de la respiration nocturne.

En comparaison, les données obtenues quand le CAHR de la station de l'IAV fut conduit en mode secondaire/tertiaire montraient un épuisement total de l'oxygène dissous du CAHR dès les premières heures de la nuit (voir El Ouarghi *et al.* 2000).

Le tableau 2 regroupe les principaux paramètres de conduite à retenir pour un CAHR en mode strictement tertiaire.

**Tableau 2. Paramètres recommandés pour la conduite du CAHR en mode strictement tertiaire\*.**

Charge organique (kg DCOt ha <sup>-1</sup> j <sup>-1</sup> )	80
Temps de séjour (j)	3
Profondeur de l'eau (m)	0,35
Chlorophylle-a (mg/l)	0,6
Cellules algales (10 <sup>6</sup> cellule/ml)	0,8

\*conditions climatiques de Rabat (voir ci-dessous).

## 2. Application de la technologie RACHAHR au campus de l'IAV

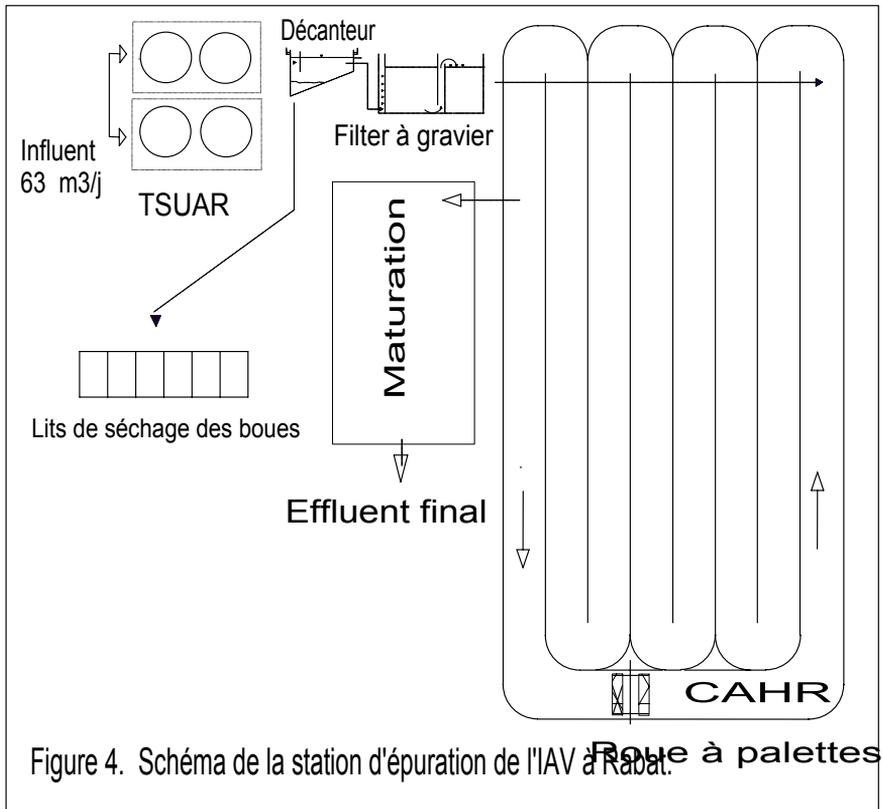
La première station basée sur la technologie RACHAHR a été construite en 1996 dans le campus de l'IAV à Rabat. Celui-ci est situé dans un environnement urbain (voir photos annexe 6) et qui accueille 1.500 étudiants environ en plus du personnel académique et administratif (un autre millier approximativement).

La ville de Rabat, est située dans le nord-ouest du pays sur le littoral atlantique (latitude 30°03' N, longitude 6°46' W) à une altitude de 73 m en moyenne et la température moyenne est de 14 et 24°C respectivement pour la saison froide et saison chaude.

La station de l'IAV reçoit les eaux usées du campus lui-même mais aussi celles provenant du club de l'Association Culturelle et Sportive de l'Agriculture (ACSA). Elle occupe une superficie de 1.200 m<sup>2</sup> et traite un débit quotidien de 63 m<sup>3</sup> environ. Elle comprend un traitement préliminaire (dégrillage et dessablage) suivi d'un RAFADE (prétraitement) puis d'un CAHR et d'un bassin de maturation en série (post-traitement) (figure 4). Toutes ces unités sont construites en béton armé; toutefois, l'utilisation de matériaux locaux pourrait être envisagée pour les petites localités. Le détail du dimensionnement est repris dans l'annexe 1

### 2.1. L'unité de prétraitement ou le RAFADE

Les systèmes anaérobies à haut rendement remplissent le rôle du prétraitement alors que les unités placées derrière ces systèmes sont appelées post-traitement. Les unités de post-traitement sont chargées de l'élimination des nutriments et des pathogènes et sont donc recommandées en cas de réutilisation des effluents, notamment en agriculture (Lettinga *et al.*, 1997; Zeeman et Lettinga, 1999). L'élimination de la DBO et des MES peut également être appelée traitement secondaire alors que l'élimination des nutriments et des pathogènes nommée traitement tertiaire.



### 2.1.1. Les réacteurs $R_1$ et $R_2$

Les réacteurs ont une forme cylindrique de 3 m de diamètre. Ils ont les profondeurs respectives de 5,30 et 5,00 m. La partie construite au dessus du sol est de 2.50 m pour  $R_1$  et 2.00 m pour  $R_2$  (figure 5 et tableau 3).

La vitesse d'ascension dans le réacteur est maintenue dans les limites de 0,1 to 0,6  $m\ h^{-1}$  selon le débit reçu, lequel varie pendant la journée.

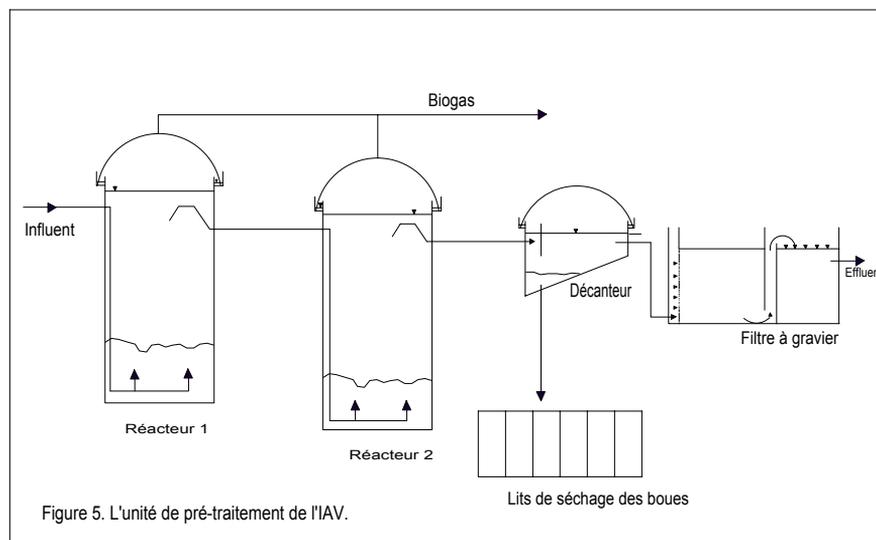
Le RAFADE se distingue de l'UASB, le réacteur à haut rendement le plus connu (van Haandel & Lettinga, 1994) par trois caractéristiques :

- i) Absence d'un décanteur intégré, séparateur de phases (liquide/solide/gaz)
- ii) Aucune opération de vidange manuelle des boues du réacteur
- iii) Temps de séjour plus long (48 h au lieu de 6 à 14 h pour l'UASB).

### 2.1.2. Collecte de biogaz et système anti-odeur

Le biogaz est collecté des deux réacteurs du RAFADE à l'aide de deux coupoles fabriquées en polyester résistant aux acides. La base de ces couvercles est insérée dans un chenal qui entoure le réacteur et qui a 0,40 m de large et 0,40 de profondeur (figures 4 et 5).

Ce chenal est rempli d'effluent provenant du CAHR pour servir de bouchon hydraulique empêchant le biogaz de quitter le réacteur. Le contenu du chenal est changé une fois par semaine.



La station de l'IAV produit entre 4 et 10 m<sup>3</sup> par jour. Le minimum de production coïncide avec la période froide de l'année (de décembre à février avec une température moyenne de 15°C). La production spécifique du RAFADE est de 0.25 m<sup>3</sup> kg<sup>-1</sup> DCO enlevé, ce qui correspond à 0.19 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub> kg<sup>-1</sup> de DCO enlevé.

Les principaux composants rencontrés dans le biogaz produit à l'IAV ont été identifiés par chromatographie en phase gazeuse. Le méthane, CH<sub>4</sub> représente le gaz dominant avec 77% du total. Il est associé à l'azote, N<sub>2</sub> (14%), l'oxygène, O<sub>2</sub> (4%), le dioxyde de carbone, CO<sub>2</sub> (2%) et hydrogène sulfuré, H<sub>2</sub>S, en traces. La présence d'azote dans le biogaz est attribuée à un nouveau cycle biochimique associant la réduction du sulfate et l'oxydation de l'ammonium en absence d'oxygène. Ce processus de dénitrification anaérobie a été décrit par Mulder *et al.* (1995) et par Fdz-Polanco *et al.* (2001) puis appelé ANAMMOX.

La possibilité de valoriser le biogaz pour la production d'énergie électrique a été testée sur un système pilote constitué d'un générateur de 7.5 KVA entraîné par un moteur à double alimentation Diesel/biogaz. L'étui d'alimentation en air du moteur a été modifié pour admettre, en même temps du biogaz (voir photos, annexe 6)

**Tableau 3. Dimensions et paramètres de conduite du RAFADE.**

	Réacteur R <sub>1</sub>	Réacteur R <sub>2</sub>
Profondeur (m)	5.30	5.00
Surface (m <sup>2</sup> )	7.06	7.06
Diamètre (m)	3.0	3.0
Volume (m <sup>3</sup> )	33	31
TRH (h)	24	23
TRS Moyen (d)	32	32
Vitesse d'ascension (m h <sup>-1</sup> )	0.1 – 0.6	0.1 – 0.6
Nombre de conduites (entrée)	2	2
Nombre de conduites (sortie)	1	1
Charge hydraulique (kg COD m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> )	0.76	0.40

TRH : temps de rétention hydraulique ; TRS : temps de rétention des solides.

En admettant qu' 1 m<sup>3</sup> de méthane est équivalent à 2,8 kWh, la station de l'IAV pourrait générer 21,5 kWh/jour ou 0,34 kWh/m<sup>3</sup> d'eau usée traitée.

Le Programme des Nations Unies pour l'Environnement (UNEP) est en train de financer des projets dont l'objectif est la réduction des émissions des gaz à effet de serre. Les experts recommandent ainsi aux gestionnaires des stations d'épuration possédant des unités de production de méthane de le collecter puis de le valoriser. En cas d'impossibilité de valorisation, les experts recommandent de les brûler.

### 2.1.3. Le décanteur

L'une des principales caractéristiques du RAFADE est le choix délibéré de construire un décanteur indépendant à l'extérieur plutôt que de l'intégrer au réacteur, comme dans l'UASB.

Un décanteur de forme rectangulaire a été construit sur la base d'une charge hydraulique égale à deux fois le débit normal en temps sec et une vitesse d'ascension de  $1,5 \text{ m h}^{-1}$ . L'unité a été couverte pour empêcher l'émanation de mauvaises odeurs. Le dimensionnement de cette unité ainsi qu'un exemple de plans de construction sont repris en annexe 1.

#### 2.1.4. Le filtre à gravier

L'effluent provenant du Réacteur  $R_2$  a été analysé en vue d'en déterminer une courbe de distribution de la taille des particules rencontrées. Cette analyse a montré que la majorité des particules se distribue en deux types : i) des particules réticulées avec un diamètre de 100 à 350  $\mu\text{m}$  et un index de sédimentation ou sludge velocity index (SVI) de 20 mg/l ii) des particules ayant une faible densité et un diamètre de 60  $\mu\text{m}$  et un index de sédimentation de 35 mg/l.

Les particules peuvent échapper au décanteur et transportées vers l'unité photosynthétique de post-traitement avec la conséquence immédiate d'une réduction de la pénétration de la lumière à travers la colonne d'eau. Elles contribuent également à la formation d'un sédiment lequel devient le siège d'une dégradation anaérobie. Ceci réduit le taux d'émission d'oxygène et de prélèvement de N et P et empêche le pH d'atteindre les valeurs létales aux coliformes fécaux. (El Hafiane *et al.* 2003; El Hafiane & El Hamouri, 2004).

Les particules de faible densité qui sont à l'origine de ces dysfonctionnements sont arrêtées grâce à un filtre à gravier. Ce dernier comporte deux unités consécutives ; l'une à écoulement horizontal (EH) et la seconde à écoulement vertical (EV). Le filtre consiste en un bassin de forme rectangulaire. Chacune des unités a les dimensions de 2 m de large et 2.5 m de long. La profondeur de la couche filtrante est de 0,8 et 0,6 m respectivement pour EH et EV et la charge hydraulique appliquée de  $12,6 \text{ m j}^{-1}$ .

Principales caractéristiques du gravier sont: (figure 6)

##### Écoulement Horizontal (EH)

Porosité = 47%

$d_{10}$  = 5,5 mm

$d_{60}$  = 9,4 mm

Coefficient d'uniformité,  $U = 1,72$

Conductivité,  $K = 5016 \text{ md}^{-1}$

##### Écoulement Vertical (EV)

Porosité = 47.4%

$d_{10}$  = 4,4 mm

$d_{60}$  = 5,8 mm

Coefficient d'uniformité,  $U = 1,32$

Conductivité,  $K = 1588 \text{ md}^{-1}$

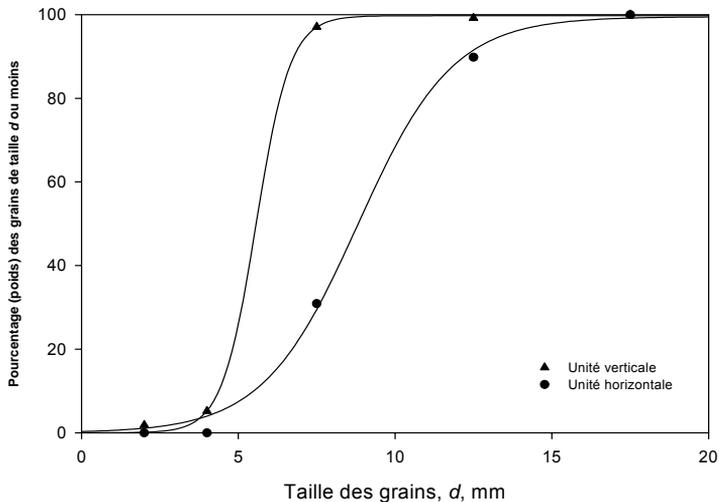


Figure 6. Distribution de la taille des grains du filtre à gravier

## 2.2. L'unité de Post-traitement :

L'unité de post-traitement comprend le CAHR et le bassin de maturation.

### 2.2.1. Le Chenal algal à haut rendement, CAHR

Le CAHR de la station pilote de l'IAV a une surface de  $790 \text{ m}^2$  et une profondeur de  $0.50 \text{ m}$ . Des déversoirs rectangulaires permettent de contrôler le niveau d'eau dans le chenal (profondeur  $35 \text{ cm}$ )

Une étude de traçage à la Rhodamine WT a été menée sur ce chenal en 1998 (El Ouarghi *et al*, 2000) a permis de conclure que l'écoulement dans le CAHR est de type piston à recirculation avec un faible degré de dispersion. Le temps de recirculation est de  $78 \text{ min}$  et l'homogénéité est obtenue  $17 \text{ h}$  après l'injection du traceur. Le temps de séjour était de  $126 \text{ h}$  selon le débit de l'époque du test qui était de  $50 \text{ m}^3/\text{j}$ .

L'étude avait également montré que le taux de court-circuit dans cette unité était de  $30\%$ . Le placement des deux conduites côte à côte (avec la conduite entrée placée en aval par rapport au courant créé par la roue à palettes) s'est avéré insuffisant pour empêcher le court-circuit, d'où la modification apportée dès 1999 plaçant les conduites selon le schéma de la figure 4.

### 2.2.2. Le bassin de maturation

Le dimensionnement initial de la station de l'IAV avait retenu deux bassins de maturation (BM) en série. Cependant, le suivi des performances des deux composantes a montré que le BM 2 ne contribue pas de manière significative et fut by-passé pour ne plus retenir qu'un seul BM (figure 4) avec les dimensions de 17 m x 7 m et une profondeur de 1 m d'eau et 0,20 m de revanche et un temps de séjour de 1.5 jour (voir annexe 1 pour le dimensionnement et les plans de construction).

### 2.3. Exigence en superficie

La technologie RACHAHR requiert environ 1 m<sup>2</sup> par équivalent-habitant. Cette superficie est multipliée par un facteur 1,20 pour tenir compte des chemins de passage et des bâtiments annexes. L'application de la technologie pour les petites communes ne nécessite pas la mise en place pour la circulation d'engins et véhicules.

## 3. Performances de la station de l'IAV

Les performances présentées sont celles obtenues à la suite d'un suivi analytique de cinq années consécutives (campagne d'échantillonnage tous les quinze jours). La figure 7 montre la moyenne mensuelle de température de l'influent et de l'effluent enregistrée pendant la durée du suivi.

### 3.1. Performance de l'unité de pré-traitement

Le pré-traitement dans la technologie RACHAHR comprend le RAFADE, le décanteur et le filtre à gravier.

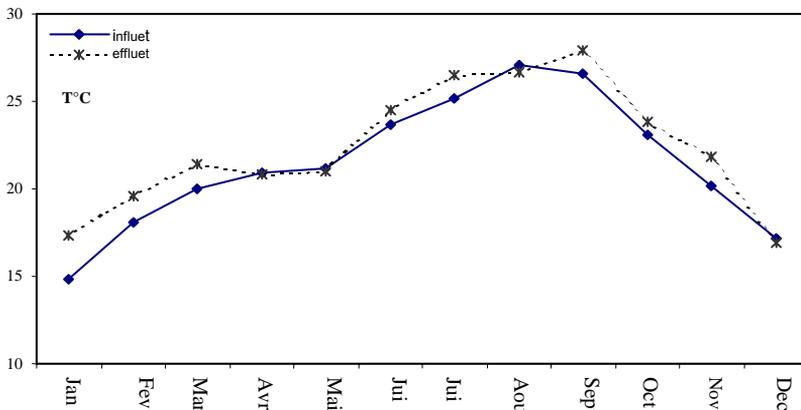


Figure 7. Moyenne de la température de l'influent et de l'effluent.

### 3.1.1. Stabilité et homogénéité du contenu des réacteurs

La température dans les réacteurs était relativement stable. La valeur minimale n'a jamais baissée en dessous de 15°C même quand la température de l'air a été plus basse (la température mesurée à 3m de profondeur est présentée dans la figure 4)

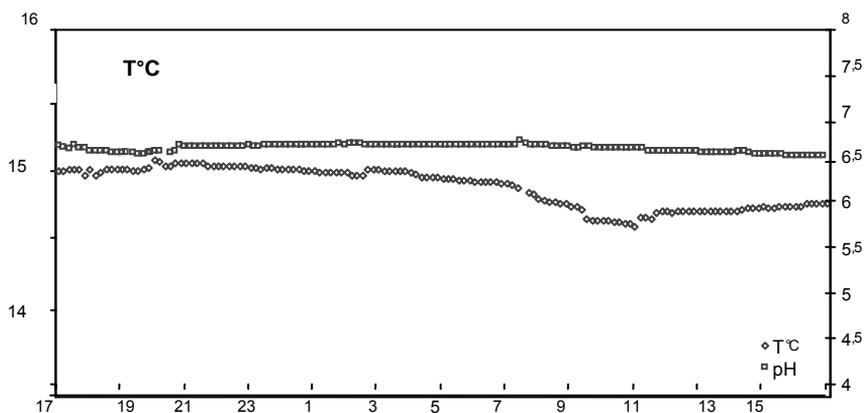


Figure 8. Température et pH dans les réacteurs en saison froide à 3 m de profondeur.

A titre de comparaison, des amplitudes diurnes allant de 4 à 10°C ont été rapportées pour les bassins anaérobies découverts. (Ouazzani, 1998). La stabilité des conditions physico-chimiques et l'homogénéité des réacteurs sont confirmées par les figures 8 et 9.

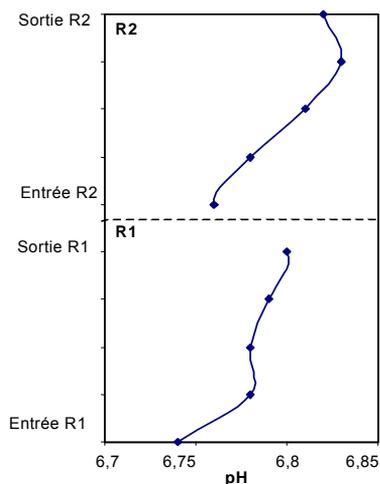


Figure 9. Moyenne annuelle du profil pH dans les réacteurs R1 et R2.

### 3.1.2. Performances des réacteurs

Des équations empiriques ont été établies mettant en relation le taux d'élimination de la DCO et le temps de séjour dans le réacteur pour les systèmes anaérobies selon l'équation (1).

$$E = 1 - S_e/S_i = 1 - C_2 (\text{TRH})^{-C_1} \quad (1)$$

$S_e$  et  $S_i$  sont les DCO dans l'effluent et dans l'influent respectivement;  $E$ , le taux d'élimination de la DCO en % et  $C_1$  et  $C_2$  des constantes empiriques.

Les valeurs correspondantes pour le RAFADE pour  $C_1$  et  $C_2$  obtenues à l'IAV sont 0.56 et 1.82 respectivement (équation 2).

$$E = 1 - 1.82 (\text{TRH})^{0.56} \quad (2)$$

Le temps de séjour requis pour une efficacité de 80% dans le RAFADE est de 45 heures (moins de 2 jours 2) mais il est de 6 jours (144 heures) dans le bassin anaérobie démontrant ainsi comment l'approche retenue a permis de réduire l'emprise sur le terrain des ouvrages.

#### 3.1.2.1. Expression de la performance des réacteurs

Le taux d'élimination de la DCO pour les réacteurs anaérobie est souvent calculée en se référant à l'équation (2) où,  $\text{DCO}_t$  et  $\text{DCO}_{st}$  représentent la DCO total est après décantation respectivement ; *in* et *ef* indiquent qu'il s'agit de l'influent et de l'effluent respectivement.

$$\text{RR}_{\text{COD}} = (\text{COD}_t \text{ in} - \text{COD}_{st} \text{ ef}) / \text{COD}_t \text{ in} \quad (3)$$

L'équation (3) exprime réellement la performance du réacteur puisqu'elle ne tient pas compte, ou défalque de fait, la contribution due aux particules de boue accompagnant l'effluent du réacteur

#### 3.1.2.2. Elimination des particules de boue

La comparaison des tables 4 et 5 montre que le placement du filtre à gravier en aval du décanteur améliore la qualité de l'effluent du RAFADE.

Les particules de boue accompagnant l'effluent ont été arrêtées au niveau du filtre. Cette action du filtre n'est pas seulement importante pour

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

la détermination de la performance des réacteurs elle permet aussi de protéger l'unité de post-traitement de l'accumulation néfaste des boues et des MES dans ses ouvrages.

Les taux d'élimination de la DCO obtenus sur le RAFADE pendant les cinq années consécutives de suivi démontrent la stabilité et la consistance des performances et permettent de conclure qu'il s'agit d'un pré-traitement fiable.

**Tableau 4. Performance moyenne de la ligne R1 + R2 + décanteur**

	Influent	Réacteur 1		Réacteur 2		Décanteur		TE
	Valeur	Valeur	TE	Valeur	TE	Valeur	TE	cumulé
DCOt (mg/l)	800	530	34	380	28	310	18	60
DCOst		285		159	44	59	-	
DCOs (mg/l)	420	270	36	120	56	120	-	70
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	390	200	49	150	25	120	20	70
MES (mg/l)	330	300	9	280	7	230	18	30
MSV (mg/l)	190	150	21	160	-	105	34	45
NTK (mg/l)	72	60	17	66	-	65	2	10
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	46	48	-	50	-	50	-	-
P Total (mg/l)	8,2	8	2	8	-	8	-	-
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l)	5,7	6	-	6	-	5	15	-
CF	3,6 E7					7,1 E5		
Helminthes oeuf/l	13					0	100	100

DCOt : DCO totale ; DCOst : DCO après 30 min de décantation; DCOs : DCO soluble ; NTK : azote total Kjeldhal ; N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> : azote ammoniacal; PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> : orthophosphates .

Par ailleurs, on peut noter que l'élimination des nutriments N et P par le RAFADE est faible ou quasi nulle. Les concentrations de l'ammonium et des orthophosphates peuvent même augmenter à la sortie du RAFADE comme cela a été observé sur les systèmes anaérobies.

En ce qui concerne les paramètres d'intérêt sanitaire, on peut noter que le RAFADE confirme les données rapportées sur les systèmes anaérobies relatives à l'abattement des coliformes fécaux et les œufs d'helminthes. Ces derniers n'ont pas été mis en évidence sur l'effluent final du RAFADE indiquant qu'ils ont été éliminés dans cette unité et les coliformes fécaux subissent invariablement un abattement de 1,7 unités logarithmiques.

Tableau 5. Effet du filtre à gravier sur la qualité de l'effluent final du RAFADE.

	Décanteur	Filtre à gravier	TE global cumulé (%)
DCOt (mg/l)	310	110	86
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	120	70	82
MES (mg/l)	230	15	95
MVS (mg/l)	105	5	97
NTK (mg/l)	65	61	15
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	50	49	-
P Total (mg/l)	8	8	-
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l)	5	6	-
CF (log <sub>10</sub> /100 ml)	7,1 E5	7,1 E5	1.7*
Helminthes (oeuf/l)	0	0	

FC : coliformes fécaux ; TE : taux d'élimination ; \* taux d'élimination en Log10.

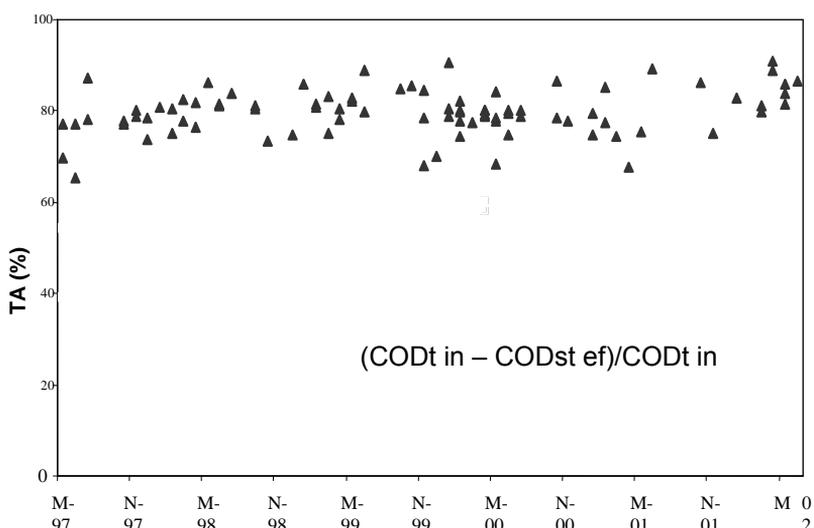


Figure 10. Taux d'abattement de la DCO (%) obtenus sur le RAFADE pendant une période de suivi de 5 ans.

### 3.1.3. Rôle spécifique des réacteurs R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub>

Les deux réacteurs R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> produisaient du méthane et assuraient des taux similaires d'enlèvement de la DCO. Cependant, il faut noter que les deux réacteurs fonctionnaient en série et que par conséquent, R<sub>2</sub> ne recevaient que 2/3 de la charge organique de R<sub>1</sub> (figure 11). L'efficacité

de l'abattement de la DCO soluble dans  $R_2$  était 1.5 fois plus élevée que celle qui avait lieu dans  $R_1$ .

Cette différence dans l'efficacité d'élimination de la DCOs peut avoir deux origines possibles.

- i) Les réacteurs  $R_1$  et  $R_2$  seraient colonisés par le même groupe de bactéries méthanogènes mais, des conditions défavorables, comme une inhibition par des concentrations importantes d'acide gras volatiles (AGV) ou des valeurs de pH trop basses, régnaient dans  $R_1$  mais pas dans  $R_2$ .
- ii) Les groupes de bactéries méthanogènes qui colonisaient les réacteurs  $R_1$  et  $R_2$  seraient différents mais ceux dominant  $R_2$  seraient plus actives.

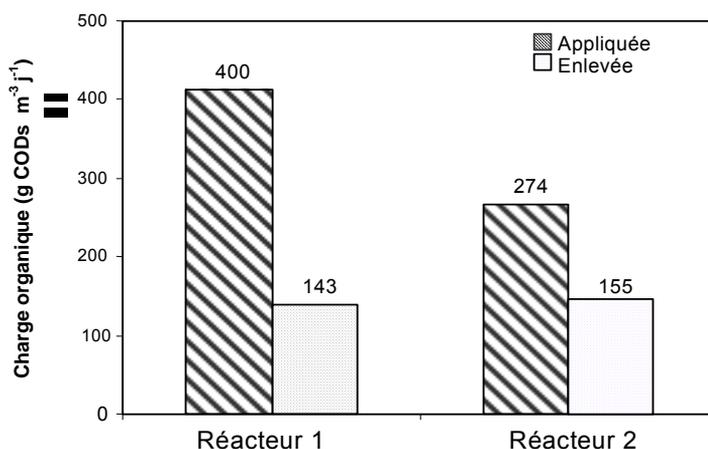


Figure 11. DCO appliquée et enlevée par les réacteurs  $R_1$  et  $R_2$

L'examen des conditions qui régnaient dans les réacteurs (tableau 6) montre que la supposition i) est loin de la réalité. En effet et même si la concentration en AGV était plus élevée dans  $R_1$  que dans  $R_2$ , il n'en reste pas moins que les concentrations enregistrées étaient loin des seuils d'inhibition rapportés et qui doit être supérieure à 500 mg/l (Haskoning, 1994).

De plus, les valeurs de pH enregistrées dans les deux réacteurs étaient proches et loin de la valeur d'inhibition qui est pH5, (Haskoning, 1994).

En revanche, la supposition ii) pourrait ne pas être loin de la réalité surtout à la lumière des résultats obtenus avec le test de production de méthane appliqué aux boues des deux réacteurs. Ce test, mené en

laboratoire, consiste à ajouter l'acétate comme seul substrat. La quantité de méthane produite est alors proportionnelle à l'importance de la population des méthanogènes acétotrophes présente dans la boue.

Le test donne 0,03 et 0,22 mg DCO mg<sup>-1</sup> MSV respectivement pour R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> ce qui indique que les méthanogènes acétotrophes sont sept fois plus nombreux ou sept fois plus actifs dans R<sub>2</sub> que dans R<sub>1</sub>. Ceci indique également que le méthane produit dans R<sub>2</sub> serait l'œuvre de bactéries acétotrophes alors que celui produit dans R<sub>1</sub> pourrait être d'origine hydrogénotrophe

**Tableau 6. Caractéristiques physico-chimiques importance pour la digestion anaérobie dans les réacteurs R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> .**

	Influent	Réacteur R <sub>1</sub>	Réacteur R <sub>2</sub>	Décanteur
pH	6,9	6,6	6,8	6,8
Température (°C)	19,5	20	21,5	21
CE (µS/cm)	1290	1400	1415	1420
AGV (mg/l)	120	170	70	-
Alcalinité (mg CaCO <sub>3</sub> /l)	120	164	204	-

CE : conductivité électrique ; AGV : acides gras volatiles.

Partant de ces déductions, on peut proposer un rôle pour chacun des réacteurs R<sub>1</sub> et R<sub>2</sub> dans le système RAFADE.

- Le réacteur R<sub>1</sub> fonctionnerait comme un piège pour la DCO particulaire et comme digesteur hébergeant principalement le groupe de méthanogènes hydrogénotrophes.
- Le réacteur R<sub>2</sub> fonctionnerait principalement comme digesteur transformant l'acétate en méthane avec une domination du groupe des méthanogènes acétotrophes.

### 3.2. Performance de l'unité de post-traitement

#### 3.2.1. Élimination des nutriments (N et P)

Le CAHR enlève 89% of de l'azote ammoniacal (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) et 59% des orthophosphates (P-PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>) avec des concentrations résiduelles de 7 et 2,4 mg/l respectivement (tableau 7).

Dans le même temps, les concentrations des MES et MVS sont doublées avec les algues comme principal composant, plus de 95% des MVS. Ceci témoigne de la liaison qui existe entre l'élimination des nutriments d'un

côté et la croissance algale grâce à la capture de l'énergie solaire de l'autre. Les MES, ainsi produites sont différentes de celles rencontrées dans les eaux usées brutes.

Par coïncidence, les mécanismes derrière l'élimination de N et P et la croissance algale sont également à l'origine de l'exacerbation des conditions physico-chimiques qui diminuent la survie des pathogènes bactériens. Les deux mécanismes sont des conséquences de l'activité photosynthétique algale.

**Tableau 7. Performances moyennes du CAHR.**

Paramètre	Influent	Effluent	TE (%)	TA (%)
pH	7,2	8,9		
DCOt (mg/l)	110	250		66
DBO <sub>5</sub> (mg/l)	45	35	22	
MES (mg/l)	15	115		95
MVS (mg/l)	5	85		98
NTK (mg/l)	61	8.3	86	
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	49	7	86	
P total (mg/l)	8	2.7	66	
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (mg/l)	5.8	2.4	59	
CF (log <sub>10</sub> /100 ml)	4,6 E5	2,7 E4	1,23	

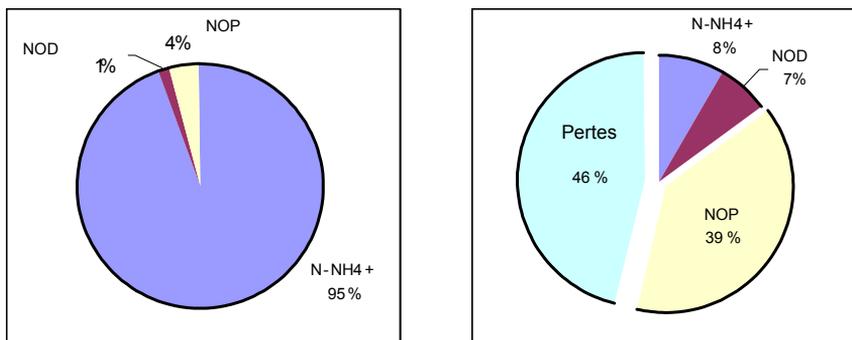
TE: Taux d'élimination et TA taux d'augmentation. \* TE en Log10

Le bilan azote dans le CAHR est présenté à la figure 12. La forme dominante d'azote à l'entrée est l'ammonium, lequel représente 95% du N total. Ceci témoigne de la bonne minéralisation qui se déroule dans les réacteurs au niveau du prétraitement. La concentration de l'ammonium diminue dans l'effluent pour atteindre 8%.

La comparaison avec l'influent montre que 39% d'azote sont immobilisés dans la biomasse algale alors que 46% sont perdus dans l'atmosphère par volatilisation (ou stripping).

La perte d'azote par stripping a lieu quand l'azote se trouve sous la forme ammoniacal (NH<sub>3</sub>) est dominante. La transformation de la forme NH<sub>4</sub><sup>+</sup> à la forme NH<sub>3</sub> est gouvernée par le pH et la température de l'eau. La forme NH<sub>4</sub><sup>+</sup> domine à pH inférieur à 8 alors que l'ammoniac, NH<sub>3</sub> est dominante à pH 11 (Minocha & Prabhakar Rao, 1988; Picot, *et al.*, 1991; Nurdogan & Oswald, 1995). La dépendance de ce processus de la

température et du pH est décrite par l'équation (4) qui indique que la concentration  $\text{NH}_3$  est multiplié par 10 pour une augmentation de pH d'une unité ou bien par deux pour toute augmentation de la température de  $10^\circ\text{C}$ .



**Figure 12. Bilan de l'azote dans le CAHR**  
(DON est PON : azote organique dissous et particulaire respectivement)

$$\text{NH}_3 / \text{NH}_4^+ = 10^{(10 - \text{pH} - 0.03 T)} \quad (4)$$

Le suivi du pH dans le CAHR (Figure 13) montre que la concentration en  $\text{NH}_3$  domine et explique les pertes d'azote montrées sur la figure 12.

Pour le devenir du phosphore, on constate que ce dernier se trouve à 90% sous sa forme  $\text{PO}_4^{3-}$  et que 37% de cette forme se retrouvent encore dans l'effluent (figure 14). Le prélèvement par les algues atteint 25% alors que 23% sont perdus par précipitation sous forme de sels de phosphate sous l'effet du pH élevé (figure 15) voir aussi Nurdogan & Oswald, (1995) ; Moutin & al, (1992) ; Mesplé & al, (1995) et El Hafiane et al., (2003).

Enfin, on peut constater également que l'efficience d'enlèvement de P par le CAHR est beaucoup moindre que celle de N et pour conclure sur le devenir du phosphore dans le CAHR, on peut préciser qu'environ  $\frac{1}{4}$  du phosphore admis dans le CAHR est perdu par précipitation et qu'un autre  $\frac{1}{4}$  est assimilé par les algues.

Le rôle du bassin de maturation (BM) dans le post-traitement est visible sur le tableau 8. Ce bassin agit comme une unité de traitement tertiaire ou de polishing. Environ 30% de la  $\text{DBO}_5$ , de la DCO et de l'azote total

sont enlevés par ce bassin. La sédimentation des cellules algales dans ce bassin semble représenter le principal mécanisme derrière cette action du BM.

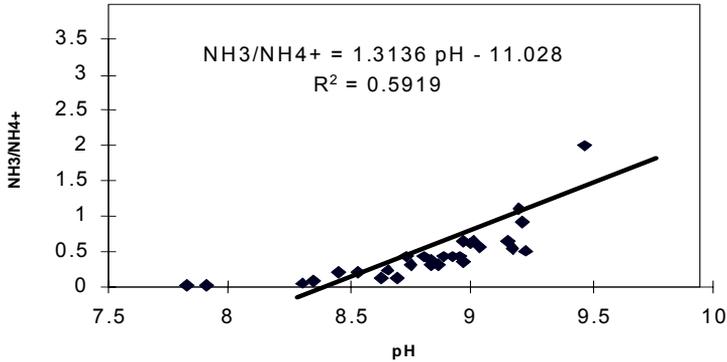


Figure 13. Valeurs du rapport  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$  et pH enregistrés sur le CAHR.

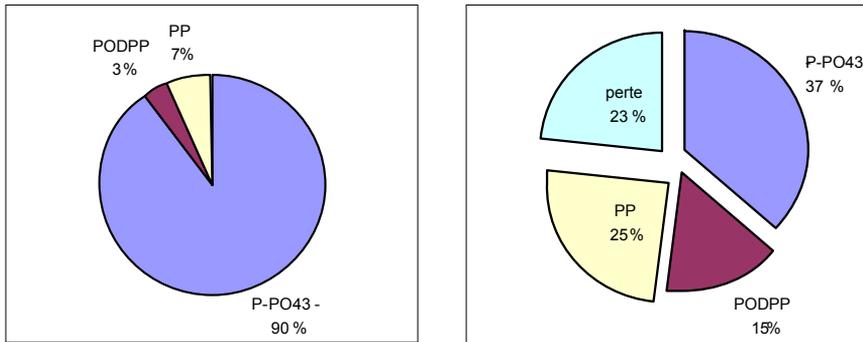


Figure 14. Bilan du phosphore dans le CAHR conduit comme unité de traitement tertiaire. (PP: P particulaire ; PODPP: P organique dissous P et polyphosphates)

Sur un autre plan, on constate que la  $\text{DBO}_5$  diminue alors que la DCOt augmente à cause des algues. La différence observée entre les valeurs de La DCOt et celles de la  $\text{DBO}_5$  prend son origine dans le fait que les cellules algales sont oxydées dans le test DCO. Ce dernier ne fait pas la distinction entre matière organique polluante provenant des eaux usées et matière organique algale fabriquée *de novo* au cours de l'épuration dans l'unité de post-traitement. Dans le test  $\text{DBO}_5$ , les cellules algales ne représentent pas une matière biodégradable et donc leur présence ne change pas le résultat du test tant que les flacons sont incubés à l'obscurité.

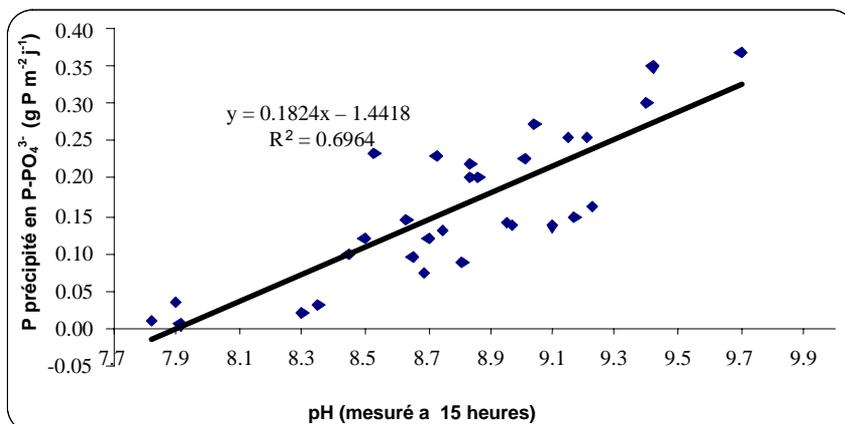


Figure 15. Phosphore précipité en fonction de la valeur du pH dans le CAHR

Tableau 8. Rôle et performances du bassin de maturation.

Paramètre	Influent	Effluent	TE (%)
DCO (mg/l)	250	170	32
DBO <sub>5</sub> (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 <sub>10</sub> /100 ml)	2,7E+04	2,4E+03	1,05*

TE : taux d'élimination ; TE en Log10.

La présence de concentrations algales raisonnables dans l'effluent final n'a pas d'effet de pollution immédiat sur le milieu aquatique récepteur. En revanche, dès leur rejet, ces cellules commencent à oxygéner le milieu et servent d'aliment de base pour la chaîne alimentaire.

C'est pour cela cette raison que la mesure de la DCOt n'a aucun sens quand il s'agit de systèmes basés sur la croissance algale. La DCO soluble ou filtrée convient beaucoup mieux dans ces cas là. En Europe, la contribution des algues est soustraite de la DCOt pour les BDS avant de voir si l'effluent respecte ou non les standards de rejet.

Si l'effluent doit être utilisé pour l'irrigation, alors les algues contenues dans l'effluent représentent une source d'humus, qui permet d'améliorer les caractéristiques agronomiques du sol.

Dans les situations particulières où des techniques d'irrigation localisées de type microjet sont utilisées, notre expérience à l'IAV montre que la mise en place d'un système de filtration (sable plus tamis) reste suffisant pour permettre l'utilisation de l'aspersion sans problèmes.

### **3.2.2. Abatement des pathogènes**

#### **3.2.2.1. Elimination des œufs d'helminthes**

Les œufs des helminthes sont éliminés dans le stade prétraitement. Ils sont retenus dans le lit de boue des réacteurs. Les œufs d'helminthes ne sont plus détectés à la sortie du filtre à gravier.

#### **3.2.2.2. Elimination des coliformes fécaux**

L'élimination des coliformes fécaux se produit dans toutes les composantes de la station avec un taux cumulé de 3,93 unités Log. Le RAFADE incluant le filtre à gravier réalise un taux d'élimination de 1,7 ; le CAHR 1,23 et le BM 1 Unité Log.

La performance du BM est à mettre en relief. Ce bassin élimine 1 U. log alors que la charge qu'il reçoit est beaucoup plus faible que celle appliquée au RAFADE et au CAHR montrant ainsi qu'il s'agit d'une composante qui joue un rôle essentiel dans la désinfection de l'effluent.

Les mécanismes qui conduisent à l'élimination des CF dans le RAFADE diffèrent de ceux agissant au niveau du CAHR et du BM. La décantation et le piégeage (adsorption, floculation etc.) des bactéries ou des floccs dans lesquels sont piégées les bactéries expliquent la disparition des CF dans le RAFADE.

Dans le CAHR et le BM, les mécanismes d'élimination des CF sont quasi identiques. Les variations du pH et de la concentration en OD entre des valeurs extrêmes entre le jour et la nuit sont gouvernées par l'activité photosynthétique des algues. Elles induisent une fragilisation des CF et diminuent leur survie (Pearson *et al.* 1987; Quin *et al.* 1991; Fernandez *et al.* 1992 ; El Hamouri *et al.*, 1994).

## **4. Dimensionnement et exploitation**

### **4.1. Dimensionnement des réacteurs**

#### **4.1.1. Volume du réacteur**

Le volume du réacteur est le principal paramètre de dimensionnement des réacteurs. Il détermine le temps de séjour dans le réacteur et a donc une action directe sur la performance et le coût de réalisation du projet. Le dimensionnement du RAFADE doit permettre un temps de séjour minimum de 45 heures ou 2 jours environ.

#### **4.1.2. Forme géométrique et matériaux de construction**

Les réacteurs peuvent avoir une forme rectangulaire ou circulaire. La forme circulaire est plus stable et plus économique à la construction. Elle peut être recommandée pour les petites installations alors qu'il serait plus avantageux de recourir à la forme rectangulaire, ou mieux carrée, pour les plus grandes installations où les murs de séparation peuvent être utilisés par les réacteurs contigus.

Le matériau de construction retenu est le béton armé. Les parties supérieures des réacteurs, notamment les derniers mètres, doivent être protégé contre la corrosion à l'aide d'une peinture résistante à l'acide sulfurique. Ce dernier se forme en présence d'hydrogène sulfuré et du peu d'oxygène présent sous les coupoles et détruit le béton. Les mêmes précautions doivent être prises pour le décanteur.

#### **4.1.3. Profondeur du réacteur**

Le pompage des eaux usées est économiquement lourd à supporter d'où la nécessité de construire des réacteurs alimentés par gravité sauf quand les conditions topographiques ne le permettent pas. Dans ces conditions, il est recommandé de réduire la partie construite au dessus du sol. L'enterrement des réacteurs permet de réduire le coût mais il faut prendre en compte le niveau de l'eau souterraine pour éviter les éventuels problème d'instabilité des ouvrages.

La profondeur (ou hauteur) est liée à la performance : plus cette dernière est importante, meilleure est la performance. La profondeur détermine la vitesse d'ascension (équation 4). Des valeurs élevées de cette vitesse sont recherchées pour améliorer le contact entre les cellules bactériennes et l'influent (substrat). Cependant, des valeurs excessives de la vitesse d'ascension peuvent conduire au lessivage des boues actives et à la réduction

de la concentration des boues dans le réacteur. Rappelons que la concentration des boues dans le réacteur conditionne le taux de digestion. La moyenne quotidienne de vitesse d'ascension ne doit pas dépasser  $1 \text{ m h}^{-1}$

$$V = Q_i/A = V_r/TRH \cdot A = H/TRH \quad (5)$$

V: vitesse d'ascension (m/h);  $Q_i$ : débit quotidien moyen ( $\text{m}^3/\text{d}$ ) A: surface du réacteur ( $\text{m}^2$ );  $V_r$ : volume du réacteur ( $\text{m}^3$ ); H: hauteur (profondeur) du réacteur (m); TRH; temps de rétention hydraulique (h).

#### 4.1.4. Distribution de l'influent et collecte de l'effluent

Une distribution homogène de l'influent à la base réacteur est essentielle pour le dimensionnement. Il est recommandé de retenir une entrée par  $4 \text{ m}^2$  de surface de réacteur. Le dimensionnement des entrées et des sorties obéit aux lois de l'hydraulique des écoulements à surface libre et les répartiteurs sont adoptés pour assurer une distribution égale entre les diverses conduites d'alimentation.

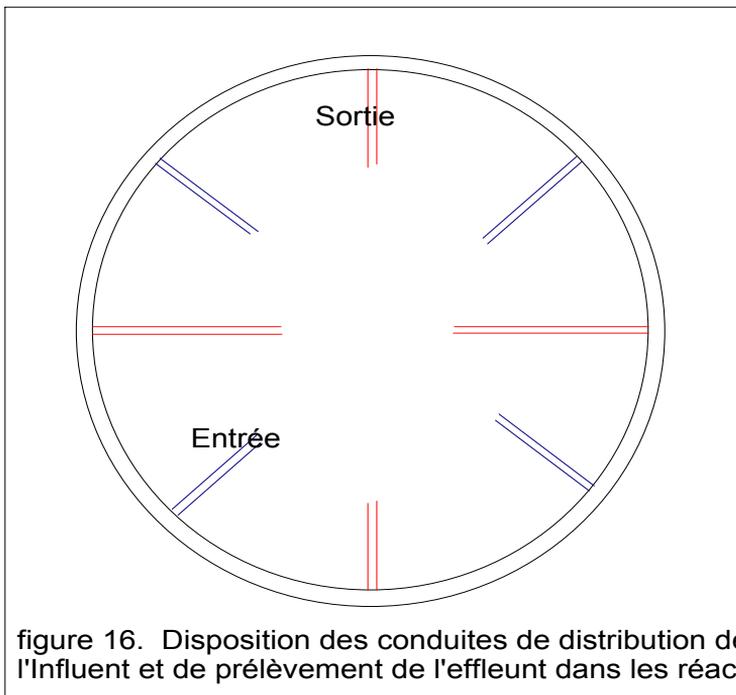
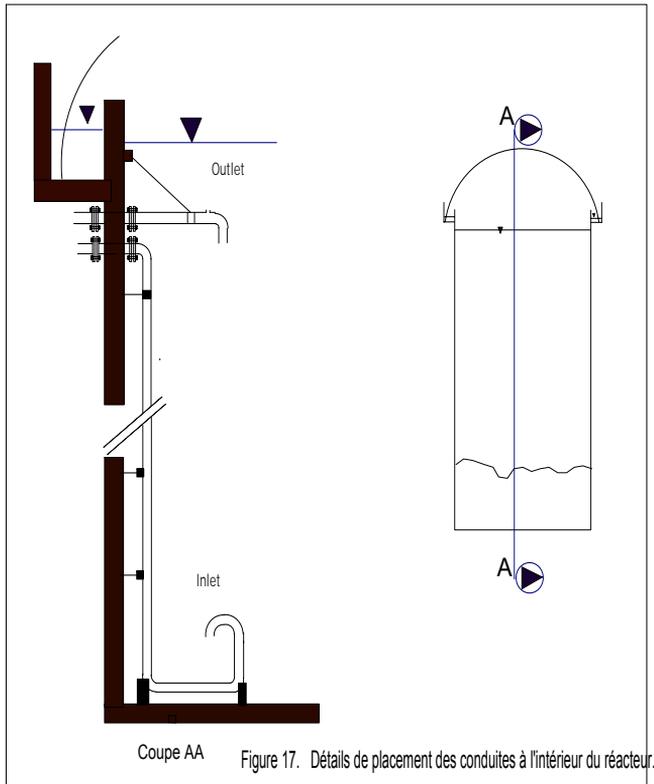


figure 16. Disposition des conduites de distribution de l'Influent et de prélèvement de l'effluent dans les réacteurs

Le contrôle de la hauteur d'eau et la collecte homogène de l'effluent au sommet du réacteur est importante pour éviter les courts-circuits (figures 16 et 17). Le dimensionnement des conduites d'entrée et d'évacuation est relativement simple pour les petites unités mais pourrait représenter une difficulté certaine pour les grandes installations.



### 4.1.5. Collecte du biogaz et système anti-odeur

Les réacteurs sont entièrement couverts à l'aide de coupes fabriquées en polyester dur et résistant à l'acide. La base des coupes repose dans un chenal construit tout au tour du réacteur et ayant les dimensions de 0.40 m de profondeur et 0.40 m de largeur (figures 17 et 18). Ce chenal est rempli d'effluent provenant du post-traitement et fonctionne comme un joint hydraulique pour empêcher le biogaz et les mauvaises odeurs de s'échapper du réacteur. L'eau du chenal est remplacée une fois par semaine.

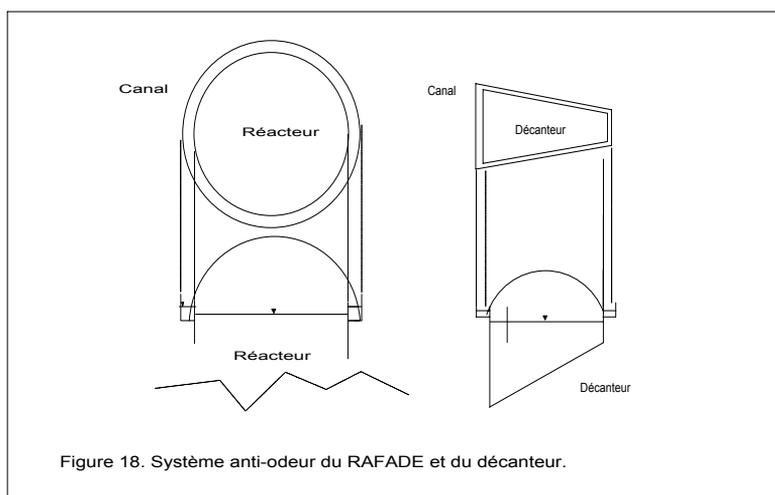


Figure 18. Système anti-odeur du RAFADE et du décanteur.

### 4.2. Dimensionnement du CAHR

Le chenal algal à haut rendement est réacteur photosynthétique dans lequel les algues microscopiques vertes vivent en complémentarité avec des bactéries hétérotrophiques.

L'eau à l'intérieur du carrousel est maintenue en circuit fermé à l'aide d'une roue à palettes qui tourne à 8 tours par minute (TPM) imprimant une vitesse de 0,2 m/s à l'eau (en surface). La roue est entraînée par un moteur électrique associé à un boîtier de réduction de vitesse.

L'objet de l'agitation en continu de l'eau est d'empêcher les algues de sédimenter et d'être ainsi exposées à la lumière à intervalles réguliers. Le CAHR est en réalité un réacteur photosynthétique doué d'une grande efficacité. Un maximum d'oxygène est produit par les algues conduisant à des concentrations en OD qui atteignent régulièrement trois fois la concentration de saturation normale. Parallèlement à ceci, un prélèvement intense de  $\text{CO}_2$  occasionne une augmentation importante de pH laquelle peut atteindre des valeurs aussi hautes que 8.5 à 9. Les courbes de DO et de pH évoluent en parallèle donnant un maximum autour de 14 heures (El Hamouri *et al.*, 1994; El Hamouri *et al.*, 1995).

La conduite du CAHR comme unité de traitement tertiaire est argumentée dans la section 1 du document. Le dimensionnement du CAHR pour une conduite en mode de traitement tertiaire se base sur un temps de rétention hydraulique de 3 jours maximum.

Si des limites de rejet sur N et P sont imposées alors, le dimensionnement doit être basé sur les données cinétiques relatives au prélèvement de ces deux éléments. Les constantes de premier ordre,  $k_{20^{\circ}\text{C}}$  d'élimination de N et P ont été déterminées sur le CAHR de l'IAV (tableau 1). Leur utilisation permet de calculer le temps de séjour nécessaire pour atteindre les concentrations requises étant entendu que nous avons, par ailleurs, établi que le modèle piston peut être retenu pour exprimer le rapport entre les concentrations entrante et sortante du CAHR (voir équation 6 et annexe 1)

$$S_e/S_i = e^{-kt} \quad (6)$$

$S_e$  et  $S_i$  sont les concentrations en NTK dans l'effluent et dans l'influent respectivement;  $k$  constante de premier ordre d'élimination de N ou de P et  $t$  le temps de séjour.

La valeur de  $k_{20^{\circ}\text{C}}$  est obtenue à partir de la relation (7)

$$k_{T^{\circ}\text{C}} = k_{20^{\circ}\text{C}} \theta^{(T^{\circ}\text{C} - 20)} \quad (7)$$

Avec  $k_{T^{\circ}\text{C}}$  et  $k_{20^{\circ}\text{C}}$  sont les valeurs de  $k$  à  $T^{\circ}\text{C}$  et à  $20^{\circ}\text{C}$  respectivement et  $\theta$ , la constante d'Arrhenius pour laquelle la valeur retenue est 1,047.

#### 4.2.1. Forme géométrique

La forme et les dimensions à respecter pour la construction du CAHR sont relativement bien connues et ont été rapportés notamment par Oswald (1998).

#### 4.2.2. Roue à palettes

La roue à palette peut être manufacturée localement par un ferronnier. Les palettes peuvent être confectionnées à partir de bandes de convoyeurs de minerais usagées (figure 19). Les détails de construction de la roue sont donnés dans l'annexe 6.

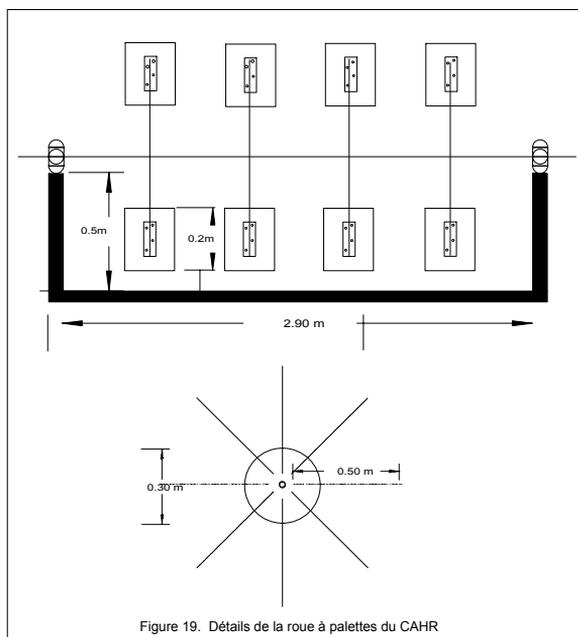
Le moteur électrique et le boîtier de réduction de vitesse utilisés dans la station de l'IAV ont les caractéristiques suivantes :

Moteur: 380/400 V; puissance: 0.37 kW; 1380 TPM à 50 Hz.

Boîtier de réduction de vitesse compact:  $i = 100$ ; vitesse angulaire : 13.8 TPM.

Le choix des pignons d'entraînement permet de passer à la vitesse finale de la roue qui est autour de 8 TPM. Le moteur et le boîtier de réduction de vitesse

associé utilisés à l'IAV (voir album photos) ont été acquis auprès de marchands de pièces usagères puis adaptées par un ajusteur local.



### 4.3. Dimensionnement du bassin de maturation

Le dimensionnement du BM doit être basé sur la formule de Marais qui prédit le nombre la concentration des CF à la sortie du bassin. Cette méthode est communément utilisée dans le dimensionnement des bassins de stabilisation et peut être trouvée dans tous les manuels traitant de cet aspect (voir annexe 1 concernant un exemple de dimensionnement).

### 4.4. Paramètres de conduite

Cette partie reprend l'essentiel de l'expérience accumulée en conduisant la station de l'IAV pendant les cinq années de suivi.

#### 4.4.1. Caractéristiques des eaux usées et charge volumique

Les eaux usées du campus de l'IAV sont modérément concentrées conduisant à des charges volumiques au niveau du RAFADE situées dans la fourchette de  $0,5 - 0,7 \text{ kg DCOt m}^{-3}\text{d}^{-1}$ . Des charges dépassant  $1 \text{ kg DCO m}^{-3}\text{d}^{-1}$  ont été appliquées en certaines périodes et furent bien assimilées par le système.

Les eaux usées sont très concentrées dans la plupart des pays MENA par exemple, les eaux usées de la ville de Sana'a au Yémen ont une DCO de 1.600 mg/l. Cette forte concentration des eaux usées prend son origine dans la rareté de l'eau et dans les interruptions répétées qui ont lieu dans l'approvisionnement en eau potable. Même de telles concentrations ne devraient pas représenter un handicap pour le RAFADE étant entendu que les réacteurs anaérobies sont réputés pouvoir supporter des charges beaucoup plus importantes que le bassin anaérobie classique.

En ce qui concerne la composition chimique des eaux usées, les bactéries anaérobies ont notamment besoin, à l'instar des autres organismes vivants, d'azote et de phosphore pour soutenir leur croissance et donc d'assurer des performances optimales. Il est recommandé qu'un rapport DCO/N/P minimum de 100/1,25/0,17. De telles concentrations sont aisément trouvées dans les eaux usées domestiques et de ce fait il ne serait pas nécessaire d'opérer une correction en ajoutant des éléments chimiques. Bien évidemment, des concentrations plus grandes en N et P ne seront pas gênantes pour le système RAFADE.

#### **4.4.2. Concentration et âge des boues**

La concentration des boues dans le réacteur et leur âge (ou temps de rétention des solides) ont une influence directe sur la performance du réacteur. L'idée résidant derrière le contrôle de la concentration des boues ou masse des boues dans le réacteur est celle d'assurer un contact optimal entre les bactéries, responsable de la dégradation et les déchets contenus dans l'influent. L'âge des boues est déterminé selon l'équation (4).

$$As = Xr / (Xd + Xe) \quad (4)$$

Où,  $As$  est l'âge des boues (jour);  $Xr$ , masse des boues retenues dans le réacteur en kg MES;  $Xd$  et  $Xe$  sont respectivement la quantité de boues éliminée quotidiennement et la quantité éliminée par jour à partir du décanteur en kg MES/jour.

La production spécifique des boues est donnée en kg de MES ou de MVS par kg de DCO, de DBO ou de MES admises ou éliminées par le réacteur. Le RAFADE génère 0,22 g MES  $g^{-1}$  DCO admise ou 0,28 g MES  $g^{-1}$  DCO éliminée. Le rapport MVS/MES de la boue produite est de 0,53 et la production spécifique de 4 kg par personne $^{-1}$  an $^{-1}$ .

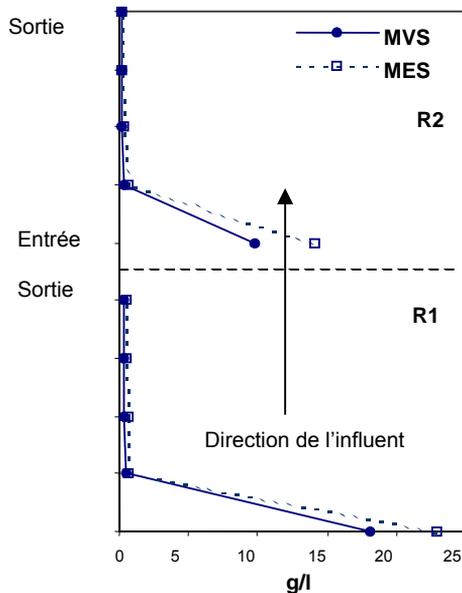


Figure 20. Profil des boues dans les réacteurs.

#### 4.4.3. Profil des boues dans le réacteur

Le profil des boues dans le réacteur dépend de deux paramètres qui sont l'âge des boues et la vitesse d'ascension de l'influent. Le profil doit permettre la formation du matras de boues dans le fond du réacteur suivi d'un gradient de concentration de boues allant en diminuant du bas vers le haut.

Le profil moyen de boues obtenu sur les réacteurs est présenté dans la figure 20. Il montre la formation d'un matras de boues de 1 m dans R<sub>1</sub> et de 2 m dans R<sub>2</sub>. Mais la concentration de ce matras est plus concentrée dans R<sub>1</sub>.

#### 4.4.4. Évacuation des boues des réacteurs

Le choix de ne pas intervenir manuellement pour éliminer les boues excédentaires des réacteurs pour des raisons de simplification de l'exploitation et de la maintenance oblige à conduire les réacteurs selon le mode "contenance maximum de boues" (van Haandel & Lettinga, 1994). Selon ce mode, la boue s'accumule dans le réacteur jusqu'à un maximum. Une fois ce maximum atteint, le réacteur entre dans une période de lessivage ou "washout" qui se termine quand la concentration des boues dans le réacteur est au minimum puis une nouvelle période d'accumulation commence. L'évacuation des boues est minimum pendant la période d'accumulation.

La durée d'un cycle complet accumulation/lessivage dépend de la saison et de l'activité dans le campus mais donne un temps moyen de rétention des solides de 32 jours. Il faut noter, par ailleurs, que le suivi du profil des boues montre une épaisseur de boue au fond des deux réacteurs qui ne descend jamais en dessous de 1 m.

A la station d'épuration de l'IAV, les boues n'ont jamais été retirées ni de  $R_1$  ni de  $R_2$  depuis 1997. L'excédant de boues qui quitte les réacteurs est piégé dans le décanteur duquel, il est retiré puis dirigé vers les lits de séchage des boues. Cette opération d'évacuation des boues, qui dure 20 minutes environ, est l'une des tâches quotidiennes de l'ouvrier chargé de l'entretien de la station. Elle consiste à ouvrir la vanne située dans le fond du décanteur ce qui permet grâce à la pression hydrostatique de diriger les boues épaissies vers les lits de séchage. A l'IAV, le volume des boues évacuées quotidiennement varie entre 60 et 100 litres par jour contenant 2% de solides dont la composition est organique à 53%.

Le test de stabilité des boues montre que celles retirées du décanteur sont stables à 93% ce qui signifie que seul un faible pourcentage (7%) sont encore capables de produire du méthane quand elles sont incubées en présence d'acétate à 27°C. Les boues évacuées ont un rapport MVS/MES de 0,53. Il est à appeler à ce propos qu'une boue présentant un rapport supérieur à 0.7 nécessite une étape supplémentaire de stabilisation.

#### 4.4.5. Lits de séchage des boues

Les lits de séchage de boues sont caractérisés par leur productivité,  $P_d$ . Cette dernière est définie par l'équation (7)

$$P_d = F_s / T_t \quad (7)$$

Où  $P_d$  est la productivité ( $\text{kg matière sèches m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ );  $F_s$ , la charge de boues appliquée ( $\text{kg MES m}^{-2}$ ) et  $T_t$ , le temps total nécessaire pour un cycle complet de séchage (jour).

La productivité des lits de séchage de la station de l'IAV est de 0,75 kg de matière sèche  $\text{m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  pour des boues contenant 90% de solides.

Par comparaison, les lits de séchage associés à un UASB construit à Pedregal, Brésil, avaient une productivité de 1,4 kg matière sèche  $\text{m}^{-2} \text{ d}^{-1}$  (van Haandel et Lettinga, 1994) soit le double de la valeur de Rabat. La différence pourrait être due aux conditions plus favorables du climat tropical du Brésil.

Dans les conditions climatiques de Rabat (climat méditerranéen) et appliquant une charge surfacique de 1,5 kg MES m<sup>2</sup>, la teneur relative en eau décroît de 97 à 10% en 10 jours en saison froide et pluvieuse et en 3 jours dans la saison estivale, chaude. Pendant la saison pluvieuse, les lits peuvent être couverts à l'aide d'un film de polyéthylène utilisé pour couvrir les serres.

### **5. Personnel et procédure d'exploitation et de maintenance**

#### **5.1. Qualification du personnel**

La technologie RACHAHR appartient à une catégorie nouvelle de systèmes appelés selon la terminologie anglo-saxonne "high concept-low cost technologies" et qui englobe les réacteurs anaérobies.

La croyance largement répandue selon laquelle les systèmes extensifs ne demandent pas un personnel qualifié et une attention permanente pour leur exploitation et leur maintenance est encore moins vraie pour ce type de technologies. La présence d'une équipe qualifiée est essentielle pour l'exploitation et la maintenance de la technologie RACHAHR. En revanche, elle peut s'accommoder d'une main d'œuvre moindre. Un ouvrier permanent suffit pour conduire convenablement l'ensemble des tâches de routine sur la station de l'IAV qui sert 1000 personnes environ. La technologie ne requiert pas une main d'œuvre supplémentaire pour une taille de 5.000 habitants.

Un personnel formé pour l'exploitation et la maintenance des BDS ou des marais artificiels (constructed Wetland) pourrait aisément prendre en charge une station basée sur la technologie RACHAHR moyennant un petit complément de formation.

#### **5.2. Procédure pour l'exploitation et la maintenance**

Un modèle de journal d'exploitation est présenté en annexe 2. Les principales actions menées sur la station doivent être quotidiennement consignées dans ce journal. Le journal doit également comporter les traces des pannes des équipements et de leur remplacement et tout événement anormal qui se produit sur la station.

#### **5.3. Procédure pour remédier aux dysfonctionnements**

Une procédure "pas à pas" pour remédier aux dysfonctionnements de la technologie RACHAHR est résumée dans un manuel repris dans l'annexe 3. Cette procédure pourrait aider l'opérateur à obtenir des performances optimales et à assurer la durabilité de ses installations.

## **6. Conditions d'applicabilité de la technologie RACHAHR**

Le développement de la technologie RACHAHR s'inscrit dans la tendance actuelle de gestion des ressources en eau selon les concepts qui garantissent la durabilité. L'assainissement décentralisé constitue l'une des approches essentielles de cette tendance. La technologie RACHAHR respecte l'environnement. Elle empêche les émanations de méthane dans l'atmosphère et permet ainsi de réduire l'effet de serre. Son coût abordable, sa faible emprise sur le terrain ainsi que la simplicité de son exploitation en font un outil utile pour mener à bien des projets de recyclage et de réutilisation des eaux pour les petites communautés.

### **6.1. Rareté et qualité de l'eau**

La rareté de l'eau est un des problèmes cruciaux de la région MENA. La plupart des pays de la région sont en effet, localisée dans les zones chaudes et sèches du globe. De plus, ces pays font face à des besoins en eau importants pour satisfaire la demande croissante en eau pour les secteurs de l'industrie et de l'agriculture.

Par ailleurs, le coût d'un approvisionnement en eau potable en qualité et en quantité satisfaisantes à des populations en pleine croissance reste élevé d'autant plus que ce coût augmente quand la qualité de l'eau brute est mauvaise. La généralisation de l'épuration des eaux usées, notamment pour les petites et moyennes communautés, protégera les ressources propres et aidera à réduire le prix de revient de l'eau potable.

Sur un autre plan, la construction des réseaux d'assainissement de type conventionnel en zones d'habitat dispersé est coûteuse. Des solutions privilégiant la décentralisation et les systèmes de collecte à petit diamètre ou small-bore gravity sewer system (SGSS) peuvent être combinées avec une épuration basée sur la technologie RACHAHR pour permettre la réalisation de projets à des coûts raisonnables.

Enfin, il est connu que le secteur de tourisme reste l'un des piliers de l'économie de plusieurs pays de la région MENA (Egypte, Liban, Tunisie, Jordanie et Maroc) où les principaux sites à visiter sont souvent éloignés des villes et donc des réseaux d'assainissement. Dans le même temps, les hôtels ont besoin de jardins et d'espaces verts attractifs. La technologie RACHAHR peut être recommandée pour ces situations. Elle aiderait à résoudre, à moindre coût, le problème de l'assainissement et celui de l'eau d'arrosage des espaces verts surtout qu'elle est capable de fournir une eau qui respecte les normes

environnementales (faible concentration finale en N et P) et sanitaires (absence des oeufs d'helminthes et faible concentration en coliformes fécaux)

### **6.2. Groupes-cible pour la dissémination de la technologie** (voir tableau 9)

### **6.3. Conditions climatiques**

Les performances obtenues avec la technologie RACHAHR à l'IAV à Rabat, sous conditions climatiques méditerranéennes pourraient être meilleures dans les pays où les températures des saisons froides sont moins basses.

### **6.4. Infrastructure recommandée**

- i) Existence d'un réseau de collecte des eaux usées (conventionnel ou small bore gravity sewer)
- ii) Existence d'un réseau électrique ou d'un générateur diesel.

Toutefois, les coupures de courant même pour des périodes longues (jusqu'à une semaine par exemple) ne porteraient pas préjudice à l'efficacité de la AHRPCT sauf quand les eaux usées doivent être relevées par pompage.

### **6.5. Budget d'exploitation et de maintenance**

Le succès de tout programme d'exploitation et de maintenance dépend des ressources financières réservées à cet effet ainsi que de la disponibilité d'une main d'œuvre qualifiée. La plupart des échecs des stations d'épuration rencontrés ne sont pas dus à la défaillance des technologies choisies mais à la faiblesse voire l'inexistence des ressources budgétaires des communes rurales ou municipalités et de l'absence d'un personnel qualifié et motivé.

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---

**Tableau 9. Groupes cibles pour la dissémination de la technologie RACHAHR (Maroc comme exemple).**

Groupe ciblé	Nombre / Localisation géographique	Structure, organisation statut institutionnel	Intérêts et attentes	RACHAHR aidera à
Municipalités et conseils élus locaux	Municipalités et communes rurales situées à l'intérieur du pays (500 à 20,000 habit) Population concernée : 10 millions (45% connexion au réseau d'assainissement sans installations d'épuration).	Régies par la charte communale qui leur octroie la responsabilité de l'eau potable et de l'assainissement dans leur territoire. Reçoivent des subventions du gouvernement et peuvent mobiliser des prêts du FEC (fond de l'équipement Communal). La contribution de la population au coût des services municipaux est très insuffisante.	Attendent des fonds supplémentaires du gouvernement central, pour faire face aux investissements et aux coûts d'exploitation et de maintenance des installations. Sont attirés par les solutions bon marché et les projets d'assainissement à leur portée. Ont peu accès aux technologies innovantes.	Réalisation de projet de petite et moyenne importance à des coûts et des délais raisonnables.
Agence Nationale de l'eau potable (Office national d'eau potable, ONEP).	-	En charge de la production et de la distribution de l'eau potable et de l'assainissement dans les petits centres.	Réaliser des projets durables. En attente d'une contribution substantielle des populations dans l'investissement et l'exploitation du service d'assainissement.	Adoption des technologies innovantes réduit le coût des projets.

**Tableau 9. Groupes ciblés pour la dissémination de la technologie RACHAHR (Maroc comme exemple) (suite).**

Secteur privé, secteur tourisme et compagnies immobilières	-	Petites et moyennes entreprises et quelques grandes entreprises privées ou étatiques.	En attente d'un plus grand rôle dans le secteur pour promouvoir la compétitivité et donc une meilleure qualité de service.	Introduction des technologies innovantes, du recyclage et un assainissement adapté pour un assainissement à coût acceptable.
Ministère de l'environnement Ministère de l'intérieur et Ministère des travaux publics	Les administrations centrales, Agences de bassins, et Directions régionales	Prendre des décisions, imposer les redevances d'assainissement, planification et financement des projets	Elaborer les stratégies pour la lutte contre la pollution, la conservation des ressources naturelles et le développement durable.	Gagner la capacité d'analyser et adopter des technologies innovantes, des approches non conventionnelles

## **7. Coût d'exploitation et de maintenance**

Le coût d'exploitation et de maintenance présenté dans ce document est celui calculé à partir des dépenses effectuées pendant la durée de cinq années consécutives de suivi de la station de l'IAV, laquelle sert 1.000 personnes environ. Les chiffres présentés ne tiennent pas compte du coût relatif au pompage des eaux usées pour leur acheminement à la station (tableau 10).

Le coût se situe dans la fourchette des chiffres rapportés pour des stations BDS de taille similaire sauf pour le coût relatif à la gestion des boues, lequel est plus faible pour la technologie RACHAHR. Les rubriques 1 et 4 ne changeraient pas de manière significative à l'intérieur d'une fourchette de taille allant de 1000 à 5000 personnes.

## **8. Réutilisation de l'effluent**

L'effluent de la station d'épuration de l'IAV est en majorité utilisé pour l'arrosage des espaces verts du campus depuis 1997. Une petite partie est utilisée par le département d'agronomie pour des essais d'amélioration génétique de la fève. Ceci dit, il est clair que l'essentiel de l'effort dans la plupart des pays de la région MENA doit être mis sur la réutilisation en agriculture plutôt que sur l'arrosage des espaces verts.

A ce sujet, les directives de l'organisation mondiale de la Santé pour la réutilisation des eaux usées en agriculture et en aquaculture publiées en 1989 servent de base dans les projets de réutilisation dans de nombreux pays de la région.

Selon ces directives, un effluent de la catégorie A peut être utilisé pour une réutilisation non restrictive tandis que des effluents ayant une qualité correspondant aux catégories B et C ne peuvent pas être utilisés pour produire des denrées consommées à l'état cru (voir tableau 11 ; WHO, 1989).

La technologie RACHAHR peut s'adapter aux deux situations décrites ci-dessus et pourrait permettre une protection efficace des eaux superficielles ou souterraines menacées par la pollution. La technologie autorise une grande flexibilité permettant de respecter des standards de qualité peu restrictifs en vue de satisfaire des objectifs limités de protection de l'environnement lesquels seraient dictés par des capacités d'investissement faible et/ou par des standards de rejets peu restrictifs.

Une étude de cas est réservée à l'approche relativement nouvelle de valorisation des effluents des stations d'épuration pour la production de fleurs est présentée en annexe 4.

L'avantage d'une telle approche est qu'elle permet d'écartier les problèmes sanitaires liés au consommateur en même temps que la production d'une culture à haute valeur ajoutée.

**Tableau 10. Coût d'exploitation pour une capacité de 1000 personnes.**

	(US \$)
1. Personnel	
1 Technicien (¼ temps)	3.600
1 Ouvrier	3.600
1 Gardien de nuit	4.800
1 Jardinier (½ temps)	1.800
Sous total	13.800
2. Energie électrique	1.428
3. Maintenance	
Dégrillage	600
Vanes et autres accessoires.	300
Pompes : maintenance et réparation	200
Roue à palettes, moteur & mécanisme de transmission	200
Travaux (murs, chemins de passage etc.)	1.000
Couvercles des réacteurs (peinture)	300
Peinture station	400
Sous total	3.000
4. Analyses de l'eau	800
<b>Total</b>	<b>25.828</b>

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

**Tableau 11. Directives recommandées pour la qualité microbiologique des eaux usées utilisées dans l'agriculture<sup>a</sup> (OMS,1989).**

Catégorie	Conditions de réutilisation	Groupe exposé	Nématodes intestinaux <sup>b</sup> (moyenne arithmétique du nombre œufs/litre)	Coliforme intestinaux (moyenne <sup>c</sup> géométrique)	Procédé traitement susceptible d'assurer la qualité micro- biologique requise
A	Irrigation de cultures consommées à l'état cru, des terrains de sport, des Jardins publics <sup>d</sup> public	Ouvriers agricoles consommateur public	< or = 1	< 1000	Une série de bassins de stabilisation conçus de manière à obtenir la qualité microbiologique requise ou tout autre procédé de traitement équivalent
B	Irrigation de cultures céréalières, industrielles et fourragères, des pâturages et des plantations d'arbres <sup>e</sup>	Ouvriers agricoles	< or =1	Aucune norme recommandée	Rétention en bassins de stabilisation pendant 8 à 10 jours ou tout autre procédé d'élimination des helminthes et coliformes intestinaux.
C	Irrigation localisée des cultures de la catégorie B si les ouvriers agricoles et le public ne sont pas exposés	Néant	Sans objet	Sans objet	Traitement préalable en fonction de la technique d'irrigation mais au moins une sédimentation primaire

a : Dans certains cas, il faut tenir compte des conditions locales épidémiologiques, socioculturelles et environnementales et modifier les directives en conséquence.

b : Espèces *Ascaris* et *Trichuris* et *ancylostoma*.

c : Pendant la période d'irrigation.

d : Une directive plus stricte ( $\leq 200$  coliformes intestinaux par 100 ml) est justifiée pour les pelouses avec lesquelles le public peut avoir un contact direct comme les pelouses d'hôtels.

e : Dans le cas des arbres fruitiers, l'irrigation doit cesser deux semaines avant la cueillette et les fruits tombés ne doivent jamais être ramassés. Il faut éviter l'irrigation par aspersion

## Références

- Actes du projet MOR 86-018 (1998). Epuration et réutilisation des eaux usées à des fins agricoles. UNDP-FAO-WHO.
- EL Hamouri, B., Khallayoune, K., Bouzoubaa, K., Rhallabi, N. & Chalabi, M. (1994). High-rate algal pond performances in fecal coliforms and helminth egg removals. *Wat.Res.* 28 (1), 171-174.
- El Hamouri B., Jellal J., Outabiht H., Nebri B., Khallayoune K., Benkerroum A., Hajli A. & Firadi R., (1995). The performances of a High-Rate algal Pond in the Moroccan climate. *Water Science & Technology* 31, (12), 67-74.
- El Hafiane F. Rami A. and El Hamouri B. (2003). Mécanismes d'élimination de l'azote et du phosphore un chenal algal à haut rendement. *Sciences de l'eau*, vol 16, (2), 157-172.
- El Hafiane F. and El Hamouri B. (2002). Performances d'un système anaérobie à deux phases dans le traitement des eaux usées domestiques sous climat Méditerranéen. *Actes IAV Hassan II*, 22 (3) 133-141.
- El Hamouri B., Rami, A, and Vassel J.L. (2003). The reasons behind the performance superiority of a high rate algal pond over three facultative ponds in series. *Wat.Sci.Technol.* 48 (2): 269-276.
- El Ouarghi H., Boumansour B. E., Dufayt O. El Hamouri B. and Vassel J. L. (2000). Hydrodynamics and oxygen balance in a high rate algal pond. *Wat.Sci.Technol.* 42 (10-11): 349-356.
- Fdz-Polanco F., Fdz-Polanco M., Fernandez N., Uruena M.A., Garcia P.A. & Villaverde S. (2001). Combining the biological nitrogen and sulfur cycles in anaerobic conditions. *Proceedings Farewell symposium Gatzke Lettinga, March 2001, Wageningen.*
- Fernandez A. Tejedor C. and Chordi A. (1992). "Effect of different factors on the die-off of faecal bacteria in a stabilization ponds purification plant". *Wat. Res.* 26(16) 1093-1098.
- Haskoning (1994). Royal Dutch Consulting Engineers and Architects. *Anaerobic treatment of domestic wastewater under tropical conditions*. DECOM manual.
- Lettinga G., Field J., Van Lier J., Zeeman G. & Hulshoff P.O.L.L.W. (1997). Advanced anaerobic wastewater treatment in the near future. *Wat. Sci. Technol.* 35 (10), 5-12.
- Malina J.F.J 1962. Variable affecting anaerobic digestion. *Public works*, 93, 9, pp 113-116.
- McCarty P.L. 1964. Anaerobic wastewater fundamentals. *Public works*, 95, 10, pp 123-126.
- Mesplé F., Trousselier M., Casellas C. & Bontoux J. (1995) Difficulties in modelling phosphate evolution in a high-rate algal pond. *Wat.Sci.Techn.* 31 (12): 45-54.
- Minocha V.K. & Prabhakar Rao A.V.S. (1988) Ammonia removal and recovery from urea fertilizer plant waste. *Environmental Technology Letters* 9: 655-664.
- Moutin T., Gal J.Y., EL Halouani H., Picot B. & Bontoux J.(1992) Decrease of phosphate concentration in a high rate pond by precipitation of calcium phosphate: theoretical and experimental. *Wat.res.* 26 (11):1445-1450.

- Mulder A., Vandergraaf A.A., Robertson L.A. & Kuenen J.G. (1995). Anaerobic ammonium oxidation discovered in a denitrifying fluidized bed reactor. *FEMS Microbiology Ecology*. 16 (3) 177-183.
- Nurdogan Y. & Oswald W.J. (1995) Enhanced nutrient removal in high-rate ponds. *Wat.Sci.Techn.* 31 (12):33-43.
- Oswald, W. J. and Gotaas, H. B. (1957). Photosynthesis in sewage treatment. *Transaction of the American Society of Civil Engineering*, 122, 73-105.
- Oswald W.J. (1988). Large-Scale algal culture systems (engineering aspects). In *Microalgal biotechnology*. By Borowitzka and Borowitzka, eds., Cambridge University Press, U.K.
- Ouazzani N. (1998). *Réutilisation en irrigation des eaux usées traitées : systèmes extensifs et critères de qualité agronomique*. Thèse de Doctorat d'état es-Sciences. Univ. Cadi Ayad. Fac. Sci. Semlalia. Marrakech
- Pearson, H.W, Mara, D.D, and Mills, S.W. (1987). "Physicochemical parameters influencing faecal bacterial survival in waste stabilization ponds". *Wat. Sci. Technol.* 19(12), 145-152.
- Pena M.R. and Mara D.D. (2004). Macrokinetic modelling of COD removal in pilot-scale high-rate anaerobic ponds in: proceedings of the 6<sup>th</sup> International conference on Waste Stabilisation Ponds, Avignon oct.441-448.
- Picot B. El Halouani H., Casellas C., Moersidik S. and Bontoux J. (1991). "Nutrient removal by high rate pond system in a Mediterranean climate *Wat. Sci. Technol.* 23, 1535-1541.
- Picot B. Bahlaoui A. Moersidik S. Baleux B. & Bontoux J. (1992). Comparison of purifying efficiency of high rate algal pond with stabilization pond. *Wat. Sci. Technol.* 25 (12): 197-206.
- Quin D., Bliss P.J, Barness D. and Firtz Gerald P.A. (1991). "Bacterial (Total Coliform) die-off in maturation ponds". *Wat. Sci. Technol.* 23, 1525-15.
- van Haandel A. and Lettinga G. (1994). *Anaerobic Sewage Treatment in: A Practical Guide for Regions with a Hot Climate*. Wiley & Sons, Chichester, UK.
- Wang K. (1994). *Integrated anaerobic and aerobic treatment of sewage*. PhD thesis. Agricultural University. Wageningen, the Netherlands.
- World Health Organization (WHO) (1987). *Wastewater stabilization ponds, principle of planning & practice. WHO EMRO Technical publication No 10.*
- World Health Organization (WHO) (1989). *Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture. Technical reports series 778.*
- Zeeman G. & Lettinga G. (1999). The role of anaerobic digestion of domestic sewage in closing the water and nutrient cycle at community level. *Wat. Sci. Technol.* 39 (5), 187-194.

## **ANNEXE 1**

### **Dimensionnement et exemple de plans d'exécution**

#### **Annexe 1.1. Programme Excel pour le dimensionnement de la technologie RACHAHR**

(Exemple pour une communauté isolée de 6.000 habitants de la ville de Sana'a, Yémen)

Programme à télécharger du site de l'IAV Hassan II, Rabat.

<http://www.iav.ac.ma>

Département du Génie Rural

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

**Dimensionnement d'une station de type RACHAHR  
(exemple pour une communauté de 6.000  
habitants à Sana'a, Yémen)  
(Caractéristique: concentration de DCO élevée)**

### Population et eaux usées

Population	personne	6 000
Consommation quotidienne <i>per capita</i>	m <sup>3</sup> /personne*j	0,050
Débit	m <sup>3</sup> j <sup>-1</sup>	300
DCO totale	gm <sup>-3</sup>	1 600
DCO appliquée	kg j <sup>-1</sup>	480
Matières en suspension (MES)	g m <sup>-3</sup>	600
MES appliquées	kg/j	180
NTK	g m <sup>-3</sup>	72
NTK appliqué	kg j <sup>-1</sup>	22
P total	g m <sup>-3</sup>	8
P total appliqué	kg j <sup>-1</sup>	2
Coliformes fécaux	Unité/100ml	10 000 000

### PRE-TREATMENT

#### 1. Réacteur Anaérobie à flux Ascendant et à Deux Etapes (RAFADE)

##### 1.1. Réacteur R1

Temps de rétention hydraulique (TRH)	j	1,0
Volume	m <sup>3</sup>	300
Profondeur	m	8
Diamètre nécessaire	m	7
Nombre de réacteurs en parallèle	U	2
Surface /Réacteur	m <sup>2</sup>	19
Diamètre par réacteur	m	5
Surface/entrée	m <sup>2</sup>	4,3
Nombre d'entrée	U	4
Surface du réacteur R1	m <sup>2</sup>	38
Vitesse d'ascension (max 0,7 m/h)	m h <sup>-1</sup>	0,33
Charge volumique du réacteur R1	kg m <sup>-3</sup> j <sup>-1</sup>	1,6

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Exemple de dimensionnement (suite)

#### 1.2. Réacteur R2

TRH	j	1,0
Volume	m <sup>3</sup>	300
Profondeur	m	8
Diamètre nécessaire	m	7
Nombre de réacteurs en parallèle	U	2
Surface /Réacteur	m <sup>2</sup>	19
Diamètre par réacteur	m	5
Surface/entrée	m <sup>2</sup>	4,3
Nombre d'entrée	U	4
Surface du réacteur R1	m <sup>2</sup>	38
Vitesse d'ascension (max 0,7 m/h)	m/h	0,3
Charge volumique du réacteur R1	kg m <sup>-3</sup> j <sup>-1</sup>	1,1

#### 1.2. Décanteur (pour piéger les particules échappant du réacteur 2)

MES résiduelles	g m <sup>-3</sup>	300
<b>Débit adopté 2 fois débit normal</b>	<b>m<sup>3</sup> j<sup>-1</sup></b>	<b>600</b>
<b>Vitesse de sédimentation</b>	<b>m h<sup>-1</sup></b>	<b>1,5</b>
Surface	m <sup>2</sup>	17
Nombre de décanteurs	U	1
Surface par décanteur	m <sup>2</sup>	17
Profondeur moyenne (2m-entrée 1m sortie) pente 1/1,75	m	1,7
Volume par décanteur	m <sup>3</sup>	28
Largeur	m	2
Longueur	m	10
TRH	j	0,03
MES résiduelles	mg l <sup>-1</sup>	45
MES éliminées	kg j <sup>-1</sup>	77
Volume de boues épaissies évacué <sup>1</sup>	m <sup>3</sup> j <sup>-1</sup>	0,8
Concentration des boues évacuées	kg m <sup>-3</sup>	100

<sup>1</sup>Basé sur les données de Rabat.

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Exemple de dimensionnement (suite)

#### Performances attendues du TSUAR

Taux d'élimination de la DCO selon équation empirique  
 $(C_e/C_i) = 100 * (1 - C_2 * 24 * HRT^{-(C_1)})^*$

Constante C1		0,56
Constante C2		1,82
Taux d'élimination de DCO	%	79
Concentration de DCO résiduelle	mg l <sup>-1</sup>	333
Concentration résiduelle en NTK	mg l <sup>-1</sup>	72
Concentration résiduelle en P	mg l <sup>-1</sup>	8,2
Concentration résiduelle en MES	mg l <sup>-1</sup>	45
TRH total	j	2,03
Production de biogaz (77% de méthane)	m <sup>3</sup> j <sup>-1</sup>	36

\* Ce et Ci concentration de DCO de l'effluent et de l'influent respectivement;  
 C1 et C2 constantes ; TRH : temps de rétention hydraulique (h).

#### 1.3. Lits de séchage des boues

<b>Production spécifique</b>	<b>kg MES kg<sup>-1</sup> DCO</b>	<b>0,22</b>
Production quotidienne	Kg MES/j	106
<b>Productivité des lits de séchage</b>	<b>kg MES m<sup>-2</sup> j<sup>-1</sup></b>	<b>1,5</b>
Surface des lits	m <sup>2</sup>	70
Coefficient de sécurité	20%	1,2
Surface totale	m <sup>2</sup>	84,5
<b>Charge appliquée</b>	<b>kg MES m<sup>-2</sup></b>	<b>10</b>
Durée d'un cycle de séchage	j	7
Surface par lit (retenir 7 lits de séchage)	m <sup>2</sup>	12

Evacuer les boues du décanteur tous les jour et les étaler sur un des 7 lits

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Exemple de dimensionnement (suite)

#### 1.3. Lits de séchage des boues (suite)

Nombre de lits	U	7
Épaisseur de boues dans un lit par évacuation	m	0,08
Surface par lit	m <sup>2</sup>	12
Profondeur par lit	m	0,7
Largeur par lit	m	2
Longueur par lit	m	6
Basin de stockage des boues sèches (2m x 6m)	m <sup>2</sup>	12
Surface totale des lits de séchage	m <sup>2</sup>	97
Profondeur de construction	m	1,0
Épaisseur couche de gravier grossier	m	0,3
Épaisseur de couche de sable grossier	m	0,4

#### 1.4. Filtre à gravier

<b>Charge Hydraulique*</b>	<b>m j<sup>-1</sup></b>	<b>0,95</b>
Surface requise	m <sup>2</sup>	315
Largeur	m	12,5
Longueur	m	25,1
Profondeur (0,8 m) dimens. gravier 10 mm*5 mm	m	0,8
Volume vide	m <sup>3</sup>	101
TRH	j	0,34
Concentration en MES appliquée	mg l <sup>-1</sup>	45
Taux d'élimination des MES	%	80
Concentration résiduelle en MES	mg l <sup>-1</sup>	<b>9</b>
Concentration résiduelle en DCOt	mg l <sup>-1</sup>	<b>33</b>
Concentration résiduelle en œufs d'helminthes	oeuf/l	<b>Zero</b>

\* Expérience de l'IAV, Rabat

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---

### Exemple de dimensionnement (suite)

#### POST-TRAITMENT

#### 2. Chenal Algal à Haut Rendement (élimination de l'azote & du phosphore)

Constante 1er ordre, k élimination de DCOt @ 20°C.***	$j^{-1}$	<b>-0,245</b>
Constante 1er ordre, k élimination de NTK @20°C	$j^{-1}$	<b>0,653</b>
Constante 1er ordre, k élimination de Pt @20°C	$j^{-1}$	<b>0,249</b>
TRH	j	3
Profondeur	m	0,40
Surface	m <sup>2</sup>	2 250
Volume d'eau	m <sup>3</sup>	900
Largeur	m	27
Longueur	m	82
Nombre de pistes (nombre pair 2 , 4 , 6 or 8)	Unité	4
Concentration résiduelle en DCOt ****	mg l <sup>-1</sup>	61
Concentration résiduelle en DCO soluble	mg l <sup>-1</sup>	25
Concentration résiduelle en N soluble	mg l <sup>-1</sup>	14
Concentration résiduelle en P soluble	mg l <sup>-1</sup>	4

\*\*\*\* Valeur négative (voir document)

\*\*\*\* Augmentation due à la croissance algale.

**Exemple de dimensionnement (suite)**

**3. Bassin de maturation (BM) (modèle mélange complet selon Marais)**

DCO appliquée	kg/j	7
<b>Charge surfacique</b>	<b>kg DCO/ha*j</b>	<b>100</b>
Surface requise	m <sup>2</sup>	737
<b>Profondeur d'eau</b>	<b>m</b>	<b>1</b>
Volume eau	m <sup>3</sup>	590
TRH	j	2
Largeur	m	19
Longueur	m	38
Concentration résiduelle en DCOt ****	mg l <sup>-1</sup>	55
Concentration résiduelle en DCO soluble	mg l <sup>-1</sup>	22
Concentration résiduelle en N soluble	mg l <sup>-1</sup>	13
Concentration résiduelle en P soluble	mg l <sup>-1</sup>	4
Concentration résiduelle en P soluble	U/100 ml	18 286

\*\*\*\* Augmentation due à la croissance algale.

**4. Surface totale requise (plan d'eau)**

TRH total	j	7,3
Surface requise	m <sup>2</sup>	3 439
Voies de circulation et dépendances (20%)	m <sup>2</sup>	688
Surface totale requise	m <sup>2</sup>	4 126

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Exemple de dimensionnement (suite)

Elimination des coliformes fécaux  
Application de l'équation de Marais

$$N_i/N_0 = 1/(1+k_T \cdot t_{TSUAR})(1+k_T \cdot t_{FG})(1+k_T \cdot t_{CAHR})(1+k_T \cdot t_{BM})$$

$K_T$  : constante de 1er ordre de mortalité ;  $t$  : TRH ;  $N_i$  et  $N_0$  : concentration des coliformes fécaux entrée et sortie respectivement.

Concentration des coliformes fécaux influent, $N_i$	UFC/100 ml	10 000 000
TRH dans le TSUAR	j	2,0
TRH dans le filtre à gravier (FG)	j	0,3
TRH dans le CAHR	j	3,0
TRH dans le BM	j	2,0
		7,3
<b>Constante de 1er ordre de mortalité, <math>K_T</math> TSUAR*</b>	$j^{-1}$	<b>0,75</b>
<b>constante de 1er ordre de mortalité, <math>K_T</math> FG*</b>	$j^{-1}$	<b>0,37</b>
<b>constante de 1er ordre de mortalité, <math>K_T</math> CAHR*</b>	$j^{-1}$	<b>3,70</b>
<b>constante de 1er ordre de mortalité, <math>K_T</math> BM*</b>	$j^{-1}$	<b>7,60</b>
Concentration des coliformes fécaux effluent, $N_0$	CF/100 ml	18 286

\*Détermines à l'IAV, Rabat.

#### Détails des calculs

$1+0,75 \cdot 2$		2,5
$1+0,3 \cdot 0,37$		1,1
$1+2,98 \cdot 0,3$		12,1
$1+0,19 \cdot 5,3$		15,9
$N_0 = N_i / [(1+0,75 \cdot 2) \cdot (1+0,3 \cdot 0,37) \cdot (1+3,7 \cdot 3) \cdot (1+7,6 \cdot 2)]$		18 286
Catégorie de l'effluent base sur les directives de l'OMS de 1989		B

Catégorie A = 0 œuf d'helminthes et CF <1000 CF/100ml

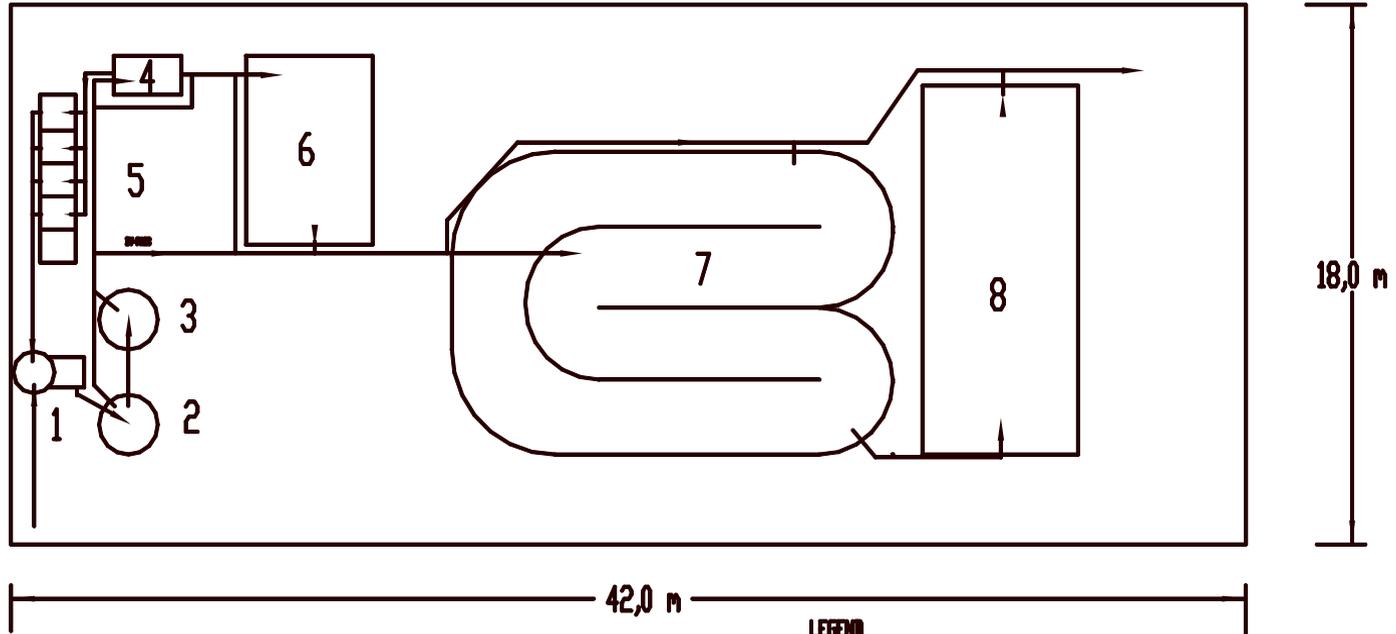
Catégorie B = 0 œuf d'helminthes et CF >1000 CF/100ml

**Paramètres en gras : prédéterminés**

**Annexe 1.2.**

**Exemple de plans d'exécution pour une station  
de 500 habitants.**

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



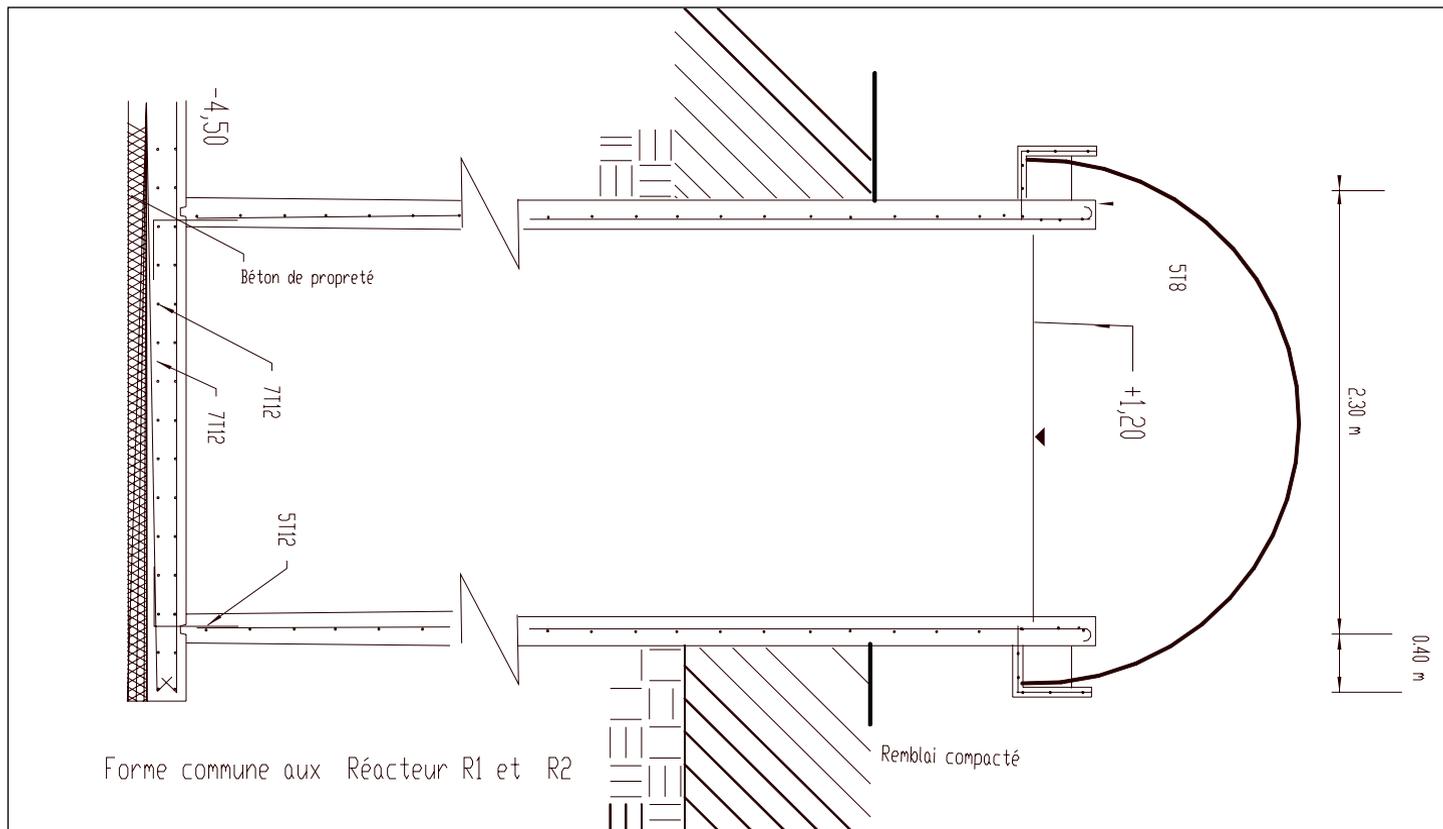
### Plan de masse

Station d'épuration d'Ait Faska (500 équivalent-habitants)

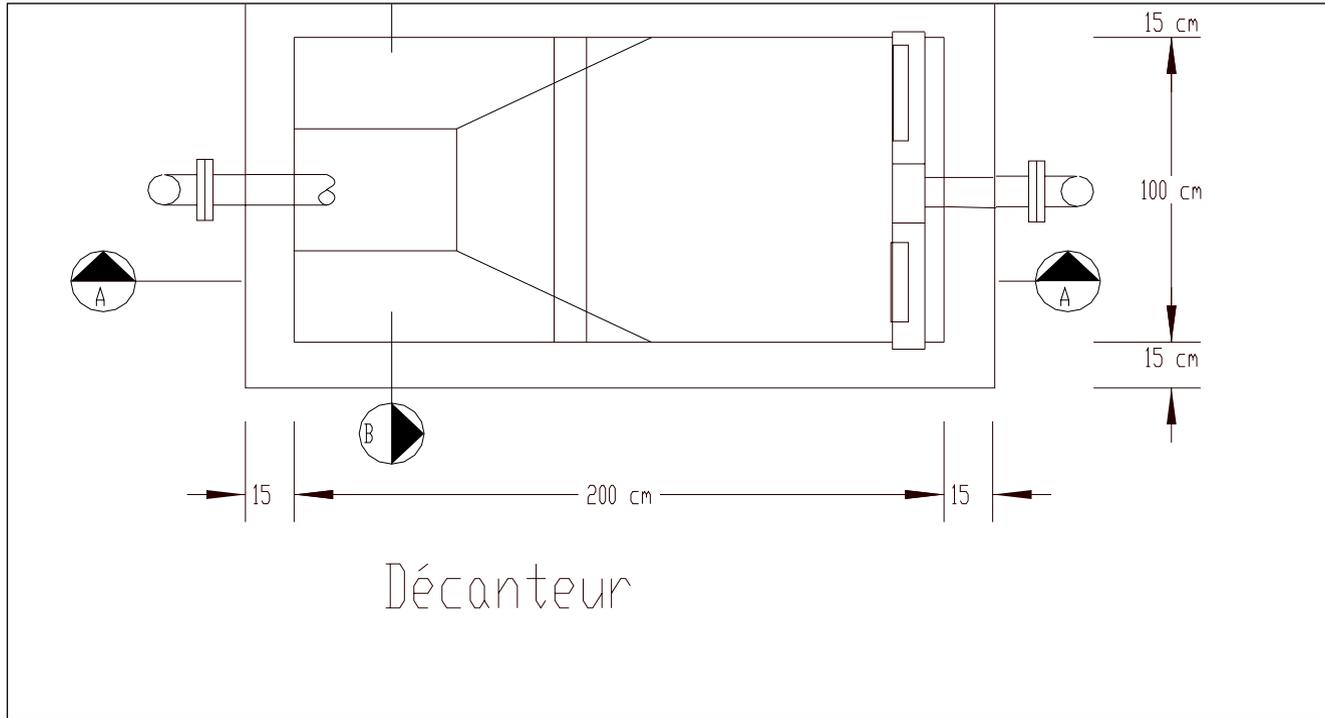
#### LEGEND

- |                      |                              |
|----------------------|------------------------------|
| 1. Puits de relevage | 5. Lits de séchage des boues |
| 2. Réacteur R1       | 6. Filtre à gravier          |
| 3. Réacteur R2       | 7. Chenal à haut Rendement   |
| 4. Décanteur         | 8. Bassin de maturation      |

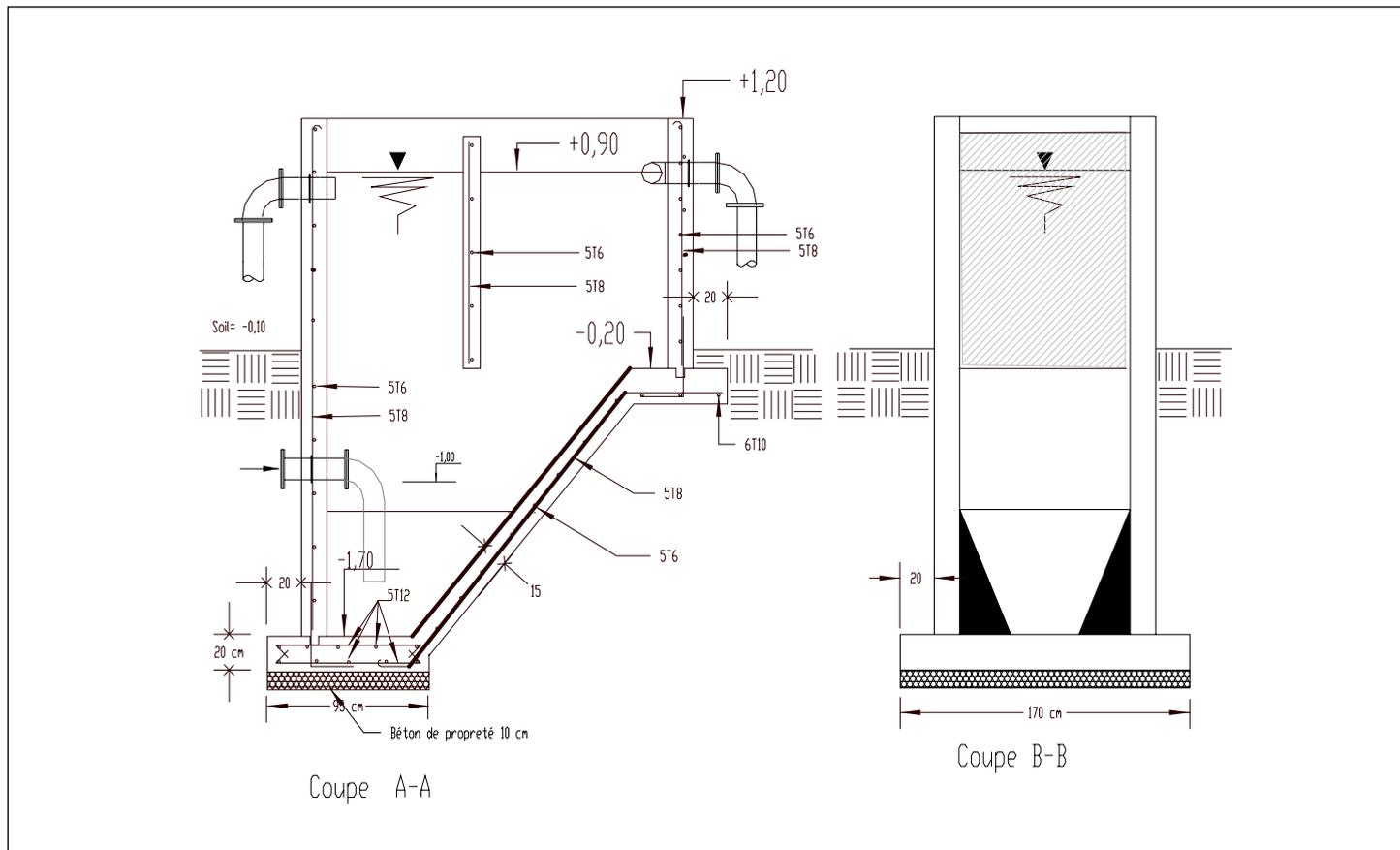
## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



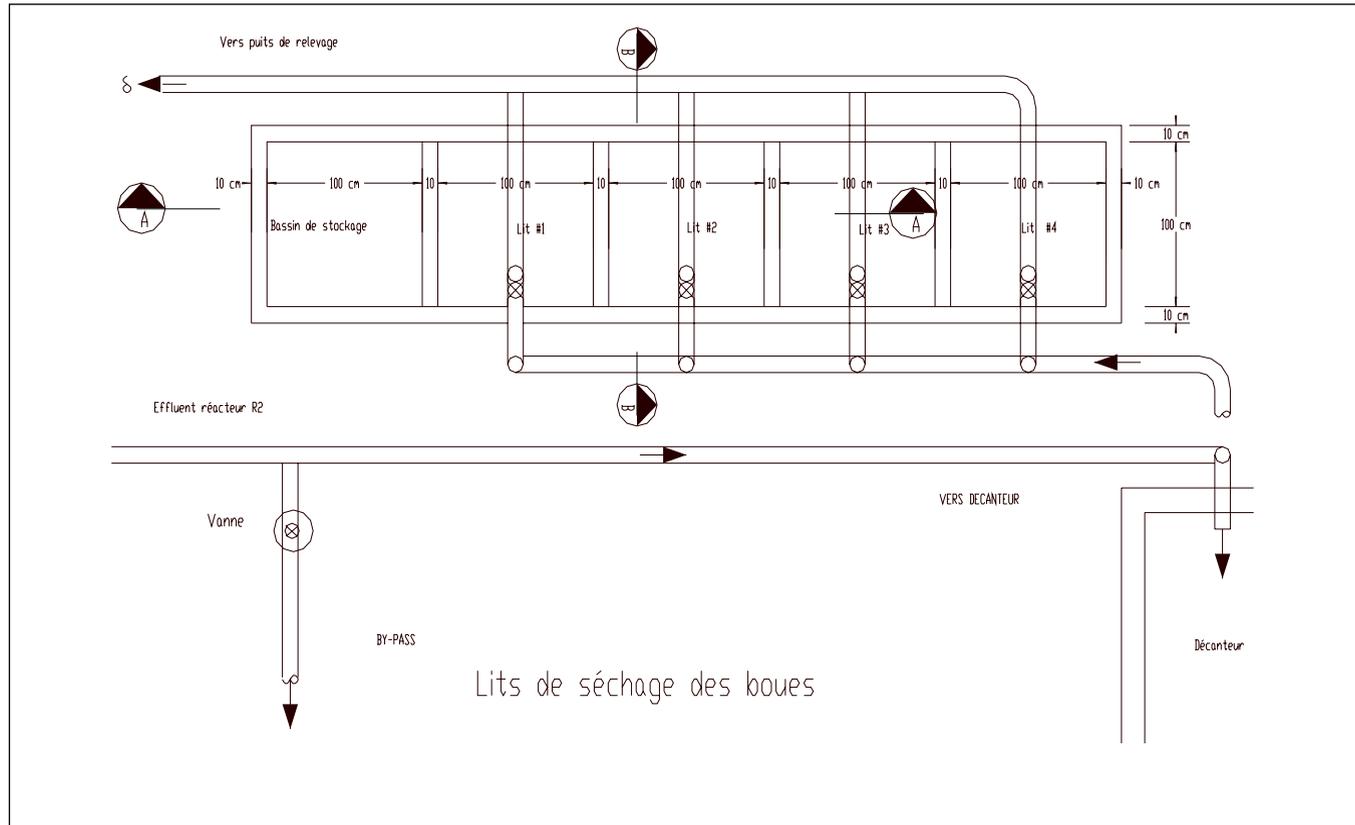
## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



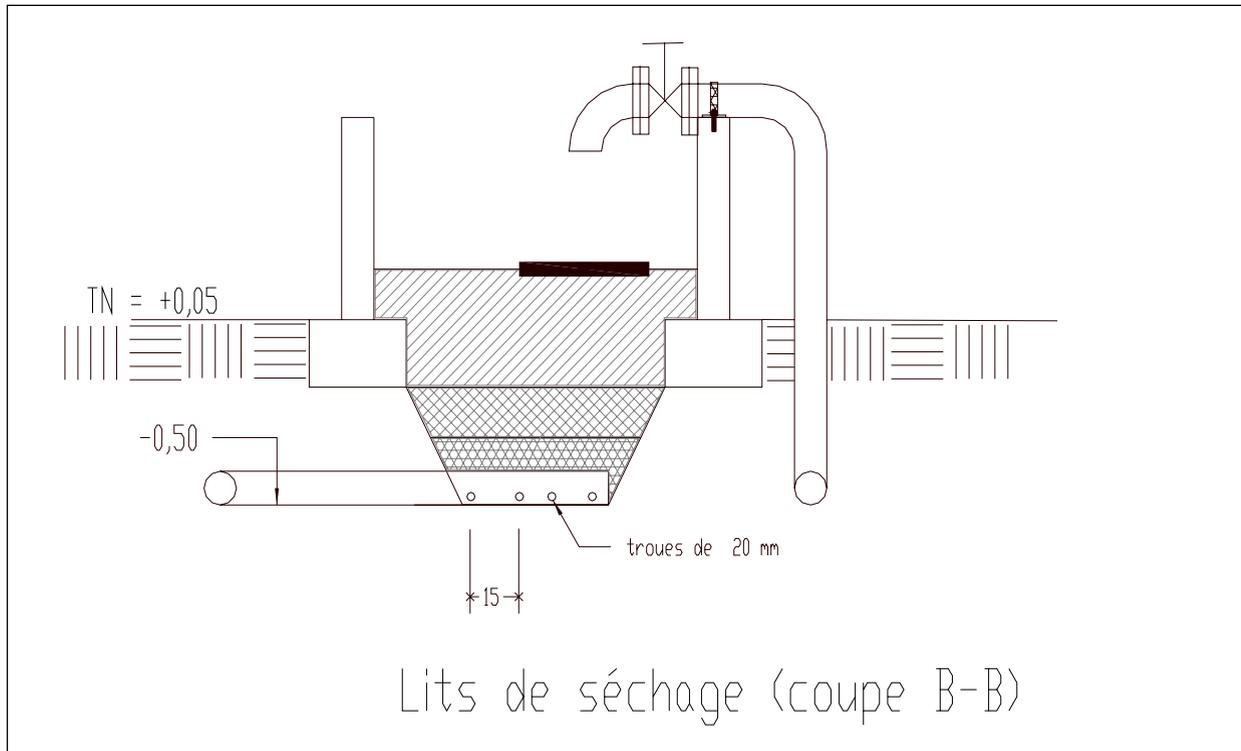
## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



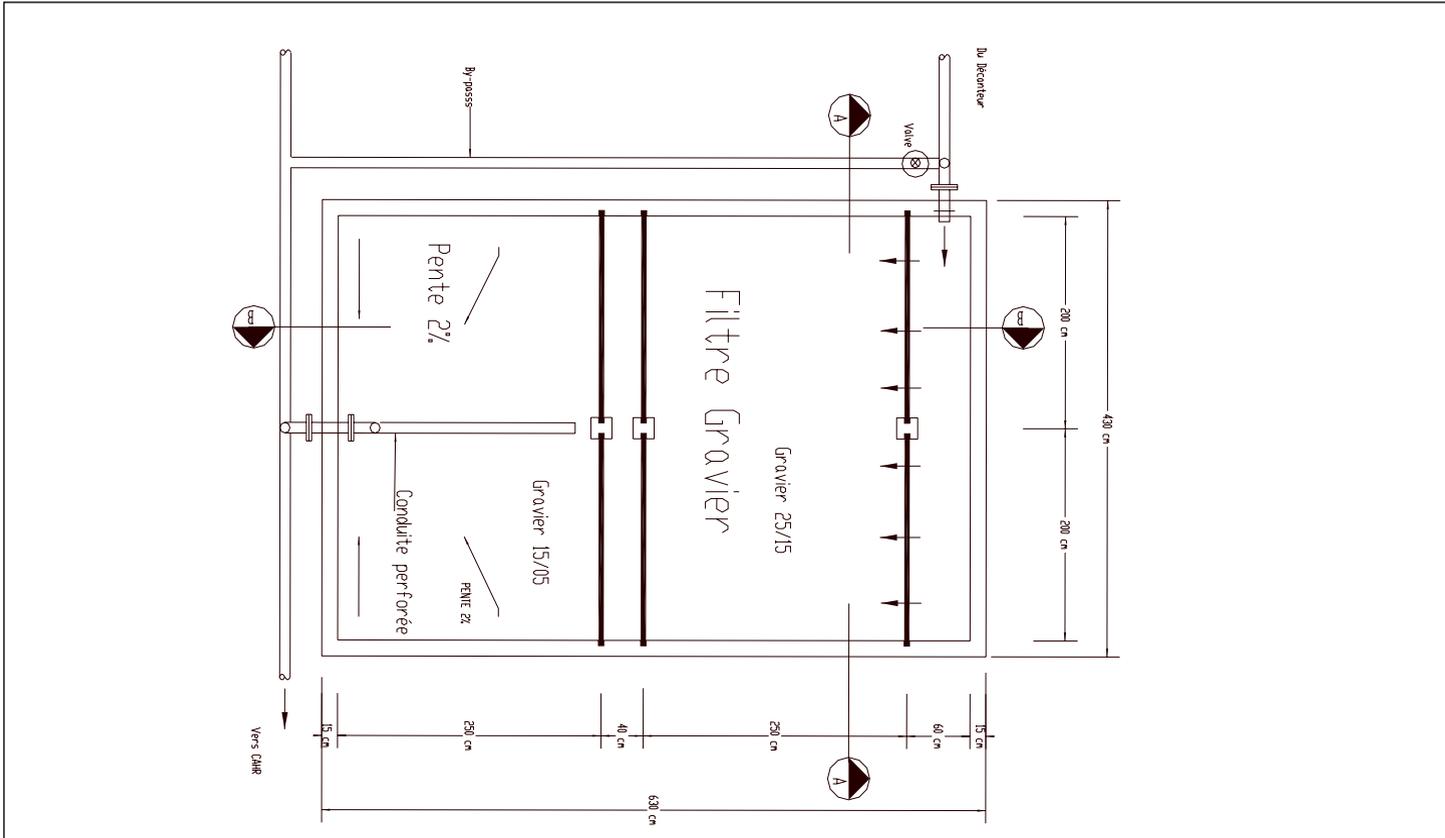
## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



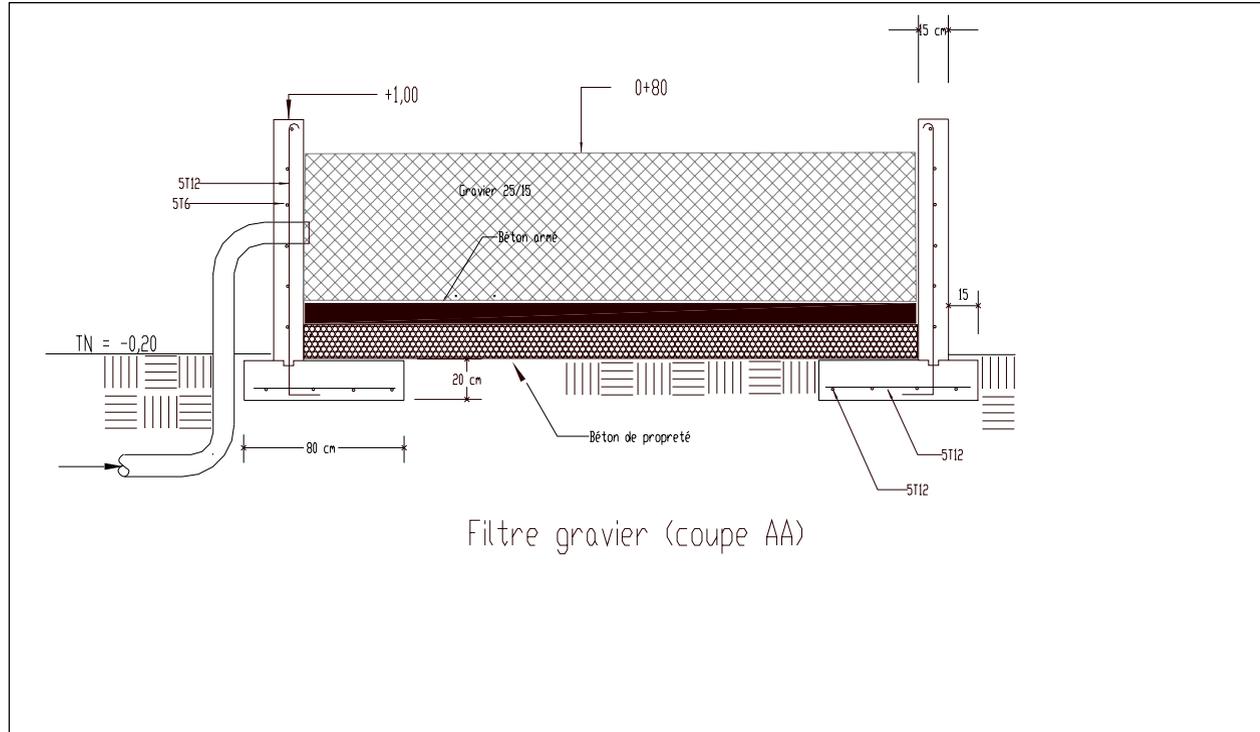
## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



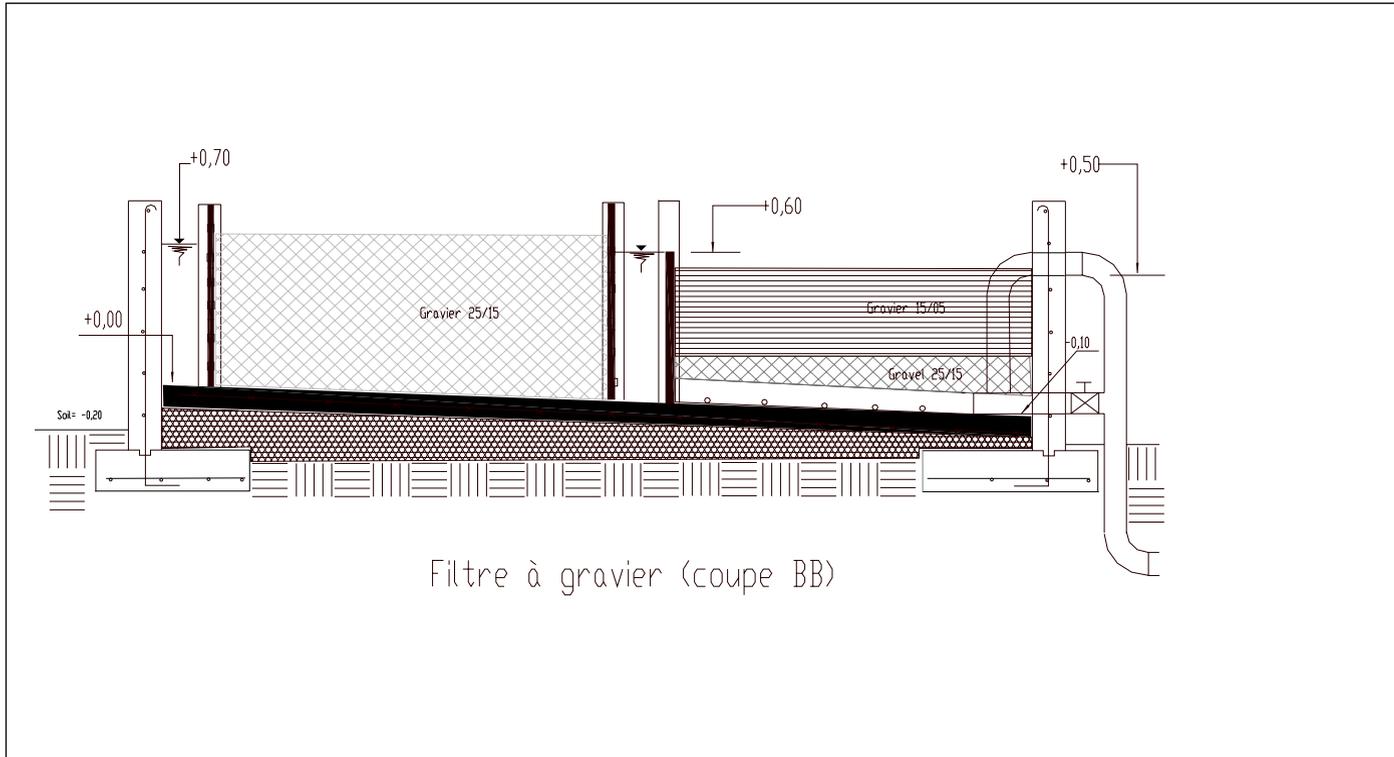
# RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



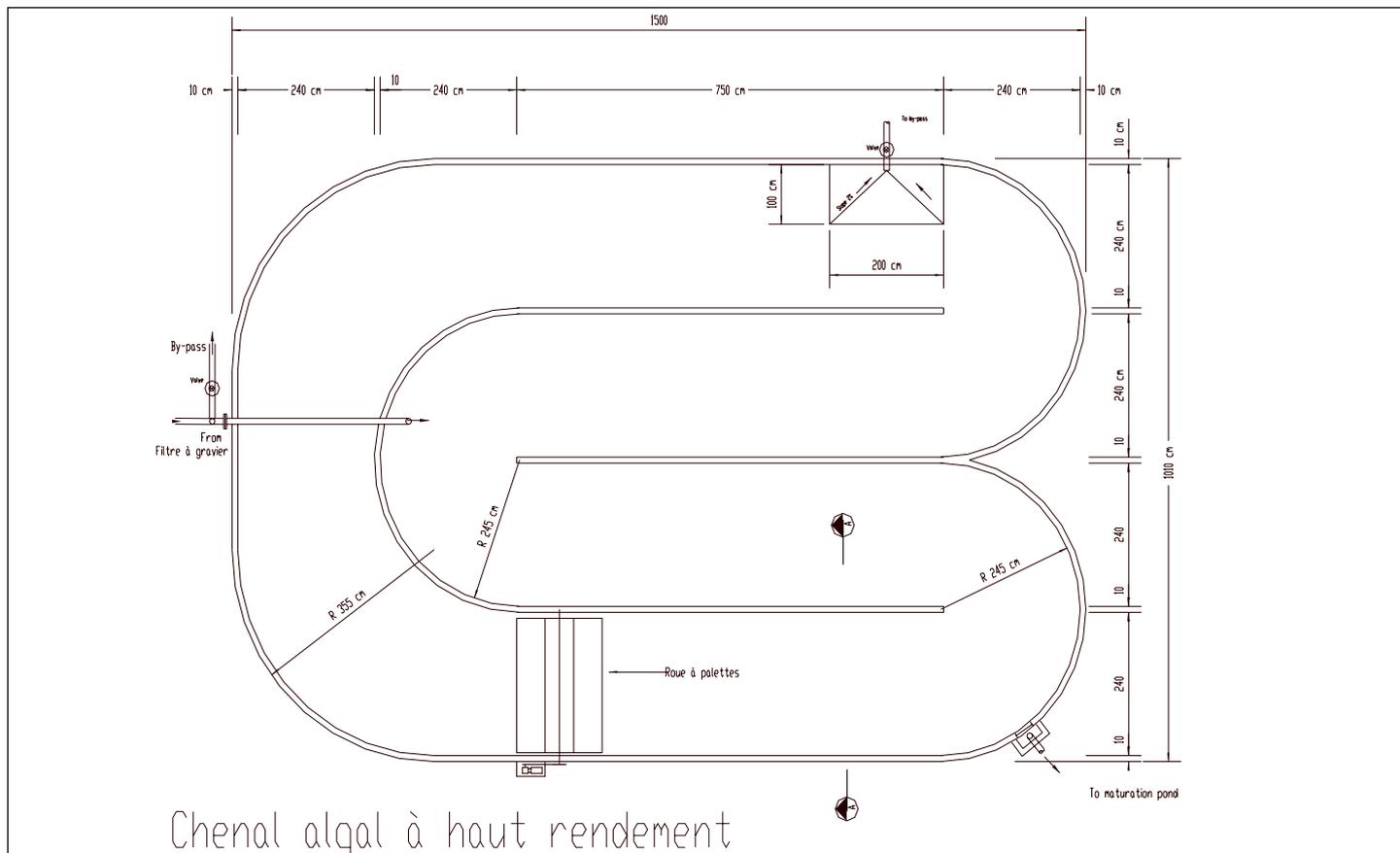
## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



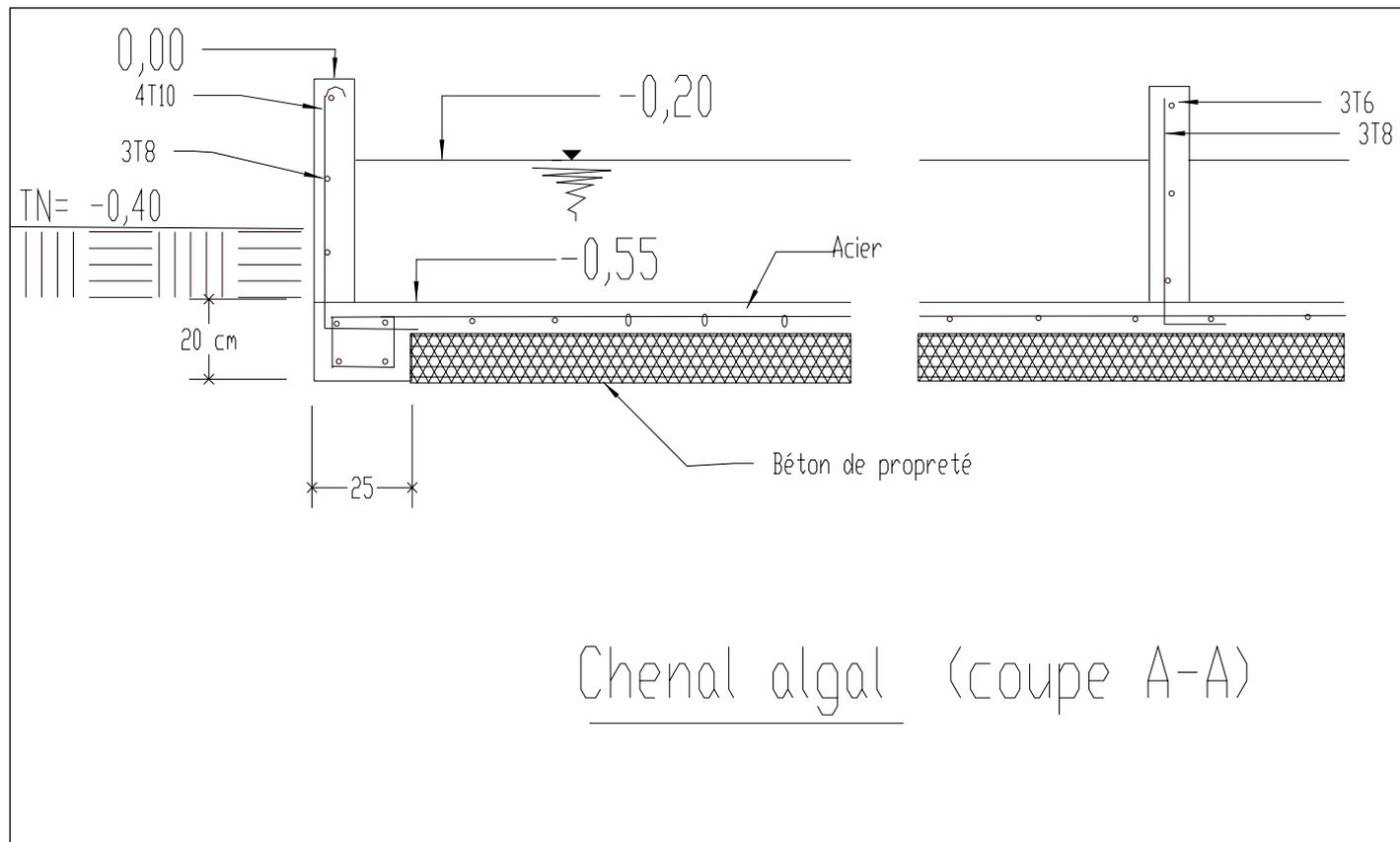
## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



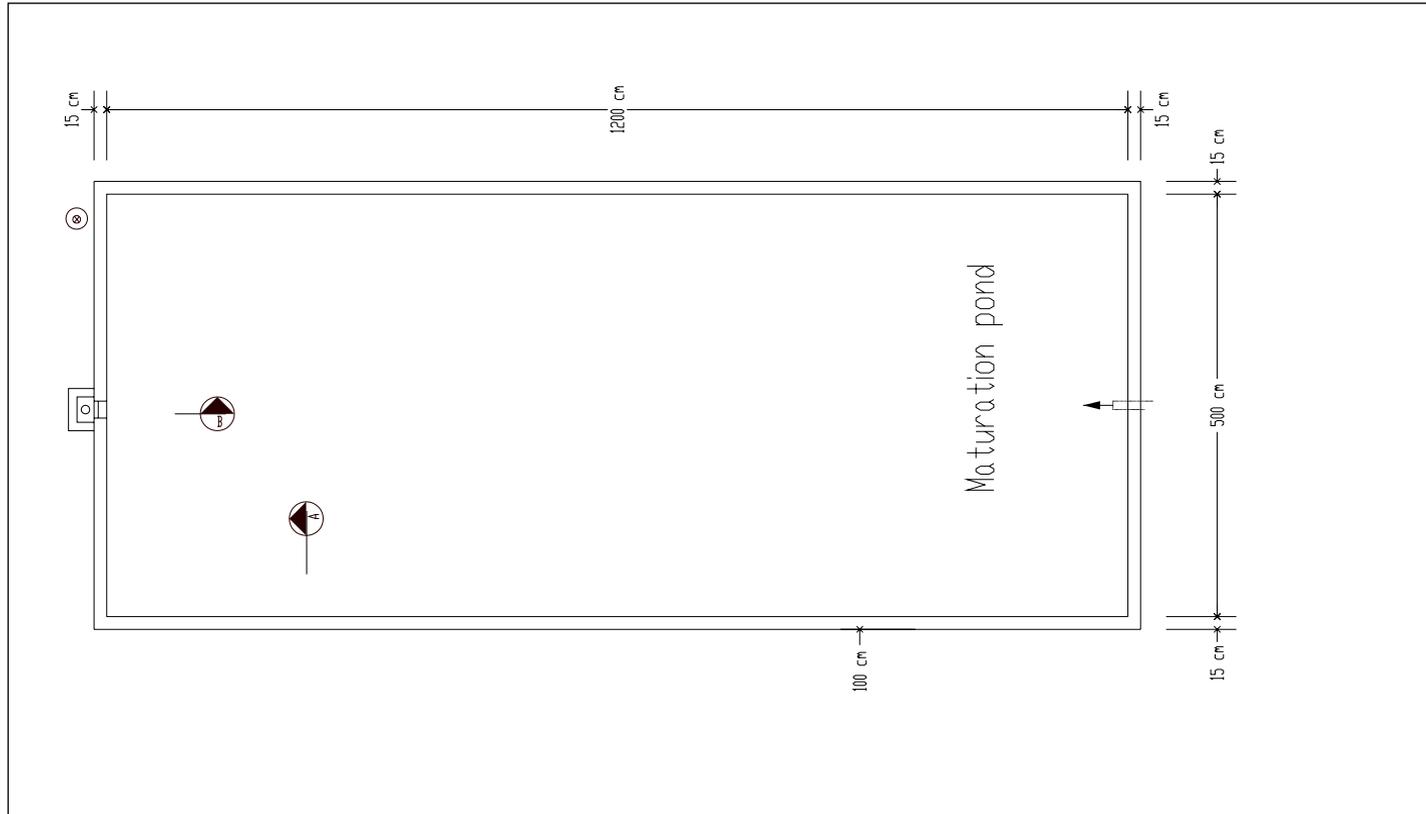
## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT







## **ANNEXE 2**

### **Procédures d'exploitation et de maintenance**

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---

### Journal d'exploitation de la station

A remplir par le technicien en charge de la station

Date	Nom	Fonction	Signature
Technicien			
Superviseur			

#### Observations du site

Aspects généraux	Odeurs	Oiseaux et autres	Ouvrages	Chemins	Clôture	Observations

Température	Température minimale		Température maximale		Direction du vent	Observations
Nuageux, ensoleillé, pluvieux						

#### Station de pompage

	Panneau de control	Interrupteurs électriques	Pompes	Autres	Observations

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---

### Journal d'exploitation de la station (suite)

#### Conduite

	Fuites	Bris de conduites	Bouchage	Autres	Observations

#### Réacteur anaérobie à flux ascendant et deux étapes (TSUAR)

Réacteur 1	Couvercle	Conduites & valves	Débordement	Couleur et turbidité de l'effluent	Épaisseur du lit de boues	Observations
Réacteur 2	Couvercle	Conduites & valves	Débordement	Couleur et turbidité de l'effluent	Épaisseur du lit de boues	Observations
Décanteur	Couvercle	Conduite & valves	Débordement	Couleur et turbidité de l'effluent	Épaisseur du lit de boues	Observations
Filtre à gravier	Aspect général	Conduites & valves	Colmatage	Couleur et turbidité de l'effluent	Observations	

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Journal d'exploitation de la station (suite)

Unité de biogaz	Collecteur de gaz	Conduites & valves	Générateur (maintenance)	Gazomètre	test d'inflammabilité	Observations
Boues	Fréquence d'extraction	Quantité enlevée	% de Matières sèches	Emanation d'odeur	Observations	
Lit de séchage des boues	Apparence du lit	Conduites & valves	colmatage	Durée de séchage (jour)	Observations	

### Chenal Algal à Haut Rendement (CAHR)

Apparence du CAHR	Vitesse de l'eau (surface)	Couleur de l'eau	Ciliés et rotifères	Épaisseur du sédiment	Emanation d'odeurs	Observations
Espèces algales dominantes						

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---

### Journal d'exploitation de la station (suite)

roue à Palettes	Aspect général	Moteur	Transmission	Vitesse de rotation	Observations

### Bassin de maturation

Aspect général	Couleur de l'eau	Algues floculées	Ciliés et rotifères	Court-circuit	Émanation d'odeur	Observations
Espèces algales dominantes						

**Recommandations :**

## **ANNEXE 3**

### **Coût de construction prévisible**

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Estimation des travaux et des équipements nécessaires pour la construction d'une station de traitement de 500 personnes.

	Unités	Quantité
Déblai	m <sup>3</sup>	500
Béton	m <sup>3</sup>	24
Ciment	m <sup>3</sup>	80
Enduit	m <sup>2</sup>	390
Acier	kg	2750
Gravier pour le filtre	m <sup>3</sup>	24
Conduites en PVC		
40 mm	m	10
50 mm	m	5
75 mm	m	20
110 mm	m	120
Vannes		
40 mm	Unit	6
75 mm	U	4
110 mm	U	7
Coudes 90°		
40 mm	U	4
50 mm	U	2
75 mm	U	10
110 mm	U	25
Coudes 120		
75 mm	U	2
110 mm	U	2
Té		
40 mm	U	4
50 mm	U	1
75 mm	U	2
110 mm	U	8
Embouts		
50 mm	U	2
75 mm	U	2
Réductions		
75/63 mm	U	1
63/50 mm		1
110/75 mm		6

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Estimation des travaux et des équipements nécessaires pour la construction d'une station de traitement de 500 personnes (suite)

	Unité	Quantité
Raccord union		
75 mm	U	1
Clapet anti-retour 75 mm	U	1
Pompe submersible *	U	2
Grille**	U	1
Couvercle du réacteur en Polyester	U	1
Canal Parshall (mesure du débit)	U	1
Roue à palettes	U	1
Moteur électrique et boîte de réduction de vitesse	U	1

\* 380/400 V; 1,5 kW HMT :12 m

\*\* La grille et la roue à palettes peuvent être construits localement

Coût de la roue de l'IAV 300 US \$.

Le moteur et le boîtier de réduction de vitesse a été adapté par un atelier local.

Le coût peut varié de 400 à 600 US \$

## **ANNEXE 4**

### **Procédure pour remédier aux dysfonctionnements**

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Procédure pour remédier aux dysfonctionnements

Étapes	Paramètres à vérifier	Action à entreprendre	Résultat	Etape suivante
<b>1. Unité de dégrillage</b>				
1.1	Elimination des objets volumineux		Oui	Aller à 2
			Non	Aller à 1.2
1.2		√ Augmenter la fréquence de nettoyage	Oui	Aller à 2
		√ Contrôler le travail du préposé au nettoyage		
<b>2. Dessablage</b>				<b>Aller à 2.1</b>
2.1	Concentration des matières décantables		Oui	Aller à 3
			Non	Aller à 2.2
2.2		√ Augmenter la fréquence de nettoyage du chenal de dessablage	Oui	Aller à 3
		√ Vérifier la vitesse de l'eau dans le chenal (Parshall)		
		√ Contrôler le travail du préposé au nettoyage		
<b>3. TSUAR</b>				<b>Aller à 3.1</b>
<b>3.1 Réacteur R1</b>				<b>Aller à 3.1.1</b>
3.1.1	Le débit et le niveau de l'eau dans le réacteur sont normaux		Oui	Aller à 3.2
			Non	Aller à 3.1.2
3.1.2		√ Vérifier l'entrée et la sortie et les vannes	Oui	Aller à 3.2
		√ Vérifier les conduites de connexion R1/R2	Non	Aller à 3.1.3
3.1.3		By-passer R1 et utiliser momentanément R2 seul Intervenir pour résoudre le problème	Oui	Aller à 3.2

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Procédure pour remédier aux dysfonctionnements (suite)

Étapes	Paramètres à vérifier	Action à entreprendre	Résultat	Étape suivante
<b>3.2 Réacteur R2</b>				<b>Aller à 3.2.1</b>
3.2.1	Débit et niveau d'eau dans le réacteur		Oui	Aller à 3.2.4
			Non	Aller à 3.2.2
3.2.2		✓ Vérifier conduites entrée/sortie et vannes ✓ Vérifier les conduites de connexion R1/R2	Oui	Aller à 3.2.4
			Non	Aller à 3.2.3
3.2.3		By-passer R2 et utiliser momentanément R1 seul Faire les interventions nécessaires pour résoudre le problème	Oui	Aller à 3.2.4
3.2.4	Taux d'abattement de la DBO <sub>5</sub> ou de la CODs		70 à 80%	Aller à 3.3
			TE* < 60%	Aller à 3.2.5
3.2.5		Vérifier : ✓ Débit entrant et TRH ✓ pH de l'effluent ✓ Production de biogaz et odeur ✓ Vitesse d'ascension < 0.7 mh <sup>-1</sup> ✓ COD de l'influent ✓ Concentration des boues dans le réacteur ✓ La présence de substances toxiques dans l'influent	Oui	Aller à 3.2.6
			Non	Aller à 3.1.1
3.2.6	Mauvaises odeurs		Non	Aller à 3.3
			Oui	Aller à 3.2.7

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Procédure pour remédier aux dysfonctionnements (suite)

Étapes	Paramètres à vérifier	Action à entreprendre	Résultat	Étape suivante
3.2.7		Vérifier ✓ Couvert des réacteurs ✓ Niveau d'eau du chenal et autour du réacteur ✓ Circuit d'enlèvement du biogaz	Oui	Aller à 3.3
<b>3.3 Décanteur (D)</b>				<b>Aller à 3.3.1</b>
3.3.1	Débit et niveau d'eau dans le réacteur		Oui	Aller à 3.3.3
3.3.2		Vérifier ✓ Conduites d'entrée /sortie et vannes ✓ Conduite connexion entre D et filtre à gravier (GF)	Oui	Aller à 3.3.3
3.3.3	Taux d'enlèvement SST		> 70%	Aller à 3.4
3.3.4		Vérifier ✓ Régularité et l'enlèvement des boues du D ✓ Lits de séchage reçoivent régulièrement des boues nouvelles ✓ Taux de débordement (<1,5 mh <sup>-1</sup> ). ✓ Distribution de l'influent à l'intérieur du D ✓ Augmenter la fréquence de l'enlèvement de boues	Oui	Aller à 3.4
<b>3.4 Lits de séchage de boues (LSB)</b>				<b>Aller à 3.4.1</b>
3.4.1	Alimentation des lits		Oui	Aller à 3.4.3
			Non	Aller à 3.4.2
3.4.2.		Vérifier ✓ Conduite connexion avec D ✓ Présence d'aire (point haut) ✓ accumulation des boues dans D	Oui	Aller au 3.4.3.
			Non	Aller à 3.3.

\* Taux d'enlèvement ; calculé comme suit : (CODt influent –CODst effluent)/COD t influent ; CODt COD total ; CODst COD décantée

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Procédure pour remédier aux dysfonctionnements (suite)

Étapes	Paramètres à vérifier	Action à entreprendre	Résultat	Prochaine étape
3.4.3	Infiltration de l'eau à travers le lit	Vérifier l' ✓ Enlèvement de boues séchées ✓ Couche superficielle de sable régulièrement scarifiée ✓ Conduite de drainage vers le regard de réception	Oui	Aller à 3.4.5
			Non	Aller à 3.4.4
3.4.4.		✓ Remplacer le sable et éventuellement le gravier du lit ✓ Remplacer la conduite de drainage	Oui	Aller à 3.4.5.
3.4.5	Production de boues faible	Vérifier ✓ Réacteurs en période d'accumulation ✓ Vitesse d'ascension	Oui	Aller à 3.5
			Non	Aller à 3.
3.4.6	Fermentation des boues et émanation d'odeurs		Oui	Aller à 3.
			Non	Aller à 3.5.
<b>3.5 Filtre à gravier (FG)</b>				<b>Aller à 3.5.1</b>
3.5.1	Débit et niveau d'eau		Oui	Aller à 3.5.2
			Non	Aller à 3.4.
3.5.2	Surfaçage de l'influent		Oui	Aller à 3.5.3
			Non	Aller à 3.5.5
3.5.3		Vérifier ✓ Perforations et conduites entrée/ drainage et vannes ✓ Si l'effluent du D contient fortes concentrations MES ✓ Conductivité du lit ✓ Efficacité du D	Oui	Aller à 4.
			Non	Aller à 3.5.4.
3.5.4.		✓ Remplacer le gravier du lit ✓ Déboucher ou changer la conduite de drainage	Oui	Aller à 4.

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Procédure pour remédier aux dysfonctionnements (suite)

Étapes	Paramètres à vérifier	Action à entreprendre	Résultat	Prochaine étape
<b>4. Haut Rendement du Pond Algal (HRPA)</b>				<b>Aller à 4.1</b>
4.1	Débit et niveau d'eau		Oui	Aller à 4.3
			Non	Aller à 4.2
4.2		Vérifier √ Existence d'infiltrations √ Conduites entrée/regard sortie et sortie	Oui	Aller à 4.3
			Non	Aller à 4.3
4.3		By-passer et procédé aux actions de maintenance urgentes	Oui	Aller à 4.4
4.4	Vitesse de l'eau à la surface		0,5 à 0,2 m/s	Aller à 4.6
			> 0,2 ou < 1,8	Aller à 4.5
4.5		Vérifier √ Vitesse de rotation de la roue à palettes √ Puissance du système de transmission √ Maintenance des composantes mécaniques	Oui	Aller à 4.7
			Non	Aller à 4.6
4.6		Remplacer les parties défectueuses	Oui	Aller à 4.7
4.7	Type d'algues : Cellules vertes immobiles du genre <i>Scenedesmus</i> , <i>Micractinium</i> , <i>Chlorella</i> , <i>Actinastrum</i> , or <i>Pediastrum</i>			Aller à 4.9
4.8	Cellules Mobiles du genre <i>Euglena</i> ou <i>Chlamydomonas</i>			Aller à 3.
4.9	Concentration d'algues < 3 millions cellules/ml		Oui	Aller à 4.11
			Non	Aller à 4.10

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

4.10	< 0.6 ou > 5 millions/ml			Aller à 3.
------	--------------------------	--	--	------------

### Procédure pour remédier aux dysfonctionnements (suite)

Étapes	Paramètres à vérifier	Action à entreprendre	Résultat	Prochaine étape
4.11	Chlorophylle de 1 à 2 mg/l; à 14 heures : pH>8, Oxygène dissout > 15		Oui Non	Aller à 4.12 Aller à 3.
4.12	Taux d'enlèvement de la DCOs ou de la DBO <sub>5</sub>		Oui, 15 à 20% Non	Aller à 4.13 Aller à 3.
4.13	Taux d'enlèvement de l'ammonium (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) et orthophosphates (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> ) ;		Oui 80% pour N 50% pour P Non	Aller à 4.14 Aller à 3.
4.14	Concentration des Coliformes fécaux		Oui 10 <sup>4</sup> à 10 <sup>5</sup> /100 ml Non >10 <sup>6</sup>	Aller à 4.15 Aller à 3.
4.15	Oeufs d'Helminthes : Zéro oeuf/l		Oui > 1 oeuf/l	Aller à 5 Aller à 3.
<b>5. Bassin de maturation</b>				
5.1	Débit et niveau d'eau		Oui Non	Aller à 5.3 Aller à 5.2

## RÉACTEUR ANAEROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

### Procédure pour remédier aux dysfonctionnements (suite)

Étapes	Paramètres à vérifier	Action à entreprendre	Résultat	Prochaine étape
5.2		Vérifier √ Existence d'infiltrations √ Conduites entrée/regard sortie et sortie	Oui	Aller à 5.4
			Non	Aller à 5.3
5.3		By-passer et procéder aux actions de maintenance urgentes		Aller à 5.4
5.4	Cellules vertes immobiles du genre <i>Scenedesmus, Micractinium, Chlorella, Actinastrum, or Pediastrum</i>		Oui	Aller à 5.6
			Non	Aller à 5.5
5.5	Cellules mobiles du genre <i>Euglena or Chlamydomonas</i> genres		Oui	Aller à 4.
5.6	Concentration d'algues 1 million cellules/ml		Oui	Aller à 5.8
			Non	Aller à 5.7
5.7	<0.3 ou >2.5 millions/ml			Aller à 4.
5.8	Chlorophylle de 0.5 à 0.8 mg/l à 14 heures : pH >8 Oxygène dissout > 15		Oui	Aller à 5.9
			Non	Aller à 4.
5.9	Taux d'enlèvement de la DCOs ou de a DBO <sub>5</sub>		Oui, 10 %	Aller à 5.10
			Non	Aller à 4.
5.10	Taux d'enlèvement de l'ammonium (N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> ) et orthophosphates (P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )		Oui	Aller à 5.11
			Non 10% pour N et 5% pour P	Aller à 4.
5.11	Concentration des coliformes fécaux	10 <sup>3</sup> à 10 <sup>4</sup> /100 ml	Oui	FIN
			Non	Aller à 4.

## **ANNEXE 5**

### **Réutilisation de l'effluent**

Résumé d'une étude de cas  
Réutilisation des effluents pour la floriculture

Ont contribué à ce travail

Pr. Driss Alami

Abderrahim Handoufe

Département d'Horticulture, IAV.

Administration du Génie Rural, Ministère de  
l'Agriculture et du Développement Rural

### **Introduction**

Quand les conditions climatiques le permettent, la valorisation des effluents des stations d'épuration en floriculture est une alternative attractive. La floriculture craint en effet, les fortes chaleurs ainsi que le froid hivernal et nécessite de ce fait une conduite sous serre. Le choix de la floriculture pour la valorisation des eaux épurées permet de résoudre le dilemme que posent les cultures généralement rémunératrices mais qui menacent la santé publique car elles sont souvent consommées à l'état cru. Les fleurs ne sont pas consommables ce qui permet de circonscrire le problème de la réutilisation aux seuls aspects de la protection des travailleurs des champs et celui d'optimiser la valorisation de l'eau usée et des nutriments qu'elle véhicule.

Le cas présenté dans ce document relate la production expérimentale de l'œillet en utilisant l'effluent final de la station d'épuration du campus de l'IAV à Rabat. Le système de distribution de l'eau d'irrigation était de type localisé et aucune apport de fertilisants n'a été effectué en vue de déterminer le potentiel fertilisant des eaux épurées en comparaison avec un témoin (eau souterraine sans addition d,engrais).

L'expérimentation visait aussi l'objectif de déterminer l'impact de la présence de cellules algale dans l'effluent final sur le système d'irrigation retenu et si de telles concentrations représentaient ou non un obstacle pour recourir à ce type de système.

### **La fleur d'œillet**

Des plants enracinés certifiées saines et âgées de 4 semaines ont été acquise et plantées sous serre dans le campus de l'IAV 50 m de la station d'épuration de type RACHAHR. La densité de plantation retenue était de 32 plants/m<sup>2</sup>. Les plants ont été plantés en mai 1999 et les premières fleurs récoltées en septembre de la même année. L'expérimentation a pris fin en juillet 2000.

### **La serre**

Une serre de type tunnel (30 m x 8 m), construite sur des arceaux métalliques galvanisés de 240 m<sup>2</sup> et couverte à l'aide d'un film de polyéthylène avec 4 fenêtres placées le long du tunnel. Pendant l'été qui correspond à la saison chaude et de rayonnement intense, le tunnel a été chaulé pour éviter les température excessives dans la serre.

### **Le système d'irrigation**

L'effluent de la station de l'IAV était pompé vers la serre. L'unité de pompage était équipée d'un filtre à sable muni d'un système de backwash puis d'un filtre de type tamis pour stopper les grains de sables qui peuvent échapper du filtre pour éviter le bouchage des émetteurs. Le système de distribution de l'eau consistait en un "Arab drip" avec des émetteurs de 2 l/h à une pression de 1 bar. La distance entre émetteurs était de 0.25 m.

### **Taux de bouchage des émetteurs**

Le taux de bouchage des émetteurs était de 17% pour l'effluent de la technologie RACHAHR et de 4% pour le témoin eau souterraine. Ce taux est voisin de celui rapporté pour un effluent de BDS à Ouarzazate (El Hamouri *et al*, 1996). L'impact négatif d'un tel taux de bouchage des émetteurs a été minimisé suite à un programme de maintenance précis et bien encadré. Un tel effort semble possible dans la plupart des pays de la région MENA où la main d'œuvre est encore bon marché.

Parmi les autres facteurs qui ont montré un impact sur le taux de bouchage, on peut citer la fréquence des applications de l'eau d'irrigation et la pression maintenue dans le réseau. Les pressions faibles augmentaient le alors que les pressions plus forte produisait l'effet inverse.

### **Diamètre des tiges des fleurs**

Le diamètre de la tige des fleurs revêt une grande importance pour la valeur marchande. Les fleurs doivent tenir une position verticale dans les vases. Les fleurs qui penchent ont une valeur marchande moindre. Le diamètre des fleurs irriguées avec l'effluent de la station était de 11 mm soit le double de celui des fleurs témoins

### **Rendement**

Le rendement était plus important avec l'effluent de la station avec une valeur moyenne de 7 et 5 fleurs/plant/an respectivement pour l'effluent et le témoin. Mais comme signalé plus haut, la qualité des fleurs du témoin était moins bonne et leur commercialisation difficile.

Le rendement obtenu était plus élevé que la moyenne nationale laquelle ne dépasse pas 5.75 fleurs/plant/an, et atteint quasiment le niveau du rendement rapporté à l'échelle internationale soit 8 fleurs/plant/an (Maach, 2001).

### Tenue en vase

La tenue en vase est importante pour la commercialisation des fleurs. Plus cette durée est longue plus la valeur commerciale de la fleur est élevée. Les fleurs produites avec l'effluent de la station ont montré une tenue en vase supérieure à celle du témoin avec une différence entre les deux de 8 jours en moyenne. Les fleurs irriguées avec les eaux épurées pouvaient tenir 20 jours contre 12 pour le témoin.

### Conclusion

Le système d'irrigation localisée peuvent être utilisés pour la valorisation des effluents des stations d'épuration de type RACHAHR à condition d'adopter des mesures de protection des émetteurs. Il s'agit de placer un filtre à sable fin suivi d'un tamis derrière la pompe. Il s'agit également de mettre en place un programme de surveillance des émetteurs lequel reste possible dans les zones où la main d'œuvre reste bon marché.

Le rendement obtenu avec les eaux épurées était satisfaisant étant entendu qu'il est obtenu sans apport d'engrais. De même, la tenue en vase des fleurs produites avec l'effluent de la station était plus longue d'une semaine environ probablement en raison du plus grand diamètre des fleurs irriguées avec les eaux épurées.

Aucun engrais n'a été ajouté à la culture démontrant ainsi que le contenu de l'effluent était suffisant pour supporter les besoins de la culture.

Ceci étant, il faut signaler que sur le plan sanitaire, les mesures adéquates pour protéger les travailleurs en charge de la serre même si le contact avec les eaux usées épurées s'était révélé très réduit.

### Références

El Hamouri B., Handoufe A., Mekrane M., Touzani M., Khana A. Khallayoune K. & Benchokroun T. (1996). Use of wastewater for crop production under arid and saline conditions : yield and hygienic quality of the crop and soil contamination's. *Water Science & Technology* 33(10-11) 327-334.

Maach Yassine (2001). Valorisation des eaux usées épurées en floriculture : cas de l'œillet. Mémoire de fin d'étude. Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, Rabat

## **ANNEXE 6**

### **Album photos**

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



Station d'épuration (campus de l'IAV en arrière plan)

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



**Bassins de maturation et Chenal algal à haut rendement**



**Réacteurs anaérobies**

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



**Lits de séchage des boues**



**Boues séchées de la technologie RACHAHR**

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



**Système de collecte de biogaz et réservoir de stockage**



**Générateur électrique Diesel-biogaz**

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



Structure de sortie de l'effluent



Déversoir chenal algal à haut rendement



**Déversoir bassin de maturation**



**De gauche à droite Influent, TSUAR, CAHR et effluent final**

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



Roue à palettes pour homogénéiser le contenu du chenal algal



Détails de la roue à palettes

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT



Système d'entraînement électrique de la roue à palettes



Système d'entraînement et palier

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



**Serre couverte de chaux pour la protection des fortes radiations en été**



**Unité de production d'oeillets de l'IAV**

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



**Fleurs prêtes pour utilisation**



**Réutilisation pour l'arrosage des espaces verts à l'IAV**

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



Décanteur, lits de séchage et réacteurs (station en cours de construction)



Réacteurs et station de relevage

## RÉACTEUR ANAÉROBIE ET CHENAL À HAUT RENDEMENT

---



**Filtre à gravier horizontal-vertical**



**Conduites de connexion et vannes**