

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
**Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique**
جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -
Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de technologie

Département d'hydraulique



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master en **Hydraulique**

Option : **Hydraulique Urbaine**

Thème

**Introduction des énergies renouvelables dans l'épuration des
eaux résiduaires des petites localités
(2000 Équivalents Habitants)**

Présenter par :

BEKKAL BRIXI Mohammed Kheireddine

Soutenue le : 26/11/2020, devant le jury composé de :

Madame GUASMI Imane	Présidente
Mademoiselle FANDI Wassila	Examinatrice
Monsieur BESSEDIK Madani	Encadreur
Madame ABDELBAKI Cherifa	Co-Encadreur

Promotion : 2019 – 2020

REMERCIEMENTS

Louange à Allah, le miséricordieux, sans lui rien de tout cela n'aurait pu être, je remercie le bon Dieu qui m'a orienté au chemin de savoir et les portes de la science.

Ce document présente les travaux effectués dans le cadre de mon projet de fin d'étude de Master au Département d'Hydraulique de la Faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen.

C'est avec un grand et profond respect que je tiens à adresser mes plus vifs remerciements à mes encadreurs :

Mr BESSEDIK Madani, pour son choix du sujet, ses précieuses orientations, contrôles et suivis, sa patience extrême, son assistance et ses encouragements.

Mme ABDELBAKI Cherifa, qui a accepté de m'encadrer, et qui m'a beaucoup aidé de se mettre sur les rails de la réalisation de ce travail.

Mes vifs remerciements vont aussi aux membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail :

Je tiens à exprimer ma très grande considération, et mon profond respect à **Mme GUESMI Imane** qui m'a fait l'honneur de présider ce jury. Vous trouvez ici mes expressions respectueuses et ma profonde gratitude.

J'adresse mes sincères remerciements également à **Mlle FANDI Wassila** d'avoir eu l'amabilité de bien vouloir examiner ce travail. Je ne peux que sincèrement vous exprimer mon respect et ma profonde gratitude.

Mes derniers remerciements s'adressent, à tout le corps professoral de l'Université de Tlemcen pour la qualité de leur enseignement ainsi que pour leur disponibilité tout au long de ces cinq années de formation, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail.

DEDICACES

A mes chers parents

Aucun dédicace ne serait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Vous avez fait plus que des parents puissent faire pour que ses enfants suivent le bon chemin de la vie et leurs études.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés et le fruit de vos sacrifices.

Puisse Dieu, le très haut, vous accorder santé, bonheur et long vie et faire en sorte que jamais je ne vous déçoive.

A mon cher frère et mes adorables sœurs

Mes fidèles compagnons dans les moments les plus délicats de cette vie mystérieuse, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement et l'amour que je porte pour vous.

Je vous dédié ce travail avec tous mes vœux de bonheur et de réussite.

A mes chers petits neveux et ma nièce

Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur.

Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.

A ma chère grand-mère paternelle

Pour votre douceur, vos prières, puisse Dieu vous prêter long vie et beaucoup de santé.

A la mémoire de mes grands-pères et ma grand-mère maternelle.

A tous les membres de ma famille, petits et grands.

A mes chères amis et collègues.

Kheireddine

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
DEDICACES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	viii
GLOSSAIRE.....	ix
NOMENCLATURE.....	x
RÉSUMÉ.....	xi
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	xiii
CHAPITRE I :	
THÉORIE SUR LES SYSTÈMES D'ÉPURATION DE L'EAU DES PETITES	
LOCALITÉS.....	1
I. Composition des eaux usée domestiques.....	2
I.1. Définition.....	2
I.2. Calcul des charges.....	2
I.2.1. Paramètres à analyser.....	2
I.2.2. Estimation de la charge polluante.....	7
I.2.3. Calcul du débit.....	8
I.2.4. Normes de rejets.....	8
I.2.5. Objectif de qualité.....	9
II. Épuration des eaux usées domestiques.....	10
II.1. Définition.....	10
II.2. Fonction et choix d'une station d'épuration.....	10
II.3. Caractéristiques du site d'épuration.....	11
II.4. Sélection du traitement le mieux adapté.....	11
II.5. Procédés de traitement des eaux usées et leur portée.....	12
III. Systèmes et théories de calcul d'épuration des eaux usée domestiques.....	12
III.1. Prétraitement.....	13
III.1.1. Le dégrillage.....	13
III.1.2. Le dessablage.....	14
III.1.3. Dégraissage-déshuilage.....	15
III.2. Traitement biologique.....	15
III.2.1. La biomasse épuratrice.....	16
III.3. Traitement des boues.....	28
III.3.1. Lits de séchages plantés de roseaux.....	28

CHAPITRE II :

L'ÉNERGIE RENOUVELABLE ET L'ÉPURATION DES EAUX USÉES DES PETITES LOCALITÉS..... 31

I. Les différentes sources de l'énergie	32
I.1. Les énergies fossiles : (non renouvelables)	32
I.1.1. Définition	32
I.1.2. Les sources d'énergie fossile	33
I.1.3. La consommation primaire des énergies fossiles en Algérie	36
I.1.4. Situation mondiale des énergies fossiles.....	36
I.1.5. Conclusion partielle	37
I.2. Les énergies renouvelables : (énergies vertes)	37
I.2.1. Définition	37
I.2.2. Les sources d'énergies renouvelables	37
I.2.3. Les différents types d'énergie renouvelable	39
I.3. Comparaison des énergies fossiles et renouvelables à l'échelle humaine	48
I.3.1. La localisation et de la variabilité dans le temps et l'espace	48
I.3.2. Comparaison au niveau politique et économique	48
I.3.3. Comparaison de l'impact environnemental	49
I.4. Autres comparaison des énergies.....	50
I.4.1. Quantité des combustibles nécessaires pour produire 1000MW pendant 1an.....	50
II. L'électrification des zones rurales par l'énergie solaire photovoltaïque.....	51
II.1. L'énergie solaire photovoltaïque.....	51
II.1.1. Les cellules photovoltaïques.....	51
II.1.2. Les modules photovoltaïques	54
II.1.3. Le champ des modules photovoltaïques	55
II.1.4. Le système de stockage	55
II.1.5. Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....	57
III. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque	58
III.1. La consommation énergétique	58
III.2. Dimensionnement d'un générateur photovoltaïque	59
III.2.1. La puissance crête du générateur photovoltaïque.....	59
III.2.2. La tension de fonctionnement du champ photovoltaïque.....	59
III.2.3. Le nombre des panneaux photovoltaïques	60
III.2.4. Dimensionnement d'un système de stockage.....	60

CHAPITRE III :

ADAPTATION DU TYPE D'ÉNERGIE RENOUVELABLE À LA CHAÎNE D'ÉPURATION ÉTUDIÉE.....	62
I. Evaluation des données de bases de dimensionnement	63
I.1. Estimation de la charge hydraulique.....	63
I.1.1. Débit moyen journalier	63
I.1.2. Débit moyen horaire.....	64
I.1.3. Débit de pointe	64
I.1.4. Débit diurne	64
I.2. Estimation de la charge polluante.....	65
I.2.1. Charges polluantes journalières et leur concentration	65
I.3. Résumé des charges hydrauliques et charges polluantes arrivant à la STEP	66
I.4. Normes de rejets	67
I.5. Rendement épuratoire.....	67
II. Dimensionnement des ouvrages de la station d'épuration	67
II.1. Le poste de relevage	67
II.2. Ouvrage de prétraitement	68
II.2.1. Le dégrillage	68
II.2.2. Le dessablage-déshuilage	71
II.3. Traitement biologique	73
II.3.1. Variante 1 : Lit bactérien	73
II.3.2. Variante 2 : Lagunage naturel.....	80
II.4. Traitement de boues	84
II.4.1. Evaluation des volumes de boues	84
II.4.2. La filière de traitement des boues	85
III. Conception et dimensionnement de l'installation photovoltaïque.....	87
III.1. Estimation des besoins journaliers d'utilisation d'électricité	88
III.1.1. Présentation des procédés.....	88
III.1.2. Bilan de la consommation énergétique des procédés	88
III.1.3. Comparaison et choix du procédé	89
III.2. Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV	90
III.3. Estimation du champ photovoltaïque.....	90
III.4. Estimation de la capacité de stockage de la batterie et le choix de la technologie ..	91
III.5. Dimensionnement du régulateur et de l'onduleur.....	92
III.5.1. Dimensionnement de régulateur de charge	92
III.5.2. Dimensionnement de l'onduleur	93
III.6. Dimensionnement des câbles	93
III.7. Récapitulatif de dimensionnement de l'installation photovoltaïque.....	95
CONCLUSION GÉNÉRALE	xiv
ANNEXES.....	xv
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	xviii
RÉFÉRENCES WEBOGRAPHIQUES.....	xxiii

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I :

Tableau I.1: Echelle de valeur de la DBO ₅	4
Tableau I.2: L'appréciation des valeurs de biodégradabilité d'un effluent.	7
Tableau I.3: Norme de rejet dans le milieu récepteur (Valeurs limites maximales).	9
Tableau I.4: Spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation	10
Tableau I.5: Les différents types de dégrillage.....	13
Tableau I.6: Caractéristiques de certains garnissages.....	18
Tableau I.7: Paramètres de conception d'un lit bactérien.....	19
Tableau I.8: Classement des lits bactériens selon les charges hydrauliques/organiques.....	19
Tableau I.9: Tableau d'indications des disques biologiques	21
Tableau I.10: Avantages/Inconvénients des procédés par cultures fixées.....	22
Tableau I.11: Avantages/Inconvénients des procédés par cultures libres.	27

CHAPITRE II :

Tableau II.1: Avantages / Inconvénients du pétrole	33
Tableau II.2: Avantages / Inconvénients du gaz naturel.	35
Tableau II.3: Avantages / Inconvénients du charbon.	36
Tableau II.4: Consommation intérieure brute d'énergies fossiles en Algérie [1990-2017].....	36
Tableau II.5: Réserves d'énergies primaires fossiles (base 2017)	37
Tableau II.6: Sources d'énergies renouvelables	38
Tableau II.7: Classification des ressources géothermiques.	45
Tableau II.8: Comparaison des énergies au niveau de la localisation et de la variabilité.	48
Tableau II.9: Comparaison des énergies au niveau politique et économique.	48
Tableau II.10: Comparaison des énergies selon l'impact environnemental.....	49
Tableau II.11: Quantité de combustibles nécessaires pour produire 1000 MW pendant 1an.	50
Tableau II.13: Tableau comparatif des différents matériaux des photopiles.....	53
Tableau II.14: Tension du champ en fonction de sa puissance crête.	60

CHAPITRE III :

Tableau III.1: La pollution journalière par personne.	65
Tableau III.2: Charges hydrauliques arrivant à la STEP.....	66
Tableau III.3: Charges polluantes / Concentrations arrivant à la STEP.....	66
Tableau III.4: Normes de rejet dans le milieu récepteur (Valeurs limites maximales).....	67
Tableau III.5: les valeurs de β dépendant de la forme des barreaux	70
Tableau III.6: Récapitulatif de dimensionnement du dégrilleur.	71
Tableau III.7: caractéristiques de décanteur-digesteur.....	75
Tableau III.8: Les charges polluantes à l'entrée et la sortie du décanteur-digesteur.	75
Tableau III.9: Les caractéristiques du clarificateur.	79
Tableau III.10: Tableau récapitulatif des caractéristiques de bassins de lagunage.	84
Tableau III.11: La consommation énergétique des équipements.	89
Tableau III.12: Tableau récapitulatif des caractéristiques de l'installation photovoltaïque. .	95

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Domaines d'utilisation des différentes filières de traitement des eaux usées.	11
Figure I.2 : Schéma des étapes du traitement des eaux usées domestiques	12
Figure I.3 : Dégriilleurs droites de la nouvelle station d'épuration de la ville de Timimoune.	14
Figure I.4 : Schéma de fonctionnement de lit bactérien	17
Figure I.5 : Schéma de fonctionnement de disque biologique	20
Figure I.6 : Les cycles biologiques d'une lagune	23
Figure I.7 : Principe de la filière lagunage naturel.....	23
Figure I.8 : Principe de la filière lagunage aérée	25
Figure I.9 : Schéma de principe de traitement par boue activée	27

CHAPITRE II :

Figure II.1 : Evolution [1973-2016] de la production du gaz naturel dans les différentes régions (bcm/Gm ³).	34
Figure II.2 : La formation du charbon	35
Figure II.3 : Les énergies renouvelables	39
Figure II.4 : Schéma de fonctionnement de l'énergie éolienne	40
Figure II.5 : Les éoliennes à axe horizontal.....	40
Figure II.6 : Les éoliennes à axe vertical	41
Figure II.7 : Les deux types d'énergie solaire	43
Figure II.8 : Un capteur plan vitré	44
Figure II.9 : Principe de la conversion photovoltaïque.....	44
Figure II.10 : Production hydroélectrique par moulin à l'eau	47
Figure II.11 : De la cellule au champ photovoltaïque	51
Figure II.12 : Cellule solaire photovoltaïque	52
Figure II.13 : Types des cellules solaires photovoltaïques	52
Figure II.14 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	54

GLOSSAIRE

Les acronymes sont classés par ordre d'apparition dans le texte.

Acronyme	Signification
PH	<u>P</u> otentiel d' <u>H</u> ydrogène
NTU	<u>N</u> ephelometric <u>T</u> rinity <u>U</u> nit
DBO	<u>D</u> emande <u>B</u> iochimique en <u>O</u> xygène
DBO ₅	<u>D</u> emande <u>B</u> iochimique en <u>O</u> xygène pendant <u>5</u> jours
DCO	<u>D</u> emande <u>C</u> himique en <u>O</u> xygène
MO	<u>M</u> atière <u>O</u> rganique
MES	<u>M</u> atières <u>E</u> n <u>S</u> suspension
MVS	<u>M</u> atières <u>V</u> olatiles en <u>S</u> suspension
MMS	<u>M</u> atières <u>M</u> inérales en <u>S</u> suspension
COT	<u>C</u> arbone <u>O</u> rganique <u>T</u> otal
COP	<u>C</u> arbone <u>O</u> rganique sous forme <u>P</u> articulière
Pt	<u>P</u> hosphore <u>t</u> otal
EH	<u>E</u> quivalent <u>H</u> abitant
CP	<u>C</u> harge <u>P</u> olluante
hab	<u>h</u> abitant
NTK	<u>A</u> zote <u>T</u> otal <u>K</u> jedahl
NGL	<u>N</u> aturel <u>G</u> as <u>L</u> iquids
DB	<u>D</u> isque <u>B</u> iologique
LSPR	<u>L</u> it de <u>S</u> échage <u>P</u> lanté de <u>R</u> oseaux
tep	<u>T</u> onne d' <u>E</u> quivalent <u>P</u> étrole
p	<u>P</u> ositive
n	<u>N</u> égative
STEP	<u>S</u> tation d' <u>é</u> puration
PV	<u>P</u> hoto <u>v</u> oltaïque
CIS	Alliage de <u>C</u> uivre, <u>I</u> ndium et <u>S</u> élénium
EVA	<u>E</u> thylène <u>V</u> inyle <u>A</u> cétate
Ni-Cd	<u>N</u> ickel- <u>C</u> adium
Li-ion	<u>L</u> ithium- <u>i</u> on
Pb	<u>P</u> lomb
DC	<u>D</u> irecte <u>c</u> urrent
AC	<u>A</u> lternating <u>c</u> urrent

NOMENCLATURE

Les principales notions et abréviations utilisées dans les formules de ce mémoire sont explicitées ci-dessous :

Symbole	Signification
K	Le rapport de la biodégradabilité.
CP	La charge polluante.
Q_j	Le débit moyen journalier.
Q_{mh}	Le débit moyen horaire.
Q_p	Le débit de pointe horaire.
Q_d	Le débit diurne.
C_v	La charge volumique.
CH	La charge hydraulique.
Q_R	Le débit de recirculation.
R	Le taux de recirculation.
E	L'efficacité d'élimination.
V'_{pv}	Le courant de court-circuit généré par la cellule PV.
V_{oc}	La tension en circuit ouvert.
P_{max}	La puissance maximale que peut avoir la cellule PV.
FF	Le facteur de forme de la cellule PV.
η	Le rendement maximum de la cellule PV.
E_c	La consommation énergétique de l'installation PV.
E_t	La consommation totale d'une installation PV.
P_{ch}	La puissance crête d'un générateur PV.
C	La capacité de l'accumulateur.
η_e	Le rendement épuratoire.
V_u	Le volume utile de la bêche de relevage.
ΔH	La perte de charge de dégrillage.
T_{S.A}	Le temps de séjour des eaux usées dans le bassin anaérobie.
T_{S.F}	Le temps de séjour des eaux usées dans le bassin facultatif.
T_{S.M}	Le temps de séjour des eaux usées dans le bassin de maturation.
V_{bp}	Le volume de boues primaires.
V_{bs}	Le volume de boues secondaires.
V_T	Le volume total de boues journalier.
N_P	Le nombre de panneaux photovoltaïques.
N_{ps}	Le nombre de panneaux en série.
N_b	Le nombre de batteries.
N_{bs}	Le nombre de batteries en série.
I_e	Le courant d'entrée dans le régulateur.
I_s	Le courant de sortie de régulateur.
P_{on}	La puissance d'onduleur.

RÉSUMÉ

Le traitement des eaux usées des petites localités est très essentiel non seulement pour la protection de l'environnement, mais aussi pour la possibilité de la réutilisation de ces eaux comme une ressource renouvelable à des fins agricoles ou autre, afin de parvenir à un développement durable des zones rurales.

En raison des coûts élevés et la rareté des branchements électriques dans ces régions isolées, nous recherchons dans ce travail de trouver une énergie économique alternative pour répondre aux besoins en électricité dans le processus d'épuration des eaux usées.

Le but de ce modeste travail est de faire une étude des différentes techniques d'épuration des eaux usées pour une petite station d'épuration de 2000 EH et de choisir le procédé le plus convenable pour pouvoir intégrer l'énergie solaire photovoltaïque. Dans cette étude, il question de faire une comparaison entre deux filières de traitement des eaux usées, la première à lit bactérien, et la deuxième à lagunes naturelles. Le choix s'est porté sur la deuxième filière, celle de lagunage naturel, car elle est moins énergétivore.

Mots clés : eaux usées, énergies renouvelables, épuration des eaux, station d'épuration, énergie solaire photovoltaïque, lit bactérien, lagunage naturel.

ملخص

تعتبر معالجة المياه المستعملة من المدن الصغيرة ضرورية للغاية ليس فقط لحماية البيئة، ولاكن أيضا لإمكانية إعادة استخدامها كمصدر متجدد لأغراض زراعية وغيرها، من أجل تحقيق التنمية المستدامة في المناطق الريفية.

نظرا لارتفاع التكاليف وندرة التوصيلات الكهربائية في هذه المناطق المعزولة، فإننا نسعى في هذا العمل لإيجاد طاقة اقتصادية بديلة لسد احتياجات الكهرباء في عملية معالجة مياه الصرف الصحي.

الهدف من هذا العمل المتواضع هو دراسة تقنيات معالجة مياه الصرف الصحي المختلفة لمحطة صغيرة 2000 ما يعدل الساكن واختيار العملية الأنسب لتكون قادرة على دمج الطاقة الشمسية الكهروضوئية. في هذه الدراسة، يتعلق الأمر بإجراء مقارنة بين تقنيتين لمعالجة مياه الصرف الصحي، الأولى بسربير بكتيري، والثانية ببحيرات طبيعية. وقع الاختيار على التقنية الثانية، لأنها تستهلك طاقة أقل.

كلمات مفتاحية: المياه المستعملة، معالجة المياه المستعملة، محطة تطهير المياه المستعملة، الطاقة الشمسية الكهروضوئية.

ABSTRACT

The treatment wastewater of small towns is very essential not only for the protection of the environment, but also for the possibility of the reuse of this water as a renewable resource for agricultural or other purposes, in order to achieve a sustainable development of rural areas.

Due to the high costs and the scarcity of electrical connections in these isolated areas, we are looking in this work to find an alternative economical energy to meet the electricity needs in the wastewater purification process.

The aim of this modest work is to make a study of different wastewater treatment techniques of a small wastewater treatment plant of 2000 EH and to choose the most suitable process to be able to integrate the solar photovoltaic energy. In this study, it is a question of making a comparison between two wastewater treatment processes, the first with a bacterial bed, and the second process, with naturel lagoons. The choice fell on the second one, that of naturel lagooning, because it consumes less energy.

Keywords: wastewater, renewable energies, wastewater purification, wastewater treatment plant, solar photovoltaic energy, bacterial bed, naturel lagooning.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Par eaux usées domestiques, on entend les eaux provenant d'une agglomération après avoir été utilisées dans des différents besoins quotidiens. En effet, ces eaux doivent subir un traitement avant d'être renvoyées vers le milieu naturel, ou bien réutilisées dans l'irrigation, l'industrie ou d'autres usages.

Avec l'évolution des modes de vie des êtres humains, la demande en eau potable augmente, et par conséquent cette dernière est suivie par une augmentation des volumes de rejets.

Dans les zones rurales des pays sous-développés ou en cours de développement, les pratiques d'assainissement sont malheureusement encore déficientes, ce qui a pour effet d'engendrer une dégradation du milieu environnant qui, à son tour, conduit à l'apparition de sérieux problèmes pour l'homme et l'environnement. Cette carence est due à plusieurs obstacles tels que les faibles moyennes financières, la faible densité de logements, la dispersion d'agglomération et l'éloignement des réseaux de distribution d'électricité. Ce dernier est l'un des contraintes majeures d'épuration des eaux usées.

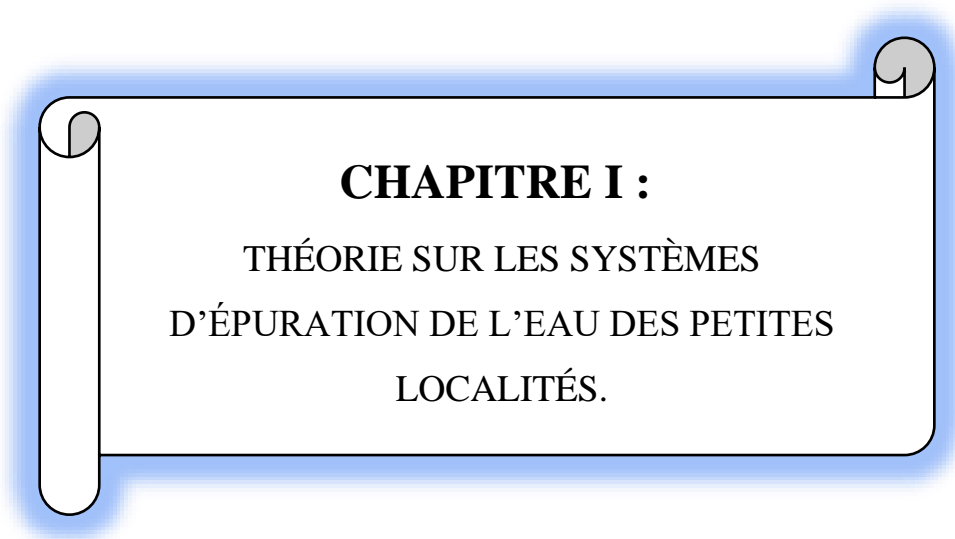
L'épuration des eaux usées nécessite une énergie nécessaire pour son ensemble des opérations afin de garantir un bon fonctionnement.

Dans ce contexte, notre mémoire consiste à promouvoir des techniques simples, fiables et accessibles pour la dégradation des effluents domestiques d'une petite localité (2000 équivalents habitants) avec l'introduction des énergies renouvelables (propres), afin de mettre en place une stratégie d'épuration de ces eaux et ainsi préserver notre environnement.

Pour répondre à cette problématique, ce mémoire est organisé et divisé en trois chapitres, comme suit :

- Dans le premier chapitre, nous présentons la composition ainsi que les systèmes et les théories d'épuration des eaux usées domestiques avec les différentes définitions et calculs.
- Dans le deuxième chapitre, nous présentons les différentes sources d'énergies (fossiles et renouvelables) en comparant les deux, l'électrification des zones rurales par l'énergie solaire photovoltaïque et le dimensionnement d'une installation photovoltaïque.
- Dans le troisième grand chapitre et le dernier, nous présentons l'évaluation des données de bases de dimensionnement, le dimensionnement des ouvrages de la station d'épuration avec deux techniques (variantes) différentes : le lit bactérien et le lagunage naturel, la conception et le dimensionnement de l'installation photovoltaïque connecté à la station d'épuration.

Remarque : Il est à noter qu'un objectif important de ce projet consistait à savoir le coût des deux différentes techniques d'épuration, mais malheureusement, comme dans les conditions actuelles (confinement à cause de la pandémie de la COVID-19), cette opération n'a pu être réalisée.



CHAPITRE I :
THÉORIE SUR LES SYSTÈMES
D'ÉPURATION DE L'EAU DES PETITES
LOCALITÉS.

INTRODUCTION

Ce présent chapitre a pour but de définir l'ensemble des procédés d'épuration adaptables pour les petites localités, tenant compte des contraintes technico-économiques (coût, énergie nécessaire, exploitation, entretien, etc.). Après avoir cité sommairement les principales origines des eaux résiduaires urbaines et les paramètres de pollution à éliminer, nous décrirons le principe de fonctionnement et les bases de dimensionnement de ces procédés afin de mieux comprendre les techniques d'épuration des petites collectivités.

I. Composition des eaux usées domestiques

I.1. Définition

La composition des eaux résiduaires domestiques brutes dépend essentiellement de [1] :

- ❖ L'activité humaine (eaux ménagères et eaux vannes) ;
- ❖ La composition des eaux d'alimentation en eau potable et de la nature des matériaux des canalisations (pour les composés chimiques) ;
- ❖ La nature et de la quantité des effluents industriels éventuellement rejetés dans le réseau urbain.

Les eaux usées domestiques sont chargées de polluants. Elles peuvent contenir de nombreuses substances, sous forme solide ou dissoute, ainsi que de nombreux micro-organismes. Ces derniers sont la cause des principales restrictions imposées à la réutilisation des eaux usées.

I.2. Calcul des charges

I.2.1. Paramètres à analyser

Les paramètres des eaux usées permettent de déterminer le degré de pollution de l'eau. Par pollution, on entend toute altération des propriétés physiques, chimiques et biologique, que l'on appelle alors eaux usées.

Les paramètres arrêtés pour les analyses qui vont servir à la définition de la chaîne de traitement des eaux usées domestiques sont :

I.2.1.1. Les paramètres physico-chimiques

Le traitement efficace d'un rejet liquide nécessite précédemment une bonne connaissance de la quantité, la qualité et les variations temporelles de la composition de l'effluent. Dans le processus de l'identification des eaux résiduaires, la caractérisation physico-chimique est incontournable si on espère de définir avec bonne qualité les caractéristiques d'un procédé de traitement [2].

Les paramètres physico-chimiques, dans leur ensemble, correspondent aux caractéristiques du rejet. Toutefois, ils vérifient les points suivants [3] :

◆ Le pH

Le pH, indique l'alcalinité des eaux usées, son rôle est capital pour la croissance des micro-organismes qui ont généralement un pH optimum variant de 6,5 à 7,5. Lorsque le pH est inférieur à 5 ou supérieur à 8,5, la croissance des micro-organismes est directement affectée. En outre, le pH est un élément important pour l'interprétation de la corrosion dans les canalisations des installations de l'épuration. Les valeurs de pH mesurés varient peu et restent autour de 7,5 en moyenne [4].

Il représente l'acidité, la neutralité ou l'alcalinité d'une solution aqueuse peut s'exprimer par la concentration en H_3O^+ (noté H^+ pour simplifier). De manière à faciliter cette expression ; on utilise le logarithme décimal de l'inverse de la concentration en ion H^+ : c'est le pH [76].

$$PH = \text{Log } 1 / [H^+] \quad (I.1)$$

◆ La conductivité

C'est la capacité d'une eau à conduire l'électricité. La conductivité des eaux dépend de leur concentration ionique et de leur température. Cette mesure permet d'évaluer rapidement le degré de minéralisation d'une eau, c'est-à-dire la quantité de substances dissoutes ionisées présentes [5]. Le résultat est donc exprimé en micro siemens par centimètre ($\mu S/cm$) [3].

◆ La turbidité

La turbidité ou la limpidité est la mesure du caractère trouble de l'eau. Elle est causée par les matières en suspension, telles que l'argile, le limon, les particules organiques, le plancton et les autres organismes microscopiques. Une turbidité trop élevée empêche la pénétration de la lumière dans la colonne d'eau et peut ainsi diminuer la croissance des algues et des plantes aquatiques. L'unité utilisée est le NTU (Nephelometric Trinity Unit) [5].

◆ Oxygène, DBO, DCO et Oxydabilité

L'ensemble de ces paramètres permet d'estimer la quantité de matières organiques présente dans l'eau.

▪ **Oxygène dissous**

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que les pressions partielles d'oxygène dans le liquide et dans l'air soient en équilibre. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est en fonction de la pression atmosphérique (donc de l'altitude), de la température et de la minéralisation de l'eau : la saturation en O_2 diminue lorsque la température et l'altitude augmentent.

La concentration en oxygène dissous est un paramètre essentiel dans le maintien de la vie des microorganismes, et donc dans les phénomènes de dégradation de la matière organique et de la photosynthèse.

C'est un paramètre utilisé essentiellement pour les eaux de surface. Au niveau de la mer à $20^\circ C$, la concentration en oxygène en équilibre avec la pression atmosphérique est de 8,8 mg/l d' O_2 à saturation. Une eau très aérée est généralement sursaturée en oxygène (torrent), alors qu'une eau chargée en matières organiques dégradables par des micro-organismes et sous-saturée. En effet, la forte présence de la matière organique, dans un

plan d'eau par exemple, permet aux micro-organismes de se développer tout en consommant de l'oxygène.

L'oxygène dissous est donc un paramètre utile dans le diagnostic biologique du milieu eau [77].

▪ DBO, DCO et oxydabilité

La DBO (demande biochimique en oxygène) exprime la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation de la matière organique biodégradable d'une eau par le développement de micro-organismes, dans des conditions données. Les conditions communément utilisées sont 5j (on ne peut donc avoir qu'une dégradation partielle) à 20°C, à l'abri de la lumière et de l'air ; on parle alors de la DBO₅. Cette mesure est très utilisée pour le suivi des rejets des stations d'épuration, car elle donne une approximation de la charge en matière organiques biodégradables. Elle est exprimée en mg d'O₂ consommé (cf. tableau ci-dessous).

Tableau I.1 : Echelle de valeur de la DBO₅ [77].

Situation	DBO ₅ (mg/l)
Eau naturelle pure et vive	C < 1
Rivière légèrement polluée	1 < C < 3
Égout	100 < C < 400
Rejet station d'épuration efficace	20 < C < 40

La DCO (demande chimique en oxygène) exprime la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder la matière organique (biodégradable ou non) d'une eau à l'aide d'un oxydant, le bichromate de potassium. Ce paramètre offre une représentation plus ou moins complète des matières oxydables présentes dans l'échantillon (certains hydrocarbures ne sont, par exemple, pas oxydés dans ces conditions). L'objectif de la DCO est donc différent de celui de la DBO.

La DCO peut être réalisée plus rapidement que la DBO (oxydation 'forcée') et donne une image de la matière organique présente, même quand le développement de micro-organismes est impossible (présence d'un toxique par exemple). Le résultat s'exprime en mg/l d'O₂. Généralement, la DCO vaut de 1,5 à 2 fois la DBO₅ pour les eaux usées domestiques [77].

La relation empirique suivante lie la DBO₅, la DCO et la matière organique de l'échantillon (MO) [77] :

$$M_0 = \frac{2DBO_5 + DCO}{3} \quad (\text{I.2})$$

♦ Les matières organiques : (MES)

Elles représentent les matières qui ne sont ni à l'état soluble ni à l'état colloïdal, donc retenues par un filtre. Les MES, qui comportent des matières organiques et minérales, constituent un paramètre important qui marque bien le degré de pollution de l'effluent. Les

techniques d'analyse font appel à la séparation directe par filtration ou centrifugation, le résidu étant séché à 105 °C et ensuite pesé. Le résultat est exprimé en mg/l [3]. Les MES s'expriment par la relation suivante [6] :

$$\text{MES} = 30\% \text{ MMS} + 70\% \text{ MVS} \quad (\text{I.3})$$

Les matières volatiles en suspension (MVS) représentent la fraction organique de MES et sont obtenues par calcination de ces MES à 525°C pendant 2 heures. La différence de poids entre les MES à 105°C et les MES à 525°C donne la « perte au feu » et correspond à la teneur en MVS en (mg/l) d'une eau [6].

Tandis que les matières minérales en suspension (MMS), représentent le résultat d'une évaporation totale de l'eau, c'est-à-dire son « extrait sec » constitué à la fois par les matières en suspension et les matières solubles telles que les chlorures, les phosphates, etc. [6].

◆ Le carbone organique total : (COT)

Dans les eaux naturelles, le carbone peut être présent sous différentes formes, le carbone organique ne représentant le plus souvent qu'une faible concentration par rapport aux teneurs en carbone inorganique.

Carbone Total = Carbone Organique Total (COT) + Carbone Minéral
--

Le carbone organique total (COT) est constitué d'une grande diversité de matières organiques dont certaines peuvent être présentes sous forme particulaire (COP) [7].

◆ La température

La température de l'eau est un paramètre très important. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels, ...etc. [8].

◆ La couleur et l'odeur

Une eau pure observée sous une lumière transmise sur une profondeur de plusieurs mètres émet une couleur bleu clair car les longueurs d'ondes courtes sont peu absorbées alors que les grandes longueurs d'onde (rouge) sont absorbées très rapidement [9]. La coloration d'une eau est dite vraie ou réelle lorsqu'elle est due aux seules substances en solution. Elle est dite apparente quand les substances en suspension y ajoutent leur propre coloration [8].

◆ Les composés phosphorés

Le phosphore est mesuré sous forme de phosphore total (Pt). La recherche des fractions minérales (Phosphates issus des produits lessiviels) et organiques (d'origine humaine ou

industrielle) permet de juger des conditions de traitement biologique de l'effluent et des risques liés à l'eutrophisation des eaux calmes. Le résultat est exprimé en mg Pt/l [3].

◆ Les matières azotées

L'azote rencontré dans les eaux usées peut avoir un caractère organique ou minéral, il se présente sous quatre formes : organique ; ammoniacal (NH_4) ; nitreux (NO_2^-) ; nitrique (NO_3^-). Dans les eaux usées, l'azote se trouve principalement sous forme ammoniacale [2]. Même s'il n'existe pas de critère de toxicité pour l'azote total, une concentration plus élevée que 1,0 mg/l dans les eaux de surface est considérée comme étant indicatrice d'une problématique de surfertilisation dans le milieu [3].

◆ Les produits toxiques

Ils sont plus rarement recherchés dans les eaux usées domestiques. Le rejet de ces produits est interdit (ou fortement réglementé) dans un réseau d'assainissement, ce qui n'empêche pas que l'on puisse en trouver dans les effluents arrivant à certaines stations d'épuration [3]. Dans notre travail, nous sommes intéressés seulement par des produits de nature organique : ce sont les hydrocarbures et les détergents.

◆ Les matières grasses

Il est évident que les huiles et graisses présentent de multiples inconvénients dans le traitement biologique ultérieur, tel qu'une mauvaise diffusion de l'oxygène dans le floc bactérien, le bouchage des pompes et canalisations et une acidification du milieu dans le digesteur anaérobie avec toutes les conséquences que cela peut représenter [10]. Les méthodes de dosage sont fondées sur l'extraction des graisses par un solvant, puis par une pesée ou une mesure d'absorption de l'infrarouge. Les résultats d'analyses sont fournis en mg/l d'hexane ou de chloroforme (selon le solvant utilisé) [3].

I.2.1.2. Les paramètres biologiques

Tous les spécialistes dans le domaine d'assainissement liquide s'accordent sur le fait que les eaux usées contiennent tous les microorganismes excrétés avec les matières fécales. Cette flore entérique normale est accompagnée d'organismes pathogènes [11]. Trois groupes principaux sont couramment utilisés dans ce but : les coliformes fécaux, les coliformes totaux et les œufs d'helminthes.

I.2.1.3. Autres paramètres importants

Il existe des autres paramètres importants qui permettent de déterminer le degré de pollution. On peut citer :

◆ Le rapport : (DCO/DBO_5)

Ce rapport évalue la biodégradabilité d'une eau usée, c'est -à -dire la faculté de transformation de la matière organique en matière minérale, admissible par le milieu naturel, elle est exprimée par un coefficient [12] : $K = \text{DCO}/\text{DBO}_5$.

Il est en général proche de 2 pour les eaux usées urbaines [78].

Le tableau suivant, nous renseigne sur les valeurs du coefficient (K) et l'état de biodégradabilité d'un effluent :

Tableau I.2 : L'appréciation des valeurs de biodégradabilité d'un effluent.

Coefficient (k)	Appréciation
K=1	DCO = DBO ₅ l'effluent est complètement biodégradable.
1 < k < 1.5	L'effluent est biodégradable.
1.5 < k < 2.5	L'effluent est moyennement biodégradable.
k > 2.5	L'effluent n'est pas biodégradable.

Source : (ROUABAH.N, 2008) [12].

◆ Les éléments nutritifs

Ce sont des éléments nécessaires pour le développement de micro-organismes qui effectuent l'épuration biologique (biodégradation des polluants), ces éléments sont le carbone, l'azote, le phosphore et dans une moindre mesure le soufre. Ces micro-organismes se nourrissent des composés organiques et minéraux dissous dans l'eau usée [13].

I.2.2. Estimation de la charge polluante

Les eaux usées issues de l'activité humaine peuvent être caractérisées en fonction de leur charge polluante. Conventionnellement les volumes et les pollutions journalières sont estimés en équivalent habitant (EH).

L'équivalent habitant est une estimation de la charge polluante, en termes de matières oxydables, des matières en suspensions et des matières azotées et phosphatées, rejetée chaque jour par un individu. C'est une unité conventionnelle qui représente le flux moyen de charge polluante, engendrée par un habitant et par jour.

La pollution journalière produite par une personne utilisant de 150 à 200 litres d'eau est évaluée à [79] :

- ▶ de 70 à 90 grammes de matières en suspension ;
- ▶ de 60 à 70 grammes de matières organiques ;
- ▶ de 15 à 17 grammes de matières azotées ;
- ▶ 4 grammes de phosphore ;
- ▶ plusieurs milliards de germes pour 100 ml.

Les charges polluantes représentent ainsi les paramètres de base de dimensionnement d'une station d'épuration. Elles sont données par [80] :

$$CP = Q_{mj} \times C \quad (\text{I.4})$$

Avec : **CP** : Charge polluante (kg/j) ;

Q_{mj} : Débit moyen journalier d'eau usée arrivant à la station en (m³/j) ;

C : Concentration obtenue par analyse en (Kg/m³).

I.2.3. Calcul du débit

Le débit c'est le volume par l'unité de temps exprimé en (m^3/j), (m^3/h) ou (l/s).

On distingue quatre types de débit :

A. Le débit moyen journalier

Le débit moyen journalier est définie par :

$$Q_j = D \times N \times R \quad (\text{m}^3/\text{j}) \quad (\text{I.5})$$

Avec : **D** : dotation en ($\text{l}/\text{hab}/\text{j}$), **N** : nombre d'habitant à l'horizon considéré,

R : coefficient de rejet ($R= 0.8$), qui correspond au volume rejeté par les habitants, et qui est estimé à 80 % de la dotation d'approvisionnement en eau potable (AEP).

B. Le débit moyen horaire

Le débit moyen horaire est donné par la relation :

$$Q_{mh} = \frac{Q_j}{24} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (\text{I.6})$$

C. Le débit de pointe horaire

Le débit de pointe horaire est défini par la relation :

$$Q_p = C_p \times Q_m \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (\text{I.7})$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} C_p = 1,5 + \frac{2,5}{\sqrt{Q_m}} & \text{si } Q_m \geq 2,8 \text{ l/s} \\ C_p = 3 & \text{si } Q_m < 2,8 \text{ l/s} \end{cases}$$

D. Le débit diurne

Le débit diurne correspond à la période diurne de 16 heures consécutives au cours de laquelle la station reçoit le plus grand volume d'eau usée, soit :

$$Q_d = \frac{Q_j}{16} \quad (\text{m}^3/\text{h}) \quad (\text{I.8})$$

I.2.4. Normes de rejets

La pollution de l'eau peut avoir des conséquences sur la santé de l'homme ainsi que sur le milieu naturel. L'Algérie, soucieuse de préserver la santé publique et l'environnement a instauré des normes relatives aux rejets des eaux usées.

Les eaux usées collectées, dans les réseaux urbains, ne doivent être rejetées dans un milieu récepteur naturel (rivière, lac, littoral marin, ou terrain d'épandage) que lorsqu'elles correspondent à des normes fixées par voie réglementaire. Elles se caractérisent par des paramètres physico-chimiques et bactériologiques, qui permettent de déterminer leur éventuelle origine et de connaître l'importance de leur charge polluante.

Le décret exécutif paru dans le journal officiel N°46 du juillet 1993 réglementant les rejets d'effluents liquides. Les normes de rejets sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau I.3 : Norme de rejet dans le milieu récepteur (Valeurs limites maximales).

Paramètres	Unités	Valeurs maximales
Température	°C	30
PH	/	5.5 à 8.5
MES	mg/l	30
DBO ₅	mg/l	40
DCO	mg/l	120
Azote Kjeldahl	mg/l	40
Phosphates	mg/l	2
Cyanures	mg/l	0.1
Aluminium	mg/l	5
Cadmium	mg/l	0.2
Chrome 3+	mg/l	3
Chrome 6+	mg/l	0.1
Fer	mg/l	5
Manganèse	mg/l	1
Mercuré	mg/l	0.01
Nickel	mg/l	5
Plomb	mg/l	1
Cuivre	mg/l	3
Zinc	mg/l	5
Huiles et graisses	mg/l	20
Phénols	mg/l	0.5
Solvants organiques	mg/l	20
Chlore actif	mg/l	1
Détergents	mg/l	2

(*) : Pour type de sols à texture fine, neutre ou alcalin. [14].

(Source : Journal officiel N° 46, 1993)

I.2.5. Objectif de qualité

Le degré de traitement dépend principalement du devenir des eaux usées épurées, de leurs sous-produits et de leur impact sur l'environnement naturel et humain. Les objectifs de protection exigent l'évacuation appropriée de ces eaux après un traitement adéquat visant ainsi la réduction voire l'élimination des risques peuvent nuire à la santé publique et au fonctionnement des écosystèmes affectés par les rejets.

Dans certains cas, les eaux usées épurées peuvent être réutilisées pour l'irrigation en agriculture, alors que dans la majeure partie les eaux épurées sont rejetées directement dans le milieu récepteur. Pour que les eaux usées épurées puissent être réutilisées pour l'irrigation, il faut qu'ils répondent aux critères mentionnés dans l'arrêté interministériel du 08 Safar 1433, correspondant au 02 janvier 2012 fixant les spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation [15].

Tableau I.4 : Spécifications des eaux usées épurées utilisées à des fins d'irrigation
(Valeurs limites maximales).

Paramètres		Unité	Concentration maximale admissible
Physiques	PH	-	$6.5 \leq \text{pH} \leq 8.5$
	MES	mg/l	30
Chimiques	DBO ₅	mg/l	30
	DCO	mg/l	90
	Azote (NO ₃ -N)	mg/l	30
	Bicarbonate (HCO ₃)	meq/l	8.5
Eléments Toxiques (*)	Aluminium	mg/l	20.0
	Cadmium	mg/l	0.05
	Chrome	mg/l	1.0
	Cuivre	mg/l	5.0
	Cyanures	mg/l	0.5
	Fer	mg/l	20.0
	Phénols	mg/l	0.002
	Manganèse	mg/l	10.0
	Mercure	mg/l	0.01
	Nickel	mg/l	2.0
Zinc	mg/l	10.0	

(Source : Journal officiel N° 41, 2012).

II. Épuration des eaux usées domestiques

II.1. Définition

L'épuration des eaux est un ensemble de techniques qui consistent à purifier l'eau soit pour recycler les eaux usées dans le milieu naturel et le préserver contre toute forme de pollution hydrique, soit pour transformer les eaux naturelles en eau potable [16].

II.2. Fonction et choix d'une station d'épuration

Une station d'épuration peut s'apparenter à une usine de dépollution des eaux usées avant leur rejet en milieu naturel, généralement en rivière. Par sa fonction, elle est, généralement, installée à l'extrémité d'un réseau de collecte des égouts et en amont du milieu naturel. Elle rassemble une succession de dispositifs, empruntés tour à tour par les eaux usées, chacun de

ces dispositifs étant conçu pour extraire au fur et à mesure les différents polluants contenus dans les eaux [17].

Le choix de la filière de traitement des eaux usées est déterminé en fonction de la destination finale des eaux épurées qui peut consister en [18] :

- ✧ leur rejet dans le domaine public hydraulique dans le respect des conditions fixées par la réglementation en vigueur ;
- ✧ leur réutilisation à des fins d'irrigation, dans le respect des conditions fixées par la réglementation en vigueur ;
- ✧ leur utilisation dans le domaine industriel en fonction des exigences de qualité de l'eau correspondant aux procédés industriels considérés ;
- ✧ la recharge artificielle des nappes aquifères.

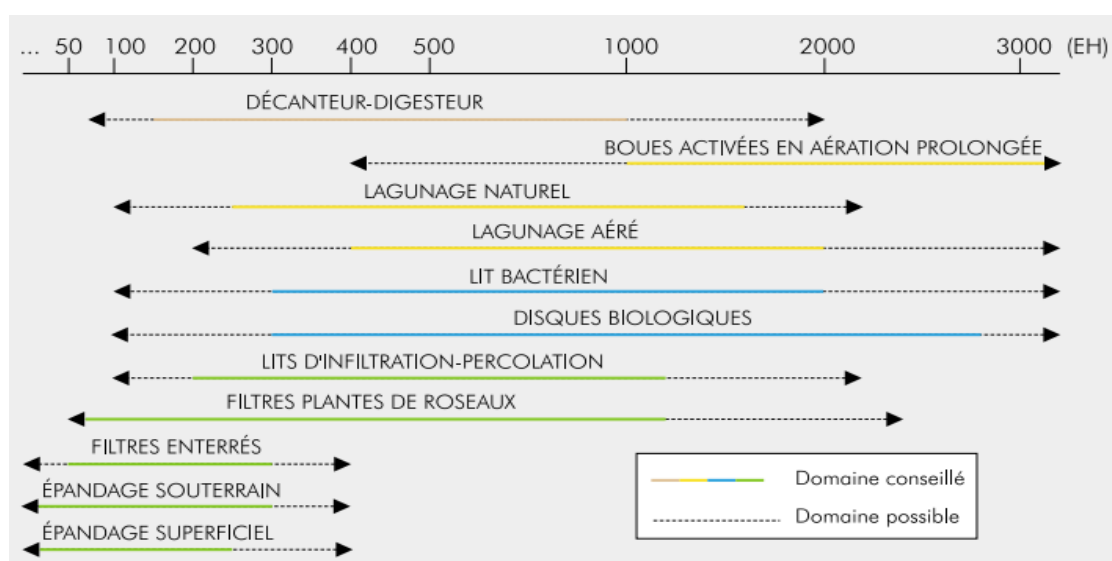


Figure I.1 : Domaines d'utilisation des différentes filières de traitement des eaux usées.
(Source : PEYRAUT T, 2011) [19].

II.3. Caractéristiques du site d'épuration

Le choix du site d'épuration se projette sur les facteurs tels que [20] :

- ✧ La compatibilité du procédé avec la topographie du terrain (pente), avec l'altitude et avec les contraintes (roche, nappe d'eau souterraine, perméabilité ... etc.) ;
- ✧ L'emprise au sol du procédé ;
- ✧ L'impact potentiel sur les habitants voisins (impacts sonores, visuel, et olfactifs).

II.4. Sélection du traitement le mieux adapté

Les traitements adaptés sont ceux compatibles avec les trois contraintes (charge à traiter, milieu récepteur et site).

La sélection du traitement se fait ensuite selon les critères suivants :

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Intégration paysagère ; ➤ Impacts sur les habitations voisines ; ➤ Gestion des sous-produits ; ➤ Difficulté d'exploitation et coût exploitation ; | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Infrastructures nécessaires ; ➤ Coût d'investissement ; ➤ Autres caractéristiques particulières ... |
|--|---|

II.5. Procédés de traitement des eaux usées et leur portée

En vue d'éliminer les diverses impuretés des eaux usées, on peut recourir à toute une gamme de dispositifs évoqués ci-dessous [81] :

- ✓ Pour les matières en suspension grossières : les tamis et les grilles.
- ✓ Pour les matières décantables grossières : les dessableurs.
- ✓ Pour les graisses, les huiles et les matières flottantes de même nature : les séparateurs de graisse, les bassins d'écumage, les décanteurs avec dispositif d'écumage.
- ✓ Pour les matières en suspension fines : les décanteurs, les bassins d'écumages, les bassins de précipitation chimique, les filtres à sable.
- ✓ Pour les matières dissoutes, semi dissoutes (colloïdales), et pour les matières organiques en suspension très fines, les installations «biologiques», notamment : l'irrigation sur de grandes surfaces, les champs d'épandages avec exploitation agricole, la filtration par le sol sans exploitation agricole, les lits bactériens, les étangs et les lacs pour eaux usées, les bassins de boues activées, les fausses septiques.
- ✓ Contre les infections épidémiques et les odeurs : le chlore ou d'autres produits chimiques. Dans une mesure limitée, les installations d'épuration biologique.

III. Systèmes et théories de calcul d'épuration des eaux usée domestiques

Un système type de traitement d'eaux usées fait appel à une série de procédés unitaires. Ces procédés se divisent en quatre catégories : les prétraitements, les traitements primaires, les traitements secondaires et les traitements tertiaires.

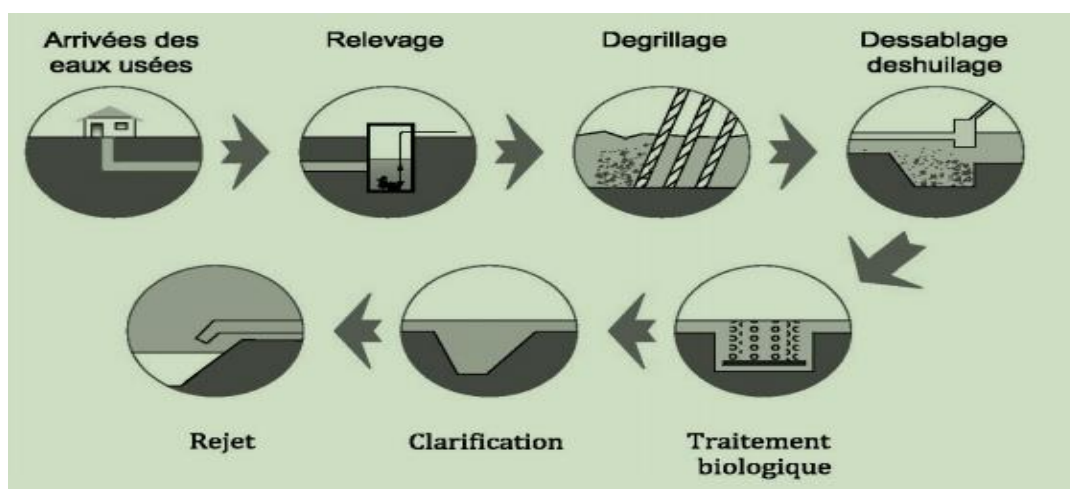


Figure I.2 : Schéma des étapes du traitement des eaux usées domestiques [22].

III.1. Prétraitement

Les dispositifs du prétraitement sont présents dans toutes les stations d'épuration, quels que soient les procédés mis en œuvre en aval. Le prétraitement comporte une succession d'opérations physiques ou mécaniques destinées à séparer les eaux usées des matières volumineuses, en suspension ou flottantes, qu'elles véhiculent [23].

Ces dispositifs consistent à éliminer les éléments les plus grossiers pouvant mettre en péril les équipements de la station ou bien altérer son fonctionnement par un certain nombre d'opérations mécaniques ou physiques. Ces opérations sont : le dégrillage, le dessablage et le déshuilage, à savoir :

- ❖ Le dégrillage : élimination des déchets volumineux ;
- ❖ Le dessablage : élimination des sables ;
- ❖ Le dégraissage – déshuilage : élimination des corps gras [21].

III.1.1. Le dégrillage

Le dégrillage est le premier poste de traitement indispensable sur les eaux usées de surface et les eaux résiduaires. Il permet de protéger la station contre l'arrivée de gros objets flottants afin d'éviter des bouchages dans les différentes unités de l'installation. Il s'agit de séparer les eaux brutes des matières les plus volumineuses [24]. L'installation de ce dispositif se compose : d'un canal, de la grille, du dégrilleur et d'une benne pour les déchets [13].

III.1.1.1. Caractéristiques générales d'une installation de dégrilleur

A. *Forme et position des barreaux*

La grille peut être droite ou courbe : Les grilles droites peuvent être placées en position verticale ou inclinées par rapport au plan horizontal : dans ce dernier cas, elles présentent au courant d'eau une plus grande surface [13].

B. *Espacement des barreaux*

L'espacement entre les barreaux permet de fixer la taille des déchets à éliminer ; pour cela, on distingue dans le tableau suivant trois types de dégrillage, en fonction de la taille des détritiques à éliminer [25].

Tableau I.5 : Les différents types de dégrillage.

Type de dégrillage	Espacement des barreaux
Pré-dégrillage	30 à 100mm
Dégrillage moyen	10 à 25 mm
Dégrillage fin	3 à 10mm

C. *Nettoyage et évacuation*

Pour éviter le colmatage de l'installation, une opération de nettoyage est obligatoire : Elle peut être manuelle dans le cas des petites stations, ou mécanique automatisée lorsque le volume des déchets à évacuer est important comme c'est le cas pour les grandes stations.

Les déchets extraits par le dispositif de nettoyage peuvent être évacués par bac amovible, bonde transporteuse ou visse d'Archimède [13].



Figure I.3 : Dégrilleurs droites de la nouvelle station d'épuration de la ville de Timimoune.
Photo prise par moi-même.

III.1.2. Le dessablage

La seconde étape du prétraitement, est opérée au niveau du dessableur. Cet ouvrage se résume en un bassin qui est conçu de telle sorte que la vitesse d'écoulement horizontal soit aussi faible pour permettre le piégeage des matériaux denses ($d > 2$) et de taille grenue (diamètre $D > 0.2$ à 0.25 mm, voire à 0.5 mm), c'est à dire essentiellement des particules minérales type graviers et sables. Cependant, il est inévitable qu'une petite proportion de matière organique soit retenue au niveau de ces matériaux, ce qui engendre des problèmes de fermentation en anoxie au fond du bassin, aussi des procédés de lavage de sable sont-ils souvent mis en œuvre [30].

On distingue plusieurs types de dessableurs suivant la géométrie des bassins ou la circulation du fluide [13] :

A. Dessableurs canaux gravitaires

Une particule arrivant en surface sera captée si elle atteint le fond du dessableur avant de pénétrer dans la zone de sortie. On citera :

- ❖ les dessableurs à couloir (canal de dessablage) ;
- ❖ les dessableurs à insufflation d'air ou dessableurs aérés.

B. Dessableurs à effet hydrodynamique

Dans ce type de dessableurs on distingue :

- ❖ les dessableurs circulaires : les sables sont projetés vers la paroi et descendent en décrivant une spirale d'axe vertical.
- ❖ les dessableurs centrifuges ou hydrocyclones : dans ces dessableurs coniques ou cylindriques, l'admission tangentielle de l'eau sous fort courant projette les sables vers la paroi.

Remarque : Le volume de sable recueilli dans les dessableurs varie entre 5 et 12 l/ hab.an.

III.1.3. Dégraissage-déshuilage

Le dégraissage-déshuilage est la dernière étape du prétraitement. L'objectif de cette étape est de retenir les graisses et les huiles (particules de densité plus faible que l'eau), afin d'assurer le bon fonctionnement des étapes ultérieures. En effet, ces éléments peuvent former en zone calme une couche fine (souvent irisée) en surface qui réduit les échanges gazeux eau-atmosphère. Cette opération de séparation est également essentielle pour protéger les installations sensibles situées à l'aval (dans les stations d'épuration, les corps gras peuvent former des émulsions perturbant notamment les écoulements) [30].

Il existe différents types de bassins de déshuilage- dégraissage conçus suivant la qualité de et la concentration de l'effluent en graisses et huiles [31]. On distingue :

- ❖ Les séparateurs statiques ;
- ❖ Les dégraisseur-déshuileur aérés ;
- ❖ Le déshuileur longitudinal.

III.2. Traitement biologique

D'une façon globale, l'épuration des eaux résiduaires domestiques des petites localités, ne requière pas de traitement physicochimique (traitement primaire), du fait de la biodégradabilité des effluents. Et donc, seul le traitement biologique est préconisé dans de telles situations.

Le traitement biologique permettra la dégradation des polluants grâce à l'action de micro-organismes. Ce processus existe spontanément dans les milieux naturels tels que les eaux superficielles suffisamment aérées. Une multitude d'organismes sont associés à cette dégradation selon différents cycles de transformation. Parmi ces organismes, on trouve généralement des bactéries, des algues, des champignons et des protozoaires. Cette microflore, extrêmement riche, peut s'adapter à divers types de polluants qu'elle consomme sous forme de nourriture (substrats). Il est ainsi possible d'utiliser systématiquement cette microflore dans un processus contrôlé pour réaliser l'épuration des eaux résiduaires [30].

La pollution des eaux résiduaires urbaines et industrielles peut se caractériser selon son état (solide, colloïdal ou en suspension) et sa nature (minérale ou organique).

Le principe de ce traitement est de mettre en contact la matière organique contenue dans les eaux usées avec une population bactérienne. En outre, les procédés de traitement secondaires sont fondés sur la digestion microbienne à la fois en présence ou en absence d'oxygène pour réduire la concentration en matières organiques [34].

Suivant les conditions de l'environnement des cellules dans l'unité de dépollution, on distingue deux modes de traitement :

- Le traitement aérobie : Ce type de traitement fait appel aux bactéries aérobies qui se développent en présence d'oxygène. La dégradation des polluants est effectuée par des réactions d'oxydation dans un milieu aéré [35].

- Le traitement anaérobie : Ce traitement s'effectue en condition d'anaérobiose c'est-à-dire en absence d'oxygène. Les bactéries anaérobies assurent la décomposition métabolique des composés biodégradables par des processus de fermentation [35].

Les traitements aérobies sont les plus répandus, les traitements anaérobies restant réservés, aux cas de pollution fortement concentrée pour laquelle l'apport d'O₂ en quantité suffisante pose un problème [32]. D'emblée on peut rappeler que les systèmes de traitement anaérobie sont réputés plus économiques que les systèmes aérobies du fait de l'économie d'énergie, de la faible production des boues, et la possibilité de réutiliser le biogaz produit, qui est converti parfois en énergie électrique ou mécanique [34].

III.2.1. La biomasse épuratrice

Suivant l'emplacement des bactéries épuratrices dans le bio-réacteur, on distingue deux types [34] :

- Procédés par cultures fixées : Utilisent un matériau support fixe (lits bactériens) ou des éléments rotatifs (disques biologiques) sur lesquels se développent des cultures bactériennes.
- Procédés par cultures libres : reposent sur le développement d'une culture bactérienne. Cette dernière est maintenue en suspension dans l'eau à traiter. Les cultures libres peuvent être mises en œuvre de manière extensive (lagunage naturel) ou intensive (lagunage aérée, boues activées).

III.2.1.1. Procédés par cultures fixées

A. Lit bactérien

A.1. Description

Le lit bactérien, quelque fois appelé filtre bactérien ou filtre percolateur, par analogie au terme anglais «biofilter», est le plus ancien procédé biologique. Des bactéries sont cultivées sur un substrat neutre, comme de la pierre concassée, de la pouzzolane (sable volcanique), du mâchefer ou du plastique. On fait passer l'effluent sur le substrat. La difficulté consiste à trouver la bonne vitesse du flux d'eau, qui ne doit pas être trop rapide (pour permettre la dégradation bactérienne) ni trop lent (pour une bonne évacuation des MES en excès) [34].

Il est indispensable d'avoir un décanteur-digester afin de limiter le colmatage du matériau dans les supports et aussi de limiter l'accumulation de dépôts dans les ouvrages et de garantir la stabilisation des boues primaires piégées et des boues biologiques en excès.

L'efficacité d'un tel réacteur va dépendre de la surface d'échange disponible, classiquement les valeurs rencontrées varient de 50 à 200 m² /m³. Les rendements d'épuration sur lit bactérien peuvent atteindre 85 à 95 % [36].

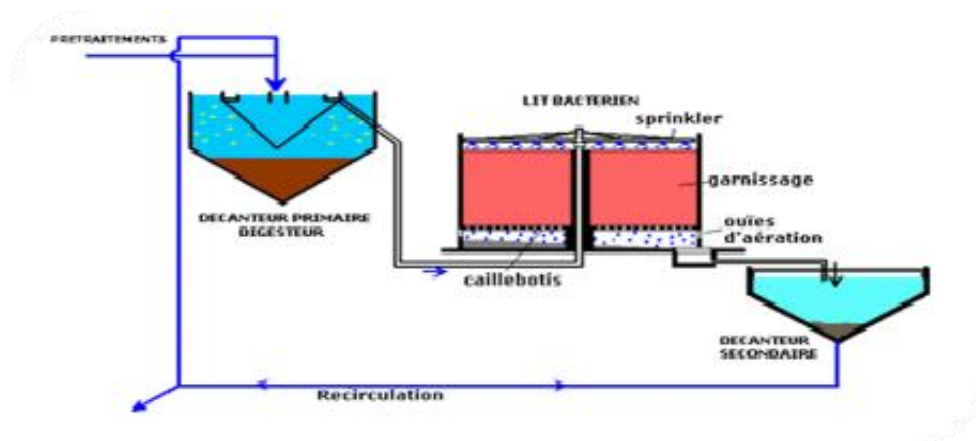


Figure I.4 : Schéma de fonctionnement de lit bactérien [81].

Cette filière de traitement était très prisée dans les années 60 et début des années 70. L'arrivée des filières à boues activées a considérablement freiné son développement. Actuellement, ce système est remis au goût du jour grâce à un coût énergétique faible et une exploitation facile, qui est nettement moins complexe que celle de la technique à boue activée classique [37].

A.2. *Domaine d'application recommandé*

Cette filière est adaptée pour les petites collectivités avec des charges de pollution à traiter comprises entre 200 et 2000 EH (Equivalents Habitants). Sur les unités les plus importantes, il peut-être plus économique de répartir le traitement sur deux étages de lits bactériens en série [36].

A.3. *Matériaux utilisés dans le lit bactérien*

Le garnissage du lit bactérien peut être [38] :

- Plastique : disque, anneaux ou toutes formes en PVC ou PE. La surface développée est de 150 à 200 m² /m³ avec un indice de vide de 90 %.
- Traditionnel : pouzzolane, cailloux (40 – 80 mm), briques creuses, terre cuite, gravier (80 - 120 mm) avec un indice de vide de 50 %.

Suivant la nature du matériau du support (ou garnissage), on distingue [39] :

❖ **Les lits bactériens à remplissage traditionnel (minéral)**

Les matériaux les plus utilisés sont la pouzzolane ou les cailloux siliceux concassés dont la taille minimale est de 40 mm et la taille maximale est 80 mm, présentant un taux de vide de l'ordre de 50%. La hauteur maximale de remplissage est de 2,5 m... Pour ce type de lit bactérien, une charge hydraulique maximale de 1,2 m³ /m² .h, permet d'atteindre des rendements supérieurs à 85% lors du traitement d'eaux usées domestiques.

❖ **Les lits bactériens à remplissage en plastique**

Ces matériaux plastiques mis en œuvre en vrac ou ordonnés présentent des taux de vide supérieurs à 90%. Ils nécessitent une hauteur minimale de remplissage de 4 m environ.

Les remplissages en plastiques permettent de réduire considérablement les risques de colmatage et présentent un coefficient de transfert d'oxygène plus élevé que ceux au remplissage traditionnel. Ce type de lit bactérien est destiné souvent pour les eaux usées industrielles. Les charges hydrauliques appliquées sont alors plus élevées et peuvent atteindre ($10 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{h}$).

Tableau I.6 : Caractéristiques de certains garnissages.

Matériaux de garnissage	Densité (Kg/m^3)	Surface spécifique (m^2/m^3)	Indice de vide (%)
Pouzzolane	600	105	50
Galets	1600	90	50
Plastique vrac	40-80	95-200	95
Plastique ordonné	30-90	90-200	90

Source : (A.EN-NAWAOU, 2009) [40].

A.4. Facteurs affectant la performance des lits bactériens

Il existe plusieurs facteurs qui influencent le niveau de performance des lits bactériens. Parmi lesquels :

- les matériaux de remplissage ;
- la recirculation ;
- l'aération ;
- la température [41].

A.5. Répartition de l'effluent

Elle se fait à l'aide d'un sprinkler à 2, 4 ou 6 bras radiaux selon la taille de l'installation [40].

A.6. Nécessité

- ✓ Le système doit être précédé d'une décantation primaire ;
- ✓ L'appareillage comporte un dispositif d'arrosage au-dessus du lit, des dispositifs de drainage et d'aération sous le lit ;
- ✓ L'accompagnement d'un décanteur secondaire dans et, le cas des forte charge (eaux usées fortement polluées), d'une conduite permettant le recyclage d'une fraction des eaux décantées [36].

A.7. Le recyclage

Dans la plupart des installations, l'effluent traité subit un retour en tête du lit bactérien. Cette opération est appelée recyclage, ou parfois « recirculation ». Le rapport entre le débit recyclé et le débit de l'effluent est appelé taux de recyclage. Dans les lits bactériens à remplissage traditionnel, le recyclage pourrait améliorer les performances d'élimination de la DBO. Avec les matériaux plastiques, le recyclage permet d'augmenter la charge hydraulique, ce qui améliore le mouillage du matériau [36].

A.8. Paramètres de conception

Les paramètres de conception d'un lit bactérien sont déterminés dans le tableau suivant :

Tableau I.7 : Paramètres de conception d'un lit bactérien [13].

Paramètres	Variables	Equations	N°
La charge en DBO (la charge volumique)	C_v : la charge en DBO (g/m ³). Q : débit de l'eau usée en m ³ /j. DBO : DBO de l'eau brute après décantation primaire en mg/l. V : volume du milieu filtrant en m ³ .	$C_v(g/m^3) = \frac{Q * DBO}{V}$	(I.9)
La charge hydraulique	Q : débit de l'eau usée en m ³ /j. Q_R : débit de recirculation en m ³ /j.	$CH = \frac{Q + Q_R}{S}$	(I.10)
Le taux de recirculation	V : volume (m ³). H : la hauteur d'eau dans le dessableur (m).	$R = \frac{Q_R}{Q}$	(I.11)
L'efficacité d'élimination	S₀ : la DBO ₅ à l'entrée du lit bactérien. S : la DBO ₅ obtenue après traitement à la sortie.	$E = \frac{S_0 - S}{S}$	(I.12)

On classe les lits bactériens selon les charges hydrauliques et les charges organiques qui leur sont appliquées :

Tableau I.8 : Classement des lits bactériens selon les charges hydrauliques/organiques [13].

	Faible charge	Forte charge	Procédé à deux étages de filtration
Charge hydraulique m ³ /m ² .j	1 à 4	10 à 20	10 à 30
Charge organique kg/m ³ .j	0,1 à 0,4	0,5 à 1,5	0,7 à 1,1
Recyclage (R)	nul	0,5 à 3	0,5 à 4

A.9. Dysfonctionnement

Les principaux dysfonctionnements de cet ouvrage sont [42] :

- les odeurs ;
- Perte de qualité sur l'effluent traité avec présence de matières en suspension ;
- Colmatage du support bactérien ou des systèmes de distribution ;
- Engorgement rapide des filtres en hiver n'entraînant pas de perte de qualité de l'effluent traité ;
- Gel en surface du lit ;
- Formation de mousses en surface du lit.

B. Disque biologique

B.1. Définition

C'est un procédé qui consiste à développer une biomasse épuratrice fixée dans des conditions aérobies. Les supports de la microflore épuratrice sont des disques partiellement immergés dans l'effluent à traiter et animés d'un mouvement de rotation qui assure à la fois le mélange et l'aération. Cette filière d'épuration est adaptée aux petites et moyennes collectivités [42], [43].

B.2. Principe de fonctionnement

Un disque biologique (ou bio-disque) est un ensemble des disques assemblés sur un même axe. Cet axe est fixé au-dessus d'une cuve, dans laquelle passe le liquide à traiter. Entraîné par un moteur, cet axe induit la rotation des disques. Sur ces derniers, se fixent sans ensemencement préalable des bactéries et leurs prédateurs immédiats qui forment la zooglyée, appelée aussi gazon biologique ou encore biomasse fixée [44].

Ces disques sont immergés à 40% approximativement dans un bassin recevant l'eau à traiter. Ils ont un diamètre de 1 à 3m, sont suffisamment espacés de manière à ce que l'eau puisse circuler librement. Lorsqu'ils subissent une rotation autour de leur axe (à une vitesse de 1 à 2 tr/min), les parties submergées entrent en contact avec l'air.

Le film biologique qui recouvre les disques est alternativement en contact avec l'eau usée et l'air. Ceci est analogue à ce qui se passe dans un lit bactérien alimenté par sprinkler (distributeur rotatif). L'excès de biomasse se détache des disques et est évacué avec l'effluent puis décanté [13].

Un prétraitement par décantation et digestion anaérobie doit être mis en œuvre, afin de limiter les risques de colmatage et le coût du traitement principal. Enfin les boues produites sont séparées de l'eau épurée et récupérées dans un clarificateur secondaire [42].

La filière « classique » est constituée d'un ou plusieurs prétraitements, d'une ou plusieurs batteries de disques ainsi que d'un ou plusieurs clarificateurs [43]. Il existe des variantes à cette filière «classique» :

- Un décanteur-digester peut être remplacé par un dessableur-degraisseur et/ou un tamis rotatif et/ou une fosse toutes eaux ;
- Un clarificateur peut être remplacé par un décanteur lamellaire ou par des lits de clarification-séchage plantés de roseaux.

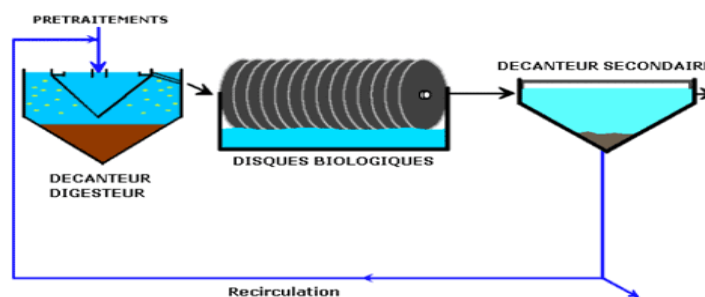


Figure I.5 : Schéma de fonctionnement de disque biologique [82].

Il convient, sur ce type d'installation, de s'assurer :

- ✓ de la fiabilité mécanique de l'armature (entraînement à démarrage progressif, bonne fixation du support sur l'axe) ;
- ✓ du dimensionnement de la surface des disques (celui-ci doit être réalisé avec des marges de sécurité importantes) [45].

B.3. Qualité attendue des eaux traitées

Au niveau des eaux de rejet, la qualité attendue est [46] :

- $DBO_5 \leq 25$ à 35 mg/l
- $MES \leq 30$ mg/l
- $DCO \leq 90$ à 125 mg/l
- $NGL : 50$ mgN/l
- $NTK : 15$ mgN/l (si dimensionnement spécifique).
- P_{total} : efficacité médiocre de l'ordre 25% (traitement additionnel par injection de sel de fer envisageable).

B.4. Indice de fonctionnement des disques biologiques

Tableau I.9 : Tableau d'indications des disques biologiques [43].

Couleur	Fonctionnement	Origine du problème	Solution de remédiation
Marron foncé	Normal	-	-
Marron clair (très clair)	Sous-charge	Sous-charge	Réduire le nombre de files alimentées (afin d'augmenter la charge)
Blanc/ gris	Anormal	Effluent septique Manque d'oxygène	Réduire la septicité de l'effluent entrant Améliorer la ventilation des DB
Noir	Anormal : fermentation	Manque d'oxygène	Réduire la septicité de l'effluent entrant Améliorer la ventilation des DB
Absence de coloration	Anormal : absence de biomasse	Pollution chimique A-coup hydraulique important	Étude du système de collecte Convention de raccordement

C. Avantages et inconvénients des procédés par cultures fixées**Tableau I.10 : Avantages/Inconvénients des procédés par cultures fixées [46].**

Procédé	Avantages	Inconvénients
Lit bactérien	<ul style="list-style-type: none"> - Occupation au sol relativement faible ; - Entretien simple mais régulier ; - Bonne résistance aux surcharges hydrauliques organiques passagères ; - Faible consommation en énergie ; - Boue bien épaissies par décanteur-digesteur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût investissement assez élevés ; - Risques d'odeurs ; - Sensibilité au froid et au colmatage ; - Source de développement d'insectes ; - Boues fermentescibles.
Disque biologique	<ul style="list-style-type: none"> - L'exploitation de ce procédé est relativement simple ne nécessitant pas le recyclage ; - Généralement adaptés pour les petites collectivités ; - Faible consommation d'énergie ; - Gestion des boues facilitée dans le cas d'une combinaison avec des lits plantés de roseaux ; - Résistance au froid (les disques sont toujours protégés par des capots ou par un petit bâtiment). 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessité d'un personnel ayant des compétences en électromécanique ; - Abattement limité de l'azote en dimensionnement classique ; - Sensibilité au colmatage ; - Nécessité de prétraitements efficaces ; - Très grande sensibilité aux coupures d'électricité prolongées qui entraînent un déséquilibre de la batterie de disque (la moitié de la surface n'étant plus immergée pendant la panne).

III.2.1.2. Procédés par cultures libres**A. Le lagunage**

Le lagunage est un procédé d'épuration biologique extensif qui consiste à faire circuler des effluents dans une série de bassins dans un temps suffisamment long pour réaliser les processus naturels de l'auto-épuration. Il est pratiqué, généralement, dans des régions très ensoleillées, à l'air libre et dans des bassins de faible profondeur.

Le rayonnement solaire est la source d'énergie qui permet la production et l'activation des matières organiques par les chaînes trophiques. Les substances nutritives sont apportées par l'effluent alors que les végétaux sont les producteurs du système en matière consommables et en oxygène.

Les bactéries assurent la part prépondérante de l'épuration et la microfaune contribue à l'éclaircissement du milieu par ingestion directe des populations algales et des bactéries [33].

Il existe plusieurs types de lagunage : naturel lorsque l'aération est uniquement due au batillage, et aéré lorsque l'aération est forcée par des aérateurs de surface. Généralement un

ensemble lagunaire de traitement des eaux est un ensemble de 3 bassins dont le premier, le plus grand, assure le principal du traitement, les deux autres assurant l'affinage. Les temps de séjour varient d'une vingtaine de jours pour les lagunes aérées à 3 mois pour les lagunes naturelles.

C'est la méthode de traitement la plus commune lorsque on dispose de grandes surfaces de terrain, et en extension tant sur le plan technique que scientifique. Le lagunage est très utilisé dans de nombreux pays, notamment les pays en voie de développement (et particulièrement bien adapté aux petites collectivités rurales) [36].

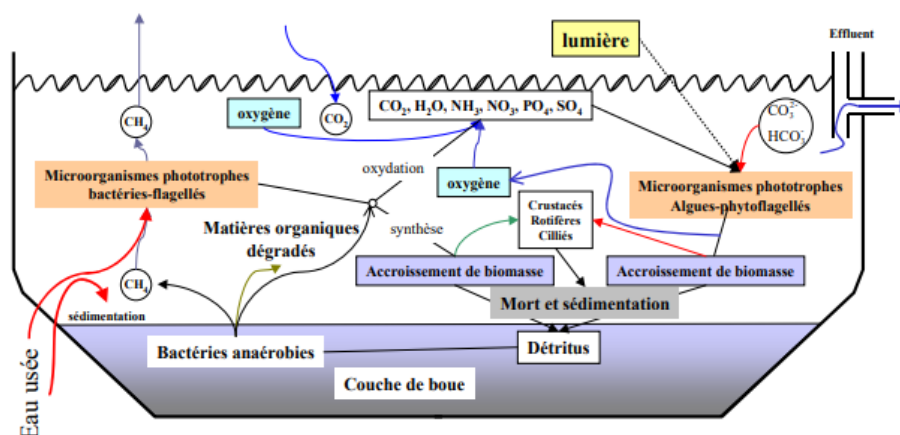


Figure I.6 : Les cycles biologiques d'une lagune [33].

➤ Performance de lagunage

Le lagunage se caractérise essentiellement par un temps de séjour très élevé des effluents, plusieurs dizaines de jours, et par des mécanismes de fonctionnement biologique fortement liés à la température et aux saisons. Ce caractère spécifique rend l'évaluation des performances de ce procédé sensiblement différent de celui des procédés conventionnels [33].

A.1. Lagunage naturel

Le lagunage naturel est constitué des grands plans d'eau artificiels imperméabilisés. Elles sont remplies d'eau usée qui est alors traitée par des processus naturels. Les bassins peuvent être utilisés individuellement, ou être reliés en série pour l'amélioration du traitement. Il y a trois types de bassins, (1) anaérobie, (2) facultatif et (3) aérobie (maturation), chacun avec un traitement et des caractéristiques de conception différentes [47]. Celle-ci peut, le cas échéant être remplacée ou suivie par une lagune à haut rendement.

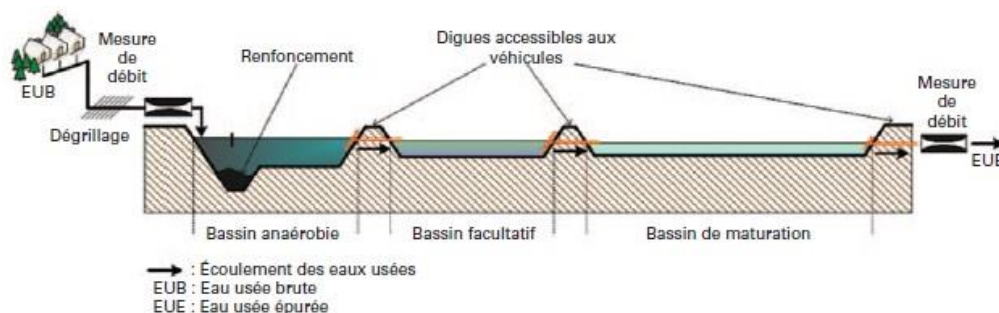


Figure I.7 : Principe de la filière lagunage naturel [48].

(Source : Technique de l'ingénieur, 2014).

➤ Principe de fonctionnement

Le premier bassin est anaérobie (absence d'oxygène) ; il reçoit des charges de pollution relativement élevées qui sont exprimées en Demande Biochimique en Oxygène (DBO) par unité de volume. Celle-ci est réduite par sédimentation et digestion anaérobie à des profondeurs de 2 à 5 mètres en un temps de séjour court (un jour et plus). Des bulles apparaissent ainsi à la surface du bassin avec dégagement de biogaz (gaz composé de 70% méthane et 30 % de dioxyde de carbone). Ce processus est particulièrement actif pour des températures supérieures à 15°C et a l'avantage de réduire près de 60% de la charge en DBO initiale. En plus, ce type de bassin, placé en tête du traitement, permet d'économiser la surface totale requise pour l'épuration.

En aval du bassin anaérobie, se trouve un bassin de grande dimension, dit bassin facultatif. Dans ce dernier, les microorganismes hétérotrophes aérobies colonisent la tranche d'eau supérieure et dans les dépôts de sédiments on assiste à la prolifération de bactéries anaérobies. A la surface du bassin, la DBO est oxydée par les bactéries aérobies, l'oxygène qui leur est nécessaire est fourni par les échanges gazeux entre l'eau et l'atmosphère ainsi que par l'activité photosynthétique des microalgues : utilisant le dioxyde de carbone (CO₂) produit par les bactéries qu'elles convertissent en hydrates de carbone. Toutefois, pour préserver les conditions d'aérobiose, la charge de pollution entrante ne devra pas être trop élevée, de même que la profondeur ne devrait pas dépasser les 2 mètres.

Enfin, les bassins de maturation reçoivent les effluents du bassin facultatif ; ce sont des bassins entièrement aérobies et de profondeur relativement faible (1 à 1,5 mètre la limite de pénétration de la lumière) [49].

➤ Dimensionnement

- 1) Bassins anaérobies : Le dimensionnement des bassins anaérobies se base principalement sur la charge volumique, alors que la charge surfacique n'est qu'un critère de vérification. Une valeur minimale de 1000 kg/ ha/ j est fixée pour que les conditions d'anaérobiose soient prépondérantes.
- 2) Bassins facultatifs : La charge surfacique constitue dans le cas des bassins facultatifs le critère de base pour le dimensionnement.
- 3) Bassins de maturation : Le dimensionnement des bassins de maturation est basé surtout sur l'élimination des germes pathogènes [50].

La taille et le nombre des bassins de maturation sont déterminés principalement par la qualité bactériologique requise des eaux épurées. L'usage de ces bassins est en général réservé aux applications de réutilisation agricole [50].

A.2. Lagunage aéré

Version intensive du lagunage, nécessitant une emprise nettement moindre que le lagunage naturel, le lagunage aéré consiste à intensifier l'activité aérobie par un brassage et une aération artificielle par des aérateurs mécaniques flottants ou fixes ou une insufflation d'air.

Les équilibres biologiques sont voisins de ceux du procédé classique par boues activées. Mais en l'absence de recirculation de biomasse dans le système, la concentration en microorganismes est faible et la décantation lente.

Appliqué en traitement complet ou en traitement secondaire après un lagunage anaérobie, cette technique est adaptée pour des effluents concentrés domestiques et industriels. On privilégie aujourd'hui le lagunage « aéré facultatif » avec une phase d'aération organisée en plusieurs cellules en série.

Les puissances avoisinent $2 \text{ à } 3 \text{ Watts} \cdot \text{m}^{-3}$, les boues sédimentent dans les bassins aérés et subissent une dégradation en partie anaérobie.

Dans cette filière d'épuration on peut distinguer deux types de bassins qui sont conçus pour améliorer la croissance des écosystèmes naturels : un bassin d'aération et un autre de décantation. On peut y ajouter un bassin de finition pour affiner le traitement [51].

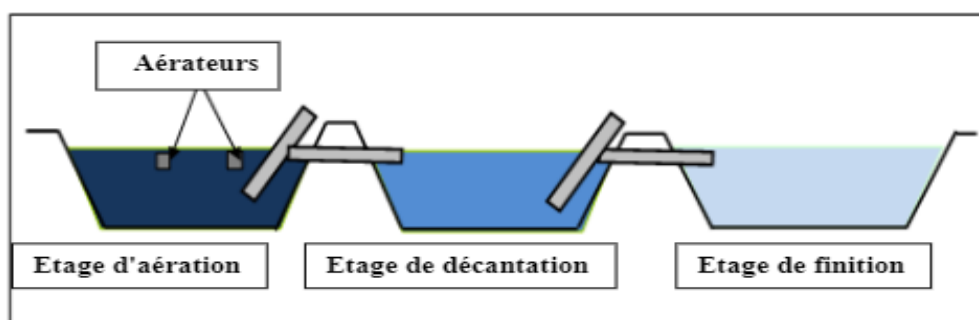


Figure I.8 : Principe de la filière lagunage aérée [51].

➤ Principe de fonctionnement

Le lagunage aéré est une technique d'épuration biologique par culture libre avec un apport artificiel d'oxygène.

Dans l'étage d'aération, les eaux usées sont dégradées par des micro-organismes qui consomment et assimilent les nutriments. Le principe de base est le même que celui des boues activées avec une densité de bactéries faible et l'absence de recirculation.

L'oxygénation est assurée par un aérateur de surface ou une insufflation d'air. La consommation électrique de chacun de ces deux procédés est similaire à celle d'une boue activée.

Dans l'étage de décantation, assuré principalement par une ou deux simples lagunes, les matières en suspensions (amas de microorganismes et de particules piégées) s'agglomèrent lentement sous forme de boues. Ces dernières doivent être régulièrement extraites [52].

➤ Formes de lagunage aéré

Il existe deux formes de lagunage aéré :

- le lagunage aéré strictement aérobie : il faut une aération suffisante pour maintenir le bassin en aérobose et l'ensemble des particules en suspension.
- le lagunage aéré aérobie/anaérobie facultatif : il y a formation de dépôt qui évolue en milieu anaérobie.

Le premier cas est très peu utilisé car il est grand consommateur d'énergie. La seconde solution est rencontrée plus fréquemment : elle s'apparente au lagunage naturel par l'épuration des eaux usées par échange eau/sédiment [52].

➤ Dimensionnement

Le dimensionnement des lagunes aérées de traitement d'eaux résiduaires se calcule au moyen de la charge volumique et du temps de séjour. Il doit considérer une charge volumique en $DBO_5 \leq 25 \text{ g/m}^3 \text{ jour}$ correspondant à un volume spécifique $\geq 2,4 \text{ m}^3/\text{EH}$. En phase d'aération, même avec un apport important d'eaux étrangères, le temps de séjour ne doit pas être inférieur à 5 jours. D'autre part, le besoin spécifique brut en oxygène pour dégrader les substances polluantes est basé à $1,5 \text{ kg O}_2/\text{kg DBO}_5$. En pratique, suivant les études, on atteint de bons résultats en disposant les aérateurs dans la lagune primaire de telle sorte que l'ensemble de l'apport d'oxygène s'effectue dans la zone la plus chargée. Concernant la circulation et l'homogénéisation, une puissance volumique de $1 \text{ à } 3 \text{ W/m}^3$ est nécessaire. La puissance varie en fonction du système d'aération et de la forme du bassin. Il est conseillé de fractionner le volume à aérer. La première étape correspondant à 60 % et la seconde de 40 % du volume total. Cette solution est plus efficace qu'en abaissant la charge volumique.

Les installations à une seule étape aérée sont réalisables dans le cas d'un nombre de raccordements réduits et alimentés par un réseau unitaire. Dans ce cas précis, la charge volumique à considérer ne dépasse pas $20 \text{ g DBO}_5/\text{m}^3 \text{ jour}$. Le temps de séjour en bassins de finition varie de 1 à 2 jours, correspondant à un volume spécifique de $0,3 \text{ à } 0,5 \text{ m}^3/\text{EH}$. En station équipée d'une seule lagune aérée, il faut dimensionner d'une manière un peu plus importante le bassin de finition. À noter que le temps de séjour trop long en bassin de finition peut favoriser la prolifération d'algues [83].

B. Boues activées

Le procédé dit à "boues activées" est basé sur une culture bactériologiquement très active mélangée avec des eaux usées, qui assure la dégradation aérobie de la matière organique, dans le bassin d'aération. La biomasse ainsi formée constituant la phase solide est éliminée par décantation dans le décanteur secondaire [45].

Ce procédé de traitement est dit « à boues activées » car l'ensemble des conditions favorables à une activité maximale des bactéries est mis en œuvre : un apport en oxygène suffisant, un apport en nutriment si l'effluent ne contient pas tous les composés nécessaires au développement des bactéries, une agitation permanente afin de favoriser le contact entre bactéries et pollution, une concentration élevée en bactérie pour augmenter l'efficacité du traitement. La chaîne de traitement est composée d'un bioréacteur, d'un clarificateur et d'une boucle de recyclage des boues [53]. Comme ce procédé n'est pas adapté aux petites localités, il serait vain de le détailler plus.

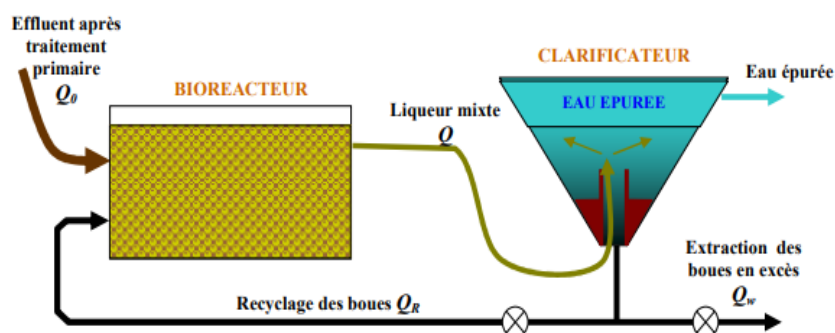


Figure I.9 : Schéma de principe de traitement par boue activée [53].

C. Avantages et inconvénients des procédés par cultures libres

Tableau I.11 : Avantages/Inconvénients des procédés par cultures libres [45].

Procédé	Avantages	Inconvénients
Lagunage naturel	<ul style="list-style-type: none"> - Un apport d'énergie n'est pas nécessaire si le dénivelé est favorable ; - Élimine une grande partie des nutriments : phosphore et azote (en été) ; - S'adapte bien aux fortes variations de charge hydraulique ; - Absence de nuisance sonore ; - Les boues de curage sont bien stabilisées sauf celles présentes en tête du premier bassin. 	<ul style="list-style-type: none"> - Forte emprise au sol (10 à 15 m² /EH) ; - Coût d'investissement très dépendant de la nature du sous-sol. Dans un terrain sableux ou instable, il est préférable de ne pas se tourner vers ce type de lagune ; - Qualité du rejet variable selon les saisons ; - La maîtrise de l'équilibre biologique et des processus épuratoires reste limitée.
Lagunage aéré	<ul style="list-style-type: none"> - Tolérant aux variations de charges hydrauliques et/ou organiques importantes ; - Tolérant aux effluents très concentrés ; - Tolérant aux effluents déséquilibrés en nutriments (cause de foisonnement filamenteux en boues activées) ; - Boues stabilisées. 	<ul style="list-style-type: none"> - Rejet d'une qualité moyenne sur tous les paramètres ; - Présence de matériels électromécaniques nécessitant l'entretien par un agent spécialisé ; - Nuisances sonores liées à la présence de système d'aération ; - Forte consommation énergétique.
Boue activée	<ul style="list-style-type: none"> - Adaptée pour toute taille de collectivité (sauf les très petites) ; - Bonne élimination de l'ensemble des paramètres de pollution (MES, DCO, DBO5, N par nitrification et dénitrification) ; - Adapté pour la protection de milieux récepteurs sensibles ; - Facilité de mise en œuvre d'une déphosphatation simultanée. 	<ul style="list-style-type: none"> - coûts d'investissement assez importants ; - consommation énergétique importante ; - Nécessité de personnel qualifié et d'une surveillance régulière ; - Sensibilité aux surcharges hydrauliques ; - Décantabilité des boues pas toujours aisées à maîtriser ;

III.3. Traitement des boues

Les objectifs du traitement des boues sont multiples, Le premier objectif du traitement des boues sera donc de diminuer la teneur en eau contenue dans les boues, dans le but de réduire leur volume tout au long de la filière. Le deuxième objectif est la stabilisation de la matière organique, dans le but de réduire les nuisances olfactives engendrées lors de leur valorisation. Les boues étant aussi composées d'agents pathogènes, le dernier objectif du traitement des boues est leur hygiénisation qui passe par la réduction de ces micro-organismes [54].

En ce qui concerne l'épuration des eaux résiduaires domestiques des petites localités, elle n'engendre que les boues secondaires, qui sont issues de procédés biologiques aérobies ou anaérobies. Ces boues sont constituées essentiellement de cellules microbiennes. Elles sont très organiques (50 à 80 % de MO dans la matière sèche) et contiennent très peu de matière sèche (0,5 à 2 % dans la matière brute). Ce qui leur assure, plutôt un rôle de fertilisation des terres agricoles par épandage.

Le traitement de type de boues est constitué de deux phases généralement. La première est l'épaississement, et la seconde est le séchage à l'air libre.

- L'épaississement

Le but de la phase d'épaississement est de réduire une première fois la teneur en eau des boues et ainsi de diminuer leur volume par l'intermédiaire de procédés généralement peu gourmands en énergie et/ou en réactifs. Cette phase sera plus ou moins efficace suivant le traitement qui sera appliqué aux boues [56]. L'épaississement peut se faire simplement par voie gravitaire dans un silo, le plus souvent.

- La déshydratation

La déshydratation permet de réduire la teneur en eau des boues de façon plus poussée que l'épaississement. A la sortie de cette étape, les boues obtenues deviennent pâteuses à solides. Il existe deux types de déshydratation : la déshydratation mécanique et la déshydratation naturelle [54]. La déshydratation mécanique reste peu employée dans les petites collectivités en raison du coût et des contraintes qu'elle génère (conditionnement des boues, réglages, ...) [55]. La technique la plus utilisée pour la déshydratation naturelle est celle des lits de séchage plantés de roseaux ou non.

III.3.1. Lits de séchages plantés de roseaux

III.3.1.1. Principe de fonctionnement

Le traitement des boues sur LSPR (lits de séchage plantés de roseaux) repose sur un traitement aérobic de la boue avec pour objectifs une déshydratation et une minéralisation des boues. Ainsi, le volume de boues est réduit et elles sont stabilisées. Ce mode de traitement des boues est adapté aux petites stations et petits volumes de boues à sécher, car il nécessite beaucoup de surface.

Les différents lits sont alimentés avec les boues liquides par alternance. Les graviers et sables, associés aux racines des roseaux, filtrent et assèchent les boues : l'eau s'écoule le long des racines et les boues sont retenues en surface. Les micro-organismes, présents dans le massif filtrant, dégradent la matière organique [84].

La déshydratation par lits plantés de roseaux est plus simple car elle nécessite peu d'équipements mécaniques. Toutefois, l'exploitation de ces systèmes exige une surveillance rigoureuse et plus qu'une forte technicité, demande un savoir-faire qu'il faut acquérir. D'un point de vue environnemental, cette technique fonctionne sans apport de réactifs et consomme très peu d'énergie. Enfin, ce système permet de stocker sur site les boues à déshydrater avant leur évacuation. Ce stockage sera plus ou moins long en fonction des quantités traitées par rapport à la capacité de l'installation (taux de charge) [57].

III.3.1.2. Avantages et inconvénients du LSPR

Cette technique intéresse de plus en plus les petites collectivités car elle présente les avantages suivants [55], [57] :

- Coûts exploitation réduits par rapport aux systèmes mécaniques classiques.
- Une réduction importante du volume des boues stockées de par l'activité drainante et minéralisatrice du milieu.
- Stockage des boues sur plusieurs années.
- Pas d'odeurs générées si les lits fonctionnent correctement.
- Exploitation nécessitant peu de technicité.
- Impact environnemental réduit par rapport aux systèmes mécaniques classiques (conception impliquant sans doute moins de nuisances environnementales globales, faible consommation d'énergie, pas de réactifs nécessaires, ...).

La déshydratation par lits de séchage plantés de roseaux présente les inconvénients suivants [38], [42] :

- Emprise au sol plus importante qu'un système mécanique classique.
- Nuisances olfactives difficiles à contenir en cas de dysfonctionnement.
- Siccité moyenne par rapport au procédé mécanique. Cette siccité est variable selon les conditions climatiques (été/hiver).
- Les boues ne sont pas hygiénisées.
- Coût d'investissement non négligeable.
- Curage et évacuation des boues lourdes représentant des opérations lourdes.

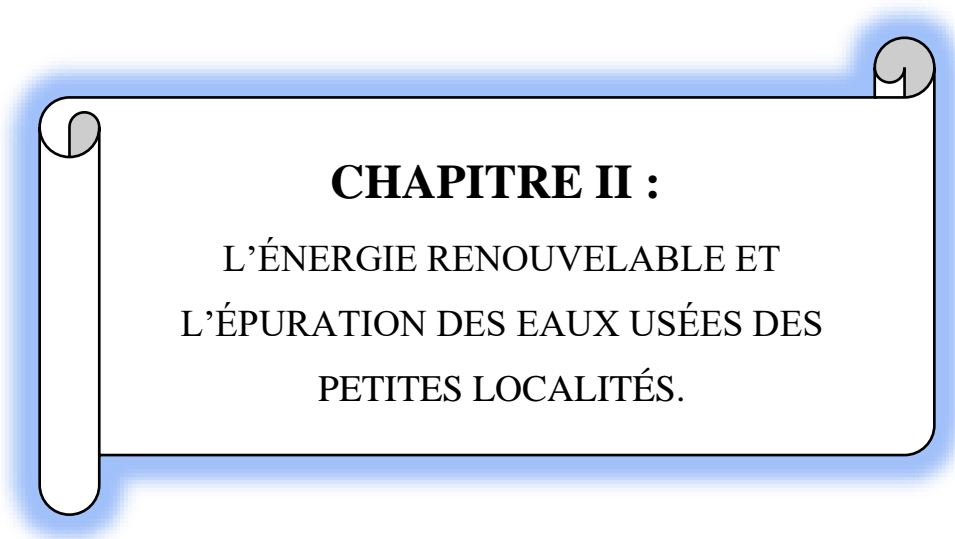
CONCLUSION

Le traitement des eaux usées domestiques dans les régions rurales est très important pour améliorer durablement la qualité de vie des populations et la protection de leur environnement.

Les petites collectivités rurales nécessitent un traitement différent des autres populations. Il doit être proportionnel à différentes contraintes techniques, économiques et sociales ...

Après une étude des différents procédés nous sommes arrivés à une conclusion qu'en ce qui concerne les petites localités, elles peuvent dotées de stations d'épuration de type : lagunage naturelle, lagunage aérée, à lit bactérien ou à disque biologique. Le choix de ces procédés est appuyé par le fait qu'ils fonctionnent avec peu d'énergie, et un coût de réalisation et d'exploitation relativement réduit, etc... Tout de même, nous pouvons rencontrer des désagréments tels que : l'emprise du sol, les odeurs olfactives ou la résistance au changement de température.

Finalement, l'objectif d'épuration diffère d'une station à l'autre, il peut être lié avec la relation de la station avec le domaine agricole, la présence de quelques ouvrages annexes tels que : les centre de stockage des boues, la présence d'un incinérateur, etc. Ces facteurs sont très importants pour la prise de décision.



CHAPITRE II :
L'ÉNERGIE RENOUVELABLE ET
L'ÉPURATION DES EAUX USÉES DES
PETITES LOCALITÉS.

INTRODUCTION

L'énergie est un élément indispensable dans notre vie quotidienne ; elle joue un rôle essentiel dans l'évolution de la civilisation et au développement durable.

Ce dernier a comme but de créer un équilibre entre les zones urbaines et rurales en fournissant un environnement adéquat aux citoyens ruraux à travers la mise en œuvre des divers ouvrages de base (les stations de traitement et d'épuration des eaux usées ...) et surtout l'assurance de l'électricité.

D'autre part, il y a une inégalité extrême de la distribution de la consommation de l'énergie. Beaucoup de populations, spécialement dans les zones rurales isolées des pays en voie de développement, sont confrontées à des grands problèmes pour satisfaire leurs besoins énergétiques. Ceci est dû au non disponibilité des ressources, par manque de possibilité économiques ou technologiques.

Ces insuffisances des ressources d'énergies, créent, pour l'habitant rural, des obstacles dans son quotidien, dans le rendement de son travail, dans son accès aux loisirs, à l'information, à la santé et à l'hygiène. Désormais, avec la nouvelle politique mondiale concernant l'électrification à base des énergies renouvelables, les besoins des régions rurales en énergie peuvent être satisfaits durablement.

Dans ce deuxième chapitre, nous allons faire une comparaison entre les différents types d'énergies renouvelables et non renouvelables, afin de choisir l'énergie adéquate à notre chaîne d'épuration et nous finirons ce chapitre par quelques notions de dimensionnement de cette chaîne.

I. Les différentes sources de l'énergie

Les sources d'énergie se répartissent en deux grands segments : les matières premières et les phénomènes naturels. De manière générale, les premiers fournissent les énergies dites fossiles alors que les secondes fournissent les énergies dites renouvelables.

I.1. Les énergies fossiles : (non renouvelables)

I.1.1. Définition

Une énergie fossile est une énergie produite par la transformation de la matière organique trouvable en gisements souterrains. Le pétrole, le charbon et le gaz naturel sont les trois principaux acteurs, appelés « énergies fossiles » parce qu'elles ont mis des millions d'années à se former grâce à la décomposition de matière première [85]. Elles servent comme carburants ou combustibles mais sont également utilisées pour produire de l'électricité [86]. Elles sont des énergies à fortes émissions de gaz à effet de serre dans leurs combustion et donc polluantes pour l'environnement.

Certaines de ces énergies fossiles se sont retrouvées emprisonnées sous la forme liquide, très visqueuse, dans des formations géologiques, comme c'est le cas du pétrole. D'autres en revanche se sont transformées en roches fossiles, comme le charbon.

Ce sont des énergies non renouvelables puisqu'une fois utilisées, elles ne peuvent être reconstituées qu'à l'échelle des temps géologiques, C'est-à-dire que les ressources peuvent s'épuiser en cas d'exploitation trop intensive. Elles ne sont, par conséquent, que disponibles en quantité limitée, d'où la nécessité de trouver des façons alternatives d'utiliser l'énergie.

I.1.2. Les sources d'énergie fossile

I.1.2.1. Le pétrole

La formation des gisements de pétrole est un processus naturel qui a pris plusieurs millions d'années. Tous les gisements ne contiennent pas le même pétrole ; les caractéristiques des gisements et du pétrole qu'ils contiennent conditionnent les méthodes de valorisation de la ressource.

Le pétrole provient de la décomposition de végétaux et d'organismes marins, accumulés et enfouis sous la surface de la terre. Sa constitution est issue de la géologie sédimentaire d'un lieu et plus spécifiquement de la succession de trois phases : l'accumulation des matières organiques, la maturation en hydrocarbures et enfin la migration d'une partie de ces hydrocarbures et le piégeage de l'autre partie dans une roche poreuse et perméable si le piège est fermé [87]. Si la composition élémentaire globale des pétroles est relativement fixe, la structure chimique de leurs constituants varie plus largement, ce qui entraîne une grande diversité des propriétés physiques (densité, viscosité) ainsi que des teneurs très variables dans les différents types de produits obtenus par raffinage.

A. Avantages et inconvénients du pétrole

Tableau II.1 : Avantages / Inconvénients du pétrole [88].

Energie	Avantages	Inconvénients
Pétrole	<ul style="list-style-type: none"> - c'est une énergie disponible sur pratiquement tous les continents ; - Son transport est facile et peu coûteux par les bateaux ; - La chimie du pétrole est très riche. En effet, grâce au pétrole, on peut obtenir des gaz tels que le méthane, le propane et le butane, des carburants tels que l'essence, le kérosène et la fioule et des composés aromatiques ; - C'est la forme d'énergie liquide la plus concentrée disponible actuellement. 	<ul style="list-style-type: none"> - La recherche d'un nouveau gisement pétrolier c'est une activité de plus en plus difficile qui est très coûteuse ; - Son transport est à l'origine de nouveaux polluants, en particulier dès la « marée noire » ; - Comme pour le charbon, sa combustion produit du dioxyde de carbone, qui est libéré dans l'atmosphère, participe à l'accroissement des effets de serre.

I.1.2.2. Le gaz naturel

Le gaz est un mélange gazeux d'hydrocarbures composé principalement de méthane. Dans un gisement, il est souvent associé au pétrole (mais il y existe des gisements de gaz uniquement). Il peut être dissous à l'intérieur, ou trouvé sous forme de poche au-dessus du pétrole. La matière organique à l'origine du gaz peut être issue de végétaux terrestres ou d'organismes marins.

Comme pour le pétrole, la préservation de la matière organique n'est possible que dans des environnements fortement appauvris voire dépourvus d'oxygène. Après sa formation, le gaz naturel migre également vers la surface, et un gisement ne se forme que s'il est piégé lors de sa remontée.

L'utilisation de celui-ci est assez récente et est actuellement en plein développement, on peut alors penser que cette croissance se poursuivra. La consommation mondiale du gaz en 2000 a été de 2,164 Gtep, ce qui représente 24,7% de la consommation mondiale d'énergie [88].

La production des principaux pays concernés est donnée sur la **figure (II.1)**. Il est désormais prévu un taux de croissance plus faible que par le passé compte tenu, en particulier, d'une concurrence accrue avec le charbon, liée aux évolutions de prix [89].

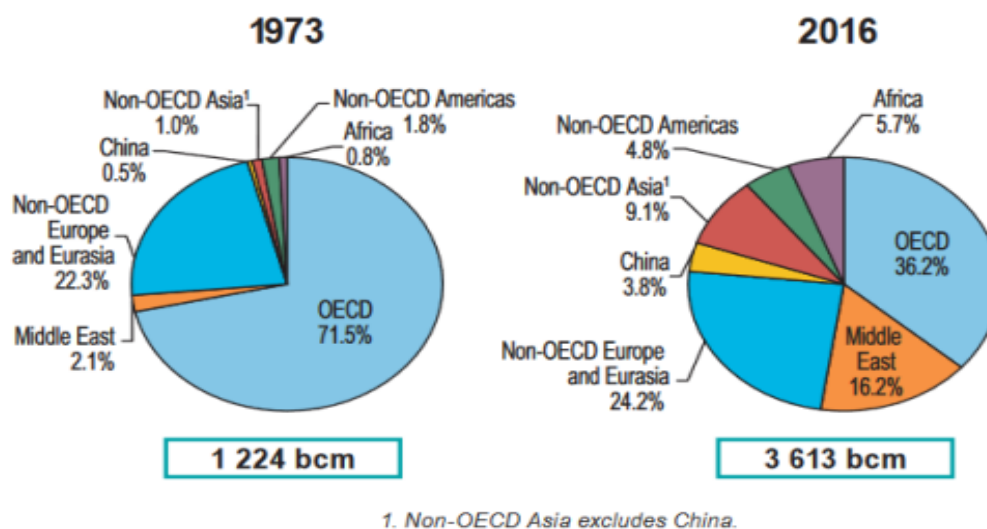


Figure II.1 : Evolution [1973-2016] de la production du gaz naturel dans les différentes régions (bcm/Gm³). (Source : IEA, Key World Energy Statistics 2017).

A. Avantages et inconvénients du gaz naturel

Tableau II.2 : Avantages / Inconvénients du gaz naturel [90].

Energie	Avantages	Inconvénients
Gaz naturel	<ul style="list-style-type: none"> - Sa répartition géographique est plus dispersée, à l'échelle mondiale, que celle du pétrole ; - Faible émission de CO₂ lors de sa combustion si on le compare au dérivés du pétrole, de sa forte teneur en méthane ; - La forme gazeuse du gaz nécessite une extraction qui consomme peu d'énergie ; - On peut le transporter facilement grâce à des gazoducs, des canalisations. 	<ul style="list-style-type: none"> - Bien qu'il soit le plus propre des combustibles fossiles, le gaz naturel émet lors de sa combustion du gaz à effet de serre et de l'oxyde d'azote. - Il est dangereux car il peut devenir explosif lorsque certaines conditions de concentration et de température sont remplies ; - Celui-ci est incolore et inodore. Il est donc indétectable par les sens humains ; - Le gaz, est par nature, peu dense.

I.1.2.3. Le charbon

Le charbon est un combustible fossile d'origine organique. Il est le résultat de la transformation de biomasse (résidus de forêts notamment) enfouie dans le sol au cours des temps géologiques. Par enfouissement, sous l'effet des pressions et des températures croissantes avec la profondeur, les végétaux ensevelis sont en effet décomposés puis transformés en une matière solide et combustible à haute teneur en carbone.

Les plus anciens et les plus recherchés des charbons datent de près de 300 millions d'années (ère carbonifère). Mais on trouve aussi des charbons plus récents, déposés jusque dans l'ère tertiaire (lignite) ou quaternaire (tourbe) [91].

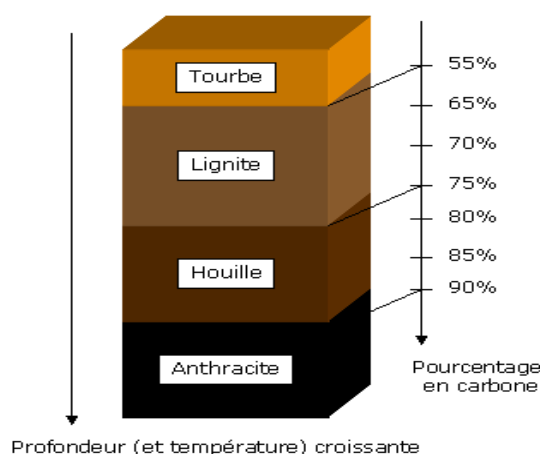


Figure II.2 : La formation du charbon [92].

A. Avantages et inconvénients du charbon

Tableau II.3 : Avantages / Inconvénients du charbon [93].

Energie	Avantages	Inconvénients
Charbon	<ul style="list-style-type: none"> - Il est disponible dans de nombreux pays ; - Les gisements connus sont très importants ; - Il permet de produire du gaz de houille et un grand nombre de produits (Chimiques, carbonés ou hydrogénés) ; - C'est la seule forme d'énergie qui est solide. 	<ul style="list-style-type: none"> - C'est une énergie non-renouvelable et très coûteuse à extraire ; - c'est une énergie fossile très polluante surtout à cause de ces impuretés qui se dispersent dans l'atmosphère lors de sa combustion ; - De plus, lors de sa combustion, c'est une énergie fossile qui libère beaucoup de dioxyde de carbone. Ce phénomène est à l'origine de l'accroissement d'effet de serre.

I.1.3. La consommation primaire des énergies fossiles en Algérie

La consommation totale d'énergie primaire en Algérie atteignait 55,5 Mtep (Millions de tonne équivalent pétrole) en 2017, soit 1,34 tep par habitant, 28% au-dessous de la moyenne mondiale : 1,86 tep, mais deux fois plus élevée que la moyenne africaine : 0,65 tep (France : 3,68, Maroc : 0,57).

Tableau II.4 : Consommation intérieure brute d'énergies fossiles en Algérie [1990-2017] (par source Mtep) (Source : Agence international de l'énergie, 2019).

Source	1990	%	2000	%	2010	%	2016	2017	%	Var. 2017/1990
Charbon	0,69	3,1	0,52	1,9	0,34	0,9	-	0,22	0,3	-68%
Pétrole	9,32	42,0	9,59	35,5	16,39	40,9	19,7	19,36	34,9	+108%
Gaz naturel	12,17	54,9	16,84	62,4	23,32	58,1	34,66	35,90	64,7	+195%
Total fossiles	22,17	99,9	26,95	99,8	40,05	99,8	53,73	55,48	99,94%	+150%

I.1.4. Situation mondiale des énergies fossiles

Le simple calcul du ratio R/P (réserves prouvées / consommation constatée) conduit à un chiffre qui caractérise la durée de vie des réserves. Il ne faut pas donner à ce chiffre (exprimé en années) une signification absolue car les deux termes du ratio comportent des incertitudes :

- d'une part les progrès dans la recherche et l'exploitation des gisements ont tendance à augmenter le taux de récupération et donc, par là même, le volume des réserves prouvées et la « durée » de ces réserves,

- d'autre part, la croissance de la demande dans les prochaines décennies conduit au doublement de la consommation annuelle ce qui a évidemment l'effet inverse sur la « durée » des réserves.

Le tableau ci-après résume la situation en ce qui concerne le pétrole, le gaz naturel et les minéraux solides (charbon, bitumineux et lignite) :

Tableau II.5 : Réserves d'énergies primaires fossiles (base 2017)
(Source : Mémento sur l'énergie – CEA 2018)

	Réserves mondiales prouvées	R/P (au rythme actuel de la consommation) (Années)
Pétrole (Gtep)	239,3	50,2
Gaz naturel (Trillions m ³)	193,5	52,6
Minéraux solides (Milliards tonnes)	1035	134

Remarque : Les réserves prouvées sont les quantités de combustibles fossiles récupérables dans les conditions économiques et techniques du moment. Elles sont évaluées avec une probabilité d'existence de l'ordre de 90 %.

I.1.5. Conclusion partielle

Les énergies fossiles sont vraiment très productives. Cependant, ces dernières sont aussi très mauvaises pour notre environnement. L'homme, ayant pris conscience de ceci, a donc décidé d'utiliser des ressources naturelles telles que le soleil, le vent, le bois et les autres produits végétaux. De plus, elles pourraient permettre à plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité [93].

I.2. Les énergies renouvelables : (énergies vertes)

I.2.1. Définition

Une énergie est dite renouvelable lorsqu'elle provient de sources que la nature renouvelle en permanence, par opposition à une énergie non renouvelable dont les stocks s'épuisent.

Les énergies renouvelables proviennent de 2 grandes sources naturelles : le Soleil (à l'origine du cycle de l'eau, des marées, du vent et de la croissance des végétaux) et la Terre (qui dégage de la chaleur).

Surnommées « énergies propres » ou « énergies vertes », leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes (amis de la nature) mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies fossiles [94].

I.2.2. Les sources d'énergies renouvelables

Il existe plusieurs sources d'énergies renouvelables, on les récapitule dans le tableau suivant :

Tableau II.6 : Sources d'énergies renouvelables [94].

La zone	source d'énergie	Définition
[2000m, 300m]	Les nuages, nouveau potentiel énergétique ?	- L'idée est dans l'air, l'humidité condensée dans les nuages pourrait être collectée et transformée en électricité. - Avec quel outil ? Un ballon sonde équipé d'un filet capable de collecter l'humidité contenue dans les nuages. « 100m ² de filet permettraient de produire 200 W par jour ».
[300m, 5m]	L'éolien prend de la hauteur	- Les chercheurs réfléchissent actuellement aux moyens de capter ces vents puissants. Dans le ciel de Fairbanks, en Alaska, une turbine placée dans un ballon gonflé à l'hélium va bientôt s'envoler pour capter les vents à plus de 300m de haut. « En altitude, les vents sont 5 fois plus puissants qu'au sol ».
[5m, 3m]	A la force du vent	- Appelée aussi « énergie du vent », la solution des éoliennes est la plus utilisée en Europe. Celles-ci permettent de transformer la force du vent en électricité grâce à un générateur. « une éolienne de 2MW fournit de l'électricité pour 2000 personnes, chauffage compris ».
[3m, 0m]	Toute la puissance du soleil La force de l'eau au cœur du procédé	- L'utilisation des cellules photovoltaïques, essentiellement composées de silicium, permet de capter et transformer la lumière du soleil en électricité. « 480 cellules monocristallines équipent la smart Flower, un tournesol photovoltaïques géant qui suit la course du soleil ». - Exploitée depuis la fin du 19 ^e siècle, l'hydroélectricité utilise la force de l'eau (fleuves, rivières ...) pour fabriquer de l'électricité dans les centrales hydroélectriques, alimentées en partie par des barrages.
[0m, -25m]	Les matières organiques deviennent énergie Quand le courant marin fait tourner les turbines	- La biomasse utilise des procédés thermiques (pyrolyse, gazéification, combustion directe) pour transformer les matières organiques animales ou végétales en électricité ou en chaleur. « La biomasse et la 2 ^{ème} source d'énergie renouvelable dans le monde ». - Saviez-vous que les courants océaniques ou issus des marées peuvent permettre la production d'électricité ? En effet, La rotation des turbines installées en mer entraîne un alternateur produisant un courant électrique variable.
[-25m, -100m]	Toute la chaleur de la terre	- La géothermie convertit la chaleur terrestre en énergie. Un processus d'injection d'eau sous pression permet de récupérer l'eau chaude issue du sous-sol terrestre pour la convertir en énergie électrique ou thermique.
[-100m, -2000m]	Prochaine étape : Le magma	- Le magma est de la matière en fusion provenant du noyau terrestre, qu'on rencontre en surface sous forme de lave. Pour les pays volcaniques, cette source d'énergie représente un potentiel formidable et inépuisable, bien plus concentrée que la « simple » géothermie. « 1000° Celsius : c'est la température de la roche en fusion ».

L'émergence des énergies renouvelables dans le débat sur la politique énergétique est à distinguer de leur développement technologique. L'usage du vent, de l'eau, du bois ou du soleil comme ressources énergétiques a accompagné toutes les étapes du développement de l'homme, sous des formes multiples.



Figure II.3 : Les énergies renouvelables [58].

I.2.3. Les différents types d'énergie renouvelable

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir des sources précédentes (tableau II.6). On distingue :

I.2.3.1. L'énergie éolienne

Depuis longtemps, l'homme utilise l'énergie éolienne, au début, elle a été utilisée pour faire avancer les bateaux, moulin du grain ou pomper de l'eau. Par la suite pendant plusieurs décennies, l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique, que ce soit à l'échelle individuelle avec le petit éolien ou à grande échelle avec le grand éolien, l'énergie du vent peut contribuer à diversifier la production d'énergie électrique, en outre, l'énergie éolienne est, une énergie propre, renouvelable qui peut pallier aux problèmes environnementaux. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Elle peut être utilisée de deux manières ; directe ou indirecte [95] :

- Directe : L'énergie mécanique est conservée ainsi on utilise le vent pour faire avancer un véhicule (navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, éoliennes de pompage pour abreuver le bétail).
- Indirecte : Pour transformer l'énergie mécanique en énergie électrique, une éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

A. Définition

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est généralement utilisée pour produire de l'électricité et rentre dans la catégorie des énergies renouvelables.

B. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne repose sur la transformation de l'énergie cinétique en énergie électrique : le vent fait tourner les pales qui sont-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique. Le courant électrique est ensuite transformé et injecté dans le réseau électrique pour alimenter les zones concernées. Il peut être stocké pour une utilisation ultérieure.

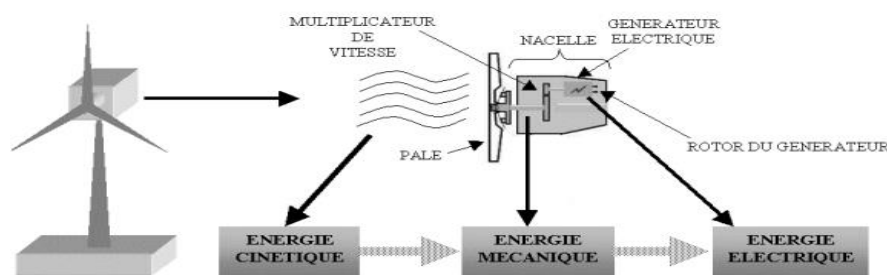


Figure II.4 : Schéma de fonctionnement de l'énergie éolienne [95].

C. Les différents types d'éolienne

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.

C.1. Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement qui est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multiples pour le pompage de l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

Sur la base du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes :

- les éoliennes à rotation lente "multiples" ;
- les Aérogénérateurs.



Figure II.5 : Les éoliennes à axe horizontal [95].

C.2. Les éoliennes à axe vertical

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles.

Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : **Savonius** et **Darrieus**.

- L'éolienne **Savonius** comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :
 - Elle est simple à fabriquer ;
 - Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2m/s.
- L'éolienne inventée par le Français **Darrieus** est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée. Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts étaient faits dans la recherche sur ce sujet [95].



Figure II.6 : Les éoliennes à axe vertical [95].

D. Quantité d'énergie nécessaire

La quantité d'énergie électrique que peut produire une éolienne est calculée en fonction de la quantité d'énergie cinétique qu'elle peut récupérer du vent.

Cependant, un principe physique énoncé par l'allemand Albert Betz indique que toute éolienne avec un rotor en forme de disque ne pourra jamais convertir plus de 59% de l'énergie cinétique contenue dans le vent en énergie mécanique.

Ce résultat exprime la puissance maximale récupérée par m² de surface en forme de disque lorsqu'un vent le traverse de façon perpendiculaire.

Il faut que les conditions suivantes soient remplies : la température est de 15°C, la densité de l'air est de 1.225 kg/m³ et la pression de l'atmosphère est normale [93].

E. Avantages et inconvénients d'énergie éolienne

Les avantages :

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs car elle est constituée principalement de béton (le socle), métal et de matières plastiques ;
- Elle produit de l'électricité sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux et les sols ;
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix de baril de pétrole ;
- Lorsque des grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations ;
- Une éolienne est en grande partie recyclable (acier, béton). Après son temps de fonctionnement (environ 20ans), elle est entièrement et rapidement démontable. On peut même si besoin retirer la fondation en béton. Elle n'aura laissé aucun produit contaminant autour d'elle et pourra facilement remplacée.

Les inconvénients :

- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, elle ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale.
- Des effets sur le paysage ;
- Problèmes de bruit et d'interférences électromagnétiques ;
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de l'environnement et de la météo ;
- Danger pour les animaux ;
- L'investissement est important.

Enfin, l'éolien a plus d'avantage que d'inconvénients, ce qui lui incombe un rôle important dans la production de l'électricité sans créer d'endommagements majeurs de notre environnement [96].

I.2.3.2. L'énergie solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur Terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies fossiles et renouvelables. Cette énergie dépend du Soleil que l'envoi sous forme de rayonnements à travers quelque cent cinquante millions de kilomètres d'espace.

Elle permet de produire soit directement l'électricité à l'aide des panneaux photovoltaïques, soit de la chaleur thermiques pour le chauffage ou la production électrique aux centrales solaires (figure II.7) [58].

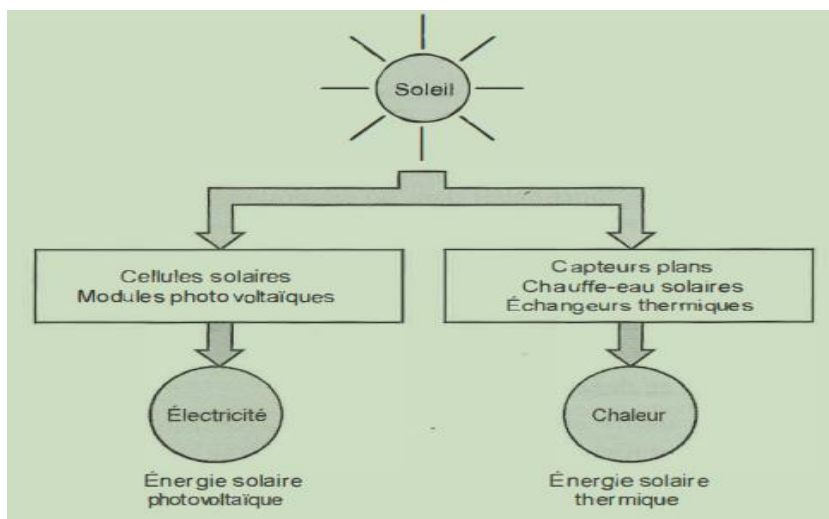


Figure II.7 : Les deux types d'énergie solaire [58].

A. *L'énergie solaire thermique*

L'énergie solaire thermique est la transformation instantanée de l'énergie des rayons solaires en énergie thermique. Cette transformation peut être utilisée directement, comme par exemple le chauffage de l'eau sanitaire à l'aide des capteurs solaires, ou indirectement dans le cas de la production de l'électricité dans une centrale thermodynamique solaire.

Le solaire thermique est basé sur l'utilisation de la chaleur transmise par rayonnement qui est différente de celle du photovoltaïque où l'électricité est générée par l'énergie des photons. A l'aide des progrès technologiques, les techniques de captation directe d'une partie de l'énergie solaire sont nettement améliorées afin de rendre les systèmes solaires plus fiables, efficaces et rentables [59].

A.1. *Principe de fonctionnement*

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) ou, s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.

Les capteurs solaires de type plan sont le plus couramment utilisés. Ils se composent d'un absorbeur situé dans un coffrage isolé en face arrière et constitué d'un vitrage en face avant. Cet absorbeur possède une couche sélective qui augmente la captation de l'énergie solaire tout en limitant les pertes par rayonnement. Le vitrage quant à lui évite le refroidissement de l'absorbeur par le vent et crée un effet de serre qui augmente le rendement du capteur. L'isolation à l'arrière du capteur diminue les pertes de chaleur.

La chaleur produite par un capteur solaire thermique est fonction de l'ensoleillement qu'il reçoit, de son positionnement (inclinaison et orientation), de la température ambiante et du lieu d'implantation.

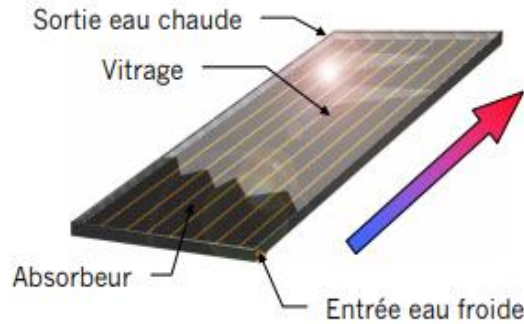


Figure II.8 : Un capteur plan vitré [97].

A.2. Application d'énergie renouvelable thermique

L'énergie solaire thermique trouve de nombreuses applications : la production d'eau chaude, le chauffage des maisons, le chauffage de l'eau des piscines, le séchage des récoltes, la réfrigération par absorption pour les bâtiments, la production de très haute température [97].

B. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir de rayonnement du soleil. Les modules photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. La conversion photovoltaïque se produit dans des matériaux semi-conducteurs. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable [60].

B.1. Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type **n** et dopée de type **p**. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau **n** diffusent dans le matériau **p**. La zone initialement dopée **n** devient chargée positivement, et la zone initialement dopée **p** chargée négativement.

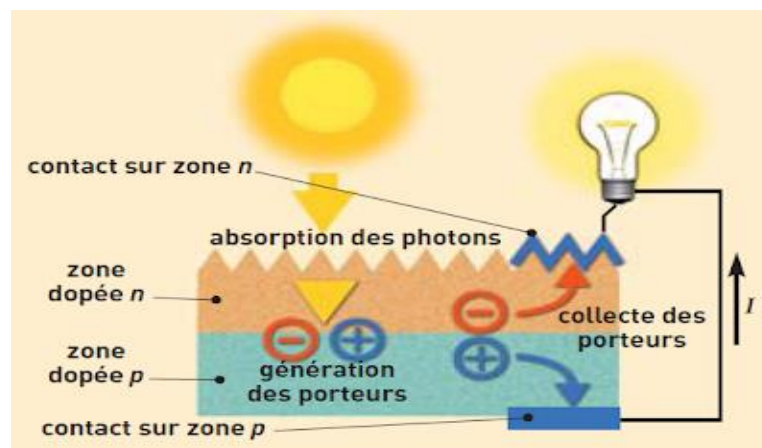


Figure II.9 : Principe de la conversion photovoltaïque [60].

C. Avantages et inconvénients des énergies solaires

Les avantages :

- Le respect de l'environnement ;
- Energie gratuite ;
- Energie propre, renouvelable et inépuisable ;
- La préservation des ressources fossiles.

Les inconvénients :

- Investissement du départ très coûteux ;
- Une production d'énergie irrégulière, à cause du temps ;
- L'énergie solaire n'est pas compétitive lorsqu'il s'agit de production importante d'énergie.

I.2.3.3. L'énergie géothermique

L'énergie géothermique désigne l'énergie provenant de la chaleur contenue dans la croûte terrestre et dans les couches superficielles de la Terre.

Le principe de la géothermie consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou d'électricité. Partout, la température croît depuis la surface vers l'intérieur de la Terre. Selon les régions l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre. Elle provient également, pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1000 °C à 4300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques qui constituent le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères (nappe souterraine renfermant de l'eau ou de la vapeur d'eau) [62].

A. Classification des sources géothermiques

On distingue classiquement trois types de géométrie selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

Tableau II.7 : Classification des ressources géothermiques [61].

Type	Profondeur	Température	Objectif
La géométrie à haute énergie (haute enthalpie, haute température)	Plus de 1500 mètres.	Entre 80 °C et 300 °C.	Production d'électricité et de chaleur à la fois.
La géométrie à basse énergie	1500 à 2500 mètres.	Entre 30 °C et 100 °C.	Le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur et certaines applications industrielles.
La géométrie à très basse énergie	Certains mètres.	Entre 10 °C et 30 °C.	La climatisation passive avec par exemple le système du puits provençal et le chauffage et la climatisation.

B. Avantages et inconvénients d'énergie géométrique

Les avantages :

- Ressource énergétique locale qui ne nécessite pas de transport ;
- Ressource énergétique renouvelable préservant l'environnement ;
- Capacités de production importantes comparées aux autres énergies renouvelables ;
- Energie de base, généralement, indépendante des conditions climatiques.

Les inconvénients :

- Coûts d'investissement et de maintenance très élevés ;
- Risque de glissement du terrain ;
- L'utilisation de la géométrie reste particulière, proche notamment des zones volcaniques [62].

I.2.3.4. La biomasse

Grâce à la photosynthèse, les plantes utilisent l'énergie solaire pour capturer le gaz carbonique et le stocker sous forme d'hydrates de carbone, tout en assurant leur croissance. Les premiers hommes ignoraient bien sûr ce processus physico-chimique, mais ils ont vite compris l'intérêt de la «biomasse» pour se chauffer. Employé pour désigner toute la matière vivante, ce terme de biomasse s'applique depuis peu à l'ensemble des végétaux employés comme sources d'énergie. Le bois de feu est bien sûr la plus ancienne de ces sources. Aujourd'hui on peut ajouter la biomasse dite « humide » ; déchets organiques agricoles, déchets verts, boues des stations d'épuration, ordures ménagères qui constituent, à une moindre échelle, autant de sources d'énergie, mais pas forcément très écologiques [60].

A. Avantages et inconvénients de la biomasse

Les avantages :

- Valorisation des déchets organiques ;
- Diminution du volume de matière organique et désodorisation des déchets ;
- Valorisation des ressources locales (élevage agricole).

Les inconvénients :

- Génératrice de CO₂ ;
- Rendement parfois faible ;
- Epuisement des stocks.

I.2.3.5. L'énergie hydraulique : (l'hydroélectricité)

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau, placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation. De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et set principalement à la production d'électricité [95].

A. Définition

L'énergie hydraulique dépend de cycle de l'eau. Elle est la plus importante source d'énergie renouvelable.

Sous l'action du soleil, l'eau des océans et de la terre s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de température au-dessus des continents provoque des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des rivières et des océans.

Une centrale hydraulique est composée de 3 parties [94] :

- Les barrages qui retiennent l'eau ;
- La centrale qui produit l'électricité ;
- Les lignes électriques qui évacuant et transportant l'énergie électrique.

B. Principe de fonctionnement

Le principe est simple : la force motrice de l'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique (système comparable à une dynamo). Ensuite, l'électricité obtenue peut être soit utilisée directement ou stockée en batteries, soit injectée dans le réseau de distribution. La puissance disponible dépend de deux facteurs la hauteur d'eau et le débit [95].

C. Autres formes de production de l'énergie hydroélectrique

- ✧ Les moulins à l'eau ;
- ✧ Les STEP : station de transfert d'énergie de pompage ;
- ✧ L'énergie de vagues ;
- ✧ Système à colonne d'eau oscillante ;
- ✧ L'énergie marémotrice, etc.



Figure II.10 : Production hydroélectrique par moulin à l'eau [65].

D. Avantages et inconvénients d'énergie hydraulique

Les avantages :

- C'est une énergie renouvelable, et donc illimité tant qu'il y a de l'eau pour faire tourner les turbines ;
- Cette énergie n'est pas polluante, la seule pollution qui se produit c'est lors de la construction de ces centrales ;
- C'est une énergie très stable. En effet la puissance électrique qui en sort varie très peu.

Les inconvénients :

- La construction des centrales hydrauliques sont souvent coûteuse ;
- En cas de sécheresse, toute la centrale hydraulique sera dysfonctionnelle et donc aucune électricité ne sera produite.
- L'installation des barrages provoquent aussi beaucoup de problèmes au niveau de l'environnement, notamment la vie aquatique.

I.3. Comparaison des énergies fossiles et renouvelables à l'échelle humaine

I.3.1. La localisation et de la variabilité dans le temps et l'espace

Tableau II.8 : Comparaison des énergies au niveau de la localisation et de la variabilité.

Energie fossile	Energie renouvelable
<u>Localisation</u>	
- Les gisements sont très localisés. Ils sont souvent éloignés des sites de consommation.	- Elles sont décentralisées. Elles sont disponibles partout, sur toute la planète, bien que ce soit en quantités différentes.
<u>Variabilité dans l'espace et dans le temps de la densité énergétique</u>	
- Les énergies fossiles ont des caractéristiques énergétiques fixées dans le temps et l'espace. - Elles ne nécessitent pas des moyens technologiques pour être stockées. - Elles sont facilement transportables.	- Les énergies renouvelables sont variables dans le temps et l'espace. Cette disponibilité variable peut entraîner un déphasage entre le moment de production de l'énergie et le moment de sa consommation. Pour remédier à ce problème, le stockage est parfois indispensable.

I.3.2. Comparaison au niveau politique et économique

Tableau II.9 : Comparaison des énergies au niveau politique et économique [98].

Energie fossile	Energie renouvelable
<u>Organisation centralisée pyramidale</u>	<u>Organisation décentralisée</u>
- L'exploitation des ressources fossiles, finie et centralisée, induit une organisation sociale centralisée et pyramidale. - Les énergies fossiles sont des sources de puissance, elles entraînent une dépendance entre les pays producteurs et les pays qui ne possèdent pas cette énergie.	- A l'opposé, l'exploitation des énergies renouvelables induit une organisation décentralisée semblant à celle du réseau d'internet. Ce réseau n'est pas un réseau de puissance mais un réseau d'énergie importante. - Elles améliorent l'indépendance énergétique. - Ce réseau peut être une opportunité pour les pays à forte ruralité comme le sont de nombreux pays en développement.

<p style="text-align: center;"><u>Energie de droits</u></p> <p>- L'exploitation des énergies fossiles induit implicitement un rapport de droit. La production, la distribution de l'énergie, la fiabilité du réseau ne le concernant pas.</p>	<p style="text-align: center;"><u>Energie de devoirs</u></p> <p>L'énergie solaire, ressource renouvelable, décentralisée, de puissance faible, d'énergie importante n'est pas une énergie de droits mais une énergie de responsabilité, contrairement aux énergies fossiles. En effet, l'énergie dont dispose l'utilisateur dépendant de sa décision d'investissement initial, du soin d'entretien de l'installation, de sa responsabilité.</p>
<p style="text-align: center;"><u>Energie payante</u></p> <p>- Nous ne pouvons en disposer naturellement comme nous disposons des énergies renouvelables. Nous devons les payer pour y avoir accès. - Les déchets sont coûteux.</p>	<p style="text-align: center;"><u>Energie gratuite</u></p> <p>- L'eau, le soleil, le vent, la biomasse sont gratuits. - Ce sont les technologies d'exploitation de ces énergies qui sont payantes. Les déchets sont peu coûteux.</p>

I.3.3. Comparaison de l'impact environnemental

Tableau II.10 : Comparaison des énergies selon l'impact environnemental [98].

Energie fossile	Energie renouvelable
<p style="text-align: center;"><u>Risques liés aux extractions</u></p> <p>- Les exploitations minières de charbon à un impact sur le paysage. - L'extraction de pétrole ou de gaz a aussi un impact géophysique.</p>	<p style="text-align: center;"><u>Impact sur le paysage</u></p> <p>- La construction des installations nécessaires a parfois un impact sur le paysage. - C'est pourquoi des efforts sont faits pour tenter d'intégrer ces installations dans le paysage.</p>
<p style="text-align: center;"><u>Risques liés au transport</u></p> <p>- La préparation et le transport des combustibles depuis les lieux d'extraction jusqu'aux lieux d'utilisation impliquent un ensemble d'infrastructures lourdes (voies ferrées, ports, routes, conduites, raffineries, stockages...) qui mobilisent des espaces spécifiques (espaces littoraux ou des sites de vallées...). Ce transport génère parfois des risques (accidents, marées noires, pratique du dégazage en mer).</p>	<p style="text-align: center;"><u>Risques pour la faune</u></p> <p>- La construction d'un barrage hydroélectrique a des conséquences lourdes : inondation de vallées entières, modification profonde de l'écosystème local. - On a également accusé les éoliennes de représenter un danger pour les oiseaux les chauves-souris.</p>
<p style="text-align: center;"><u>Risques liés au traitement</u></p> <p>- Le raffinage s'accompagne du rejet dans l'environnement de composés organiques gazeux et de liquides (phénols, produits ammoniacaux...).</p> <p>- Les produits de combustion rejetés dans l'atmosphère sont constitués en premier lieu de dioxyde de carbone (CO₂), et de vapeur d'eau et contiennent aussi, en proportions variables du</p>	<p style="text-align: center;"><u>Impact sur l'effet de serre</u></p> <p>- La production de gaz à effet de serre est le plus souvent faible pendant la production d'énergie.</p>

<p>monoxyde de carbone et du méthane, les gaz HCFC utilisés en réfrigération.</p> <p>- L'utilisation des combustibles fossiles est le principal facteur de l'accroissement de la concentration de CO₂ dans l'atmosphère que l'on constate actuellement. Cet accroissement induit un renforcement de l'effet de serre et tend par conséquent à provoquer une augmentation des températures moyennes à la surface de la terre.</p>	
<p><u>Déchets produits par les énergies fossiles</u></p> <p>- Les déchets sont produits pendant leur utilisation (centrales thermiques à hydrocarbures, nucléaires).</p> <p>- Les déchets sont produits en quantité importante et peuvent être très dangereux.</p>	<p><u>Déchets produits par les énergies renouvelables</u></p> <p>- Les déchets sont peu dangereux, les impacts en cas d'accident grave sont facilement maîtrisables comparés à ceux de l'industrie électronucléaire ou pétrolière.</p> <p>- Les déchets sont essentiellement des déchets de démantèlement des installations de production en fin de vie.</p>

Les énergies renouvelables et fossiles présentent de nombreuses différences tant sur le plan de densité énergétique, de leur localisation que sur les enjeux politiques, économiques et environnementaux qu'elles génèrent. On assiste à une prise de conscience progressive du changement climatique dû principalement au rejet de dioxyde de carbone dans l'atmosphère. Les énergies fossiles sont principales responsables de ce réchauffement.

I.4. Autres comparaison des énergies

I.4.1. Quantité des combustibles nécessaires pour produire 1000MW pendant 1an

Le tableau suivant présente les quantités de combustibles nécessaires pour produire 1000 MW pendant une durée de 1 an. Si nous jetons un coup d'œil sur le tableau, nous constaterons que les quantités consommées par les énergies fossiles sont remarquablement très élevées par rapport à celles des énergies renouvelables. Ceci veut dire que les énergies renouvelables sont plus économiques par rapport aux énergies non renouvelables. Donc il est intéressant d'utiliser les énergies renouvelables pour les petites localités telles que l'énergie photovoltaïque, qui produit environ 1kW/m². Sinon, nous serons obligés d'utiliser les énergies fossiles si nous avons besoin de grandes puissances [93].

Tableau II.11 : Quantité de combustibles nécessaires pour produire 1000 MW pendant 1an.

Source d'énergie	Requit
Photovoltaïque (une énergie propre)	100 km ²
Eolien (une énergie propre)	5600 éoliennes de 600Kw.
Charbon (une énergie fossile)	2 600 000 tonnes de charbon.
Pétrole (une énergie fossile)	1 800 000 tonnes de pétrole.

II. L'électrification des zones rurales par l'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque contribue énormément dans le développement durable des régions isolées et éloignées du réseau de distribution électrique.

Les minis centraux photovoltaïques offrent une solution très intéressante pour l'alimentation en énergie électrique nécessaire au développement de ces régions.

L'effet photovoltaïque (PV) fut observé pour la première fois par André Becquerel en 1839 et qui permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu [60].

Les principales applications du PV sont :

- ❖ Electrification de logements, bâtiment d'élevage, clôture électrique solaire, aération d'étang solaire ;
- ❖ Alimentation des systèmes de pompage et d'irrigation ;
- ❖ Eclairage de routes ;
- ❖ Alimentation d'antenne radio, matériel télécoms, appareils électroménagers ;
- ❖ Epuration d'eaux usées, etc. [61].

II.1. L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie de rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellule sont reliées entre elles en forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique, l'effet photovoltaïque ou la technologie associée [63].

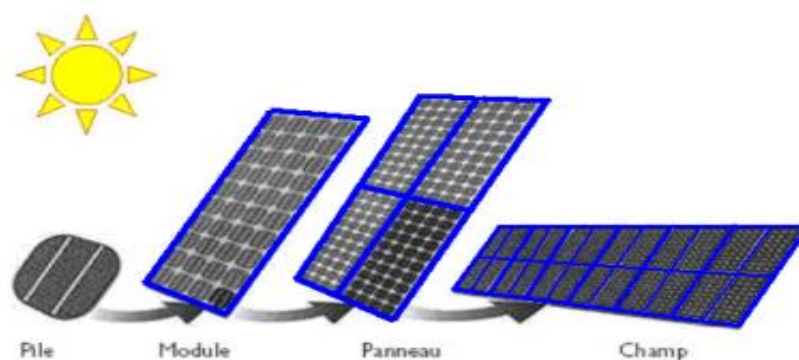


Figure II.11 : De la cellule au champ photovoltaïque [63].

II.1.1. Les cellules photovoltaïques

Un panneau solaire fonctionne grâce à l'effet photovoltaïque, c'est à dire par la création d'une force électromotrice liée à partir de l'absorption d'énergie lumineuse dans un solide.

C'est le seul moyen connu actuellement pour convertir directement la lumière en électricité.

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Il s'agit d'un dispositif semi-conducteur à base de silicium délivrant une tension de l'ordre de 0,5 à 0,6 V [64].

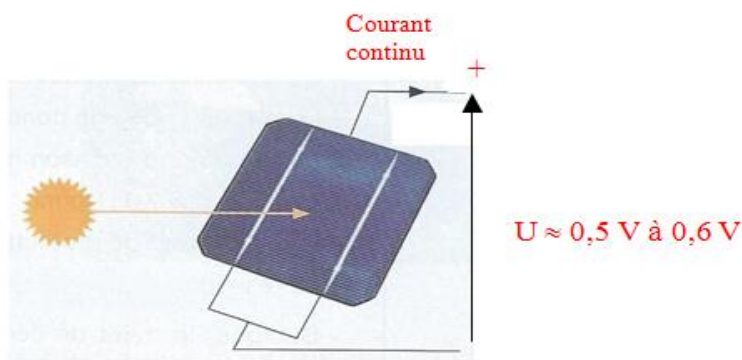


Figure II.12 : Cellule solaire photovoltaïque [64].

II.1.1.1. Les différentes technologies des cellules photovoltaïques

Il existe un grand nombre de technologie mettant en œuvre l'effet photovoltaïque. Beaucoup sont encore en phase de recherche et développement.

Les principales technologies industrialisées en quantité à ce jour sont : le silicium mono et moly-cristallin (plus de 80% de la production mondiale) et le silicium en couche mince à base de silicium amorphe ou CIS (Cuivre, Indium et Sélénium) [63]. Le silicium est donc le matériau de base des photopiles.

Les cellules photovoltaïques au silicium monocristallin ont un meilleur rendement, Il varie de 13 à 18%. Les cellules au silicium poly-cristallin possèdent les même caractéristiques physiques cependant elles ont un rendement légèrement inférieur, soit de 12 à 15%. Le silicium amorphe est la troisième technologie utilisée, leur rendement est de 6 à 10%. D'une manière générale le rendement de la cellule varie selon la nature du matériau et le procédé de fabrication.

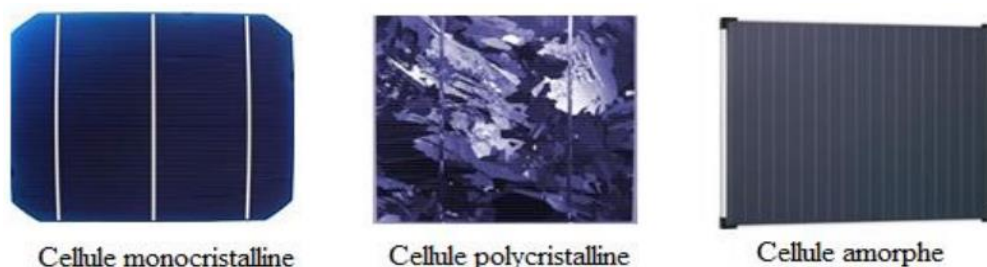


Figure II.13 : Types des cellules solaires photovoltaïques [66].

II.1.1.2. Comparaison des différentes technologies

Tableau II.13 : Tableau comparatif des différents matériaux des photopiles [63].

Matériau	Caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	-Très performant ; - Stabilité de production ; - Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades ...
Silicium poly cristallin	- Adaptation à la production à grande échelle ; - Stabilité de production. (Plus de 50% du marché mondial).	Modules pour toits, façades, générateurs ...
Amorphe	- Peut fonctionner sous la lumière fluorescente ; - Fonctionnement si faible luminosité ; - Fonctionnement par temps couvert ; - Fonctionnement si ombrage partiel ; - La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	- Appareils électroniques (montres, calculatrices ...), - Intégralité dans le bâtiment

II.1.1.3. Caractéristiques des cellules photovoltaïques

Une cellule solaire est caractérisée par les paramètres fondamentaux suivant :

- 1) Le courant de court-circuit : C'est la plus grande valeur du courant générée par une cellule pour une tension nulle ($V_{pv}=0$).
- 2) La tension en circuit ouvert (V_{oc}) : Elle représente la tension aux bornes de la diode quand elle est traversée par le photo-courant I_{ph} ($I_{ph}=I_d$) quand ($I'_{pv}=0$). Elle reflète la tension de la cellule en absence de lumière, elle est exprimée mathématiquement par :

$$V_{oc} = \frac{m.k.T_c}{e} \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) = v_t \cdot \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right) \quad (\text{II.1})$$

Ou :

$$v_t = \frac{m.k.T_c}{e} \quad (\text{II.2})$$

Avec :

v_t : la tension thermique, T_c : la température absolue, m : facteur idéal de la jonction, K : Constante de Boltzman ($K= 1.38*10^{-23}$ j/k), e : charge de l'électron ($e=1.6*10^{-19}$).

- 3) Le point de puissance maximale (P_{\max}) : est le point M ($V_{\text{opt}}, I_{\text{opt}}$) de la figure où la puissance dissipée dans la charge est maximale.

$$P_{\max} = V_{\text{opt}} \cdot I_{\text{opt}} \quad (\text{II.3})$$

Avec : V_{opt} : la tension optimale, I_{opt} : le courant optimale.

- 4) Le facteur de forme (FF) : Le facteur de forme est le rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule ; il est définie par la relation suivante :

$$FF = \frac{V_{\text{opt}} \cdot I_{\text{opt}}}{V_{\text{oc}} \cdot I_{\text{cc}}} \quad (\text{II.4})$$

- 5) Le rendement maximum : C'est le rapport entre la puissance maximale et la puissance à l'entrée de la cellule solaire.

$$\eta = \frac{P_{\max}}{P_{\text{in}}} = \frac{V_{\text{opt}}}{A_{\text{pv}} \cdot G} \quad (\text{II.5})$$

Avec : G : l'irradiation qui représente la puissance lumineuse reçue par unité de surface (W/m^2), A_{pv} : surface effective des cellules.

Les conditions normalisées de test des panneaux solaires sont caractérisées par un rayonnement instantané de $1000\text{W}/\text{m}^2$ d'une température ambiante de 25°C et d'un spectre AM de 1.5. AM représente l'Air Masse qui est l'épaisseur de l'atmosphère que la lumière doit pénétrer. Ces conditions sont appelées STC (Standard Test Conditions) cela correspond à un ensoleillement assez fort [60].

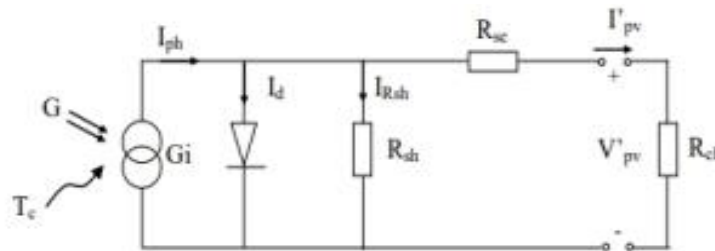


Figure II.14 : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque [60].

II.1.2. Les modules photovoltaïques

Un module photovoltaïque est d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en électricité. Par définition c'est un ensemble de cellules assemblées pour générer une puissance électrique suffisante lors de son exposition à la lumière. En effet, une cellule seule ne génère qu'une tension faible : de 0.5 à 1.5 V selon les technologies. Il est donc nécessaire d'associer plusieurs cellules en série pour pouvoir produire une tension exploitable [67].

II.1.2.1. Types d'association des modules photovoltaïques

L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série et/ou en parallèle donne lieu à l'apparition de plusieurs types de générateurs photovoltaïques. A cet effet, si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent. D'autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est l'ampérage qui augmente.

Pour obtenir le courant et la tension (donc la puissance), l'association se fait en série et en parallèle en même temps [74].

II.1.2.2. L'encapsulation des cellules

Les modules modernes sont construits avec un verre trempé à haute transmission, devant résister à la grêle, un encapsulant à base d'éthylène-vinyl-acétate (EVA) recouvert à l'arrière d'une feuille de Tedlar-Aluminium-Tedlar ou de polyéthylène.

Pour échapper aux risques de fuites dans les installations à haute tension, une distance suffisante est recommandée entre le cadre métallique et les cellules.

Préfèrent commander une couverture en face arrière qui "respire", en d'autres termes qui puisse restituer le jour le peu de vapeur d'eau qui a réussi à pénétrer la nuit (C'est-à-dire l'étanchéité).

Les boîtiers de connexion électrique sont en général fixés sous les modules en partie basse. Ils représentent un point critique du module car un endroit favorable à l'accumulation d'eau de condensation, de poussières et d'insectes. L'expérience montre qu'une étanchéité totale des boîtes à bornes n'est pas souhaitable, et qu'un orifice de respiration et d'évacuation de l'eau de condensation doit être ménagé au bas de la boîte [68].

II.1.3. Le champ des modules photovoltaïques

Afin d'obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle parfois une sous-station. Une association série-parallèle de panneaux aura une caractéristique I(V) théorique en tous points homothétique à celle des modules de base pourvu qu'ils soient identiques. Comme ils ne le sont jamais parfaitement, des règles d'association existent pour coupler de façon optimale les modules issus d'une même ligne de production [68].

II.1.4. Le système de stockage

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite s'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [69] :

- ❖ Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- ❖ Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

II.1.4.1. Les batteries

Les batteries sont souvent intégrées au générateur photovoltaïque, elles permettent le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et restitue la nuit ou les journées nuageuse (absence d'ensoleillement) cette électricité accumulée durant la journée.

Les batteries se distinguent par une capacité en Ampère heure.

➤ Capacité en Ampère heure :

Les Ampères heure d'une batterie sont simplement le nombre d'Ampères qu'elle fournit multiplié par le nombre d'heures pendant lesquelles circule ce courant.

Théoriquement, par exemple, une batterie de 200 Ah peut fournir 200 A pendant une heure, ou 50 A pendant 4 heures, ou 4 A pendant 50 heures.

Il existe des facteurs qui peuvent faire varier la capacité d'une batterie tels que [70] :

1) Rapport de changement et déchargement :

Si la batterie est chargée ou est déchargée à un rythme différent que celui spécifié, la capacité disponible peut augmenter ou diminuer.

Généralement, si la batterie est déchargée à un rythme plus lent, sa capacité augmentera légèrement. Si le rythme est plus rapide, la capacité sera réduite.

2) Température :

Un autre facteur qui influence la capacité est la température de la batterie et celle de son atmosphère. Le comportement d'une batterie est spécifié à une température de 27 degrés.

Des températures plus faibles réduisent leur capacité significativement. Des températures plus hautes produisent une légère augmentation de leur capacité, mais ceci peut augmenter la perte d'eau et diminuer la durée de vie de la batterie.

3) La durée de vie :

Un accumulateur peut être chargé puis déchargé complètement un certain nombre de fois avant que ces caractéristiques ne se détériorent. Par ailleurs, quel que soit le mode d'utilisation de l'accumulateur, il y'a une durée de vie totale exprimée en année (ou en nombre de cycles).

4) Profondeur de décharge :

La profondeur de décharge est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle de charge/décharge.

5) Le rendement :

C'est le rapport entre l'énergie électrique restituée par l'accumulateur et l'énergie fournie à l'accumulateur.

6) La tension d'utilisation :

C'est la tension à laquelle l'énergie stockée est restituée normalement à la charge.

7) Le taux d'autodécharge :

L'autodécharge est la perte de capacité en laissant l'accumulateur au repos (sans charge) pendant un temps donné.

A. *Les types de batteries*

Il existe différents types de batteries, on peut citer [70] :

- ◆ La batterie plomb acide ;
- ◆ La batterie nickel cadmium ;
- ◆ La batterie sodium chlorure de nickel ;
- ◆ La batterie lithium-ion ;
- ◆ La batterie zinc air.

Les batteries de technologie plomb acide sont actuellement les plus utilisées pour les applications photovoltaïques. Elles sont principalement avantagées par leurs faibles coûts pour des rendements satisfaisants. Leur inconvénient majeur est leur durée de vie qui est la plus courte des technologies comparées. La technologie Nickel-Cadmium (Ni-Cd) présente un coût plus élevé que les batteries au plomb, pour une durée de vie supérieure mais un rendement plus faible. Des efforts sont nécessaires pour faire du Ni-Cd une technologie concurrentielle pour l'application photovoltaïque. La technologie Lithium-ion (Li-ion) s'annonce comme la concurrente la plus prometteuse. Sa durée de vie et son rendement sont parmi les meilleurs des accumulateurs électrochimiques. Le coût est encore important par rapport à la technologie Plomb mais une baisse significative dans les prochaines années est attendue de sorte que le Li-ion devienne la technologie la plus intéressante pour les applications PV [70].

A.1. *Les batteries au plomb acide*

Les accumulateurs au plomb sont la transposition dans le domaine industriel, du voltamètre Pb/H₂SO₄/Pb. Une batterie est constituée d'un ensemble d'éléments de 2 V connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. La valeur usuelle de la tension d'une batterie de démarrage est de 12 V, soient six éléments intégrés dans un même bac, mais dans les systèmes de télécommunication la tension de batterie peut-être de 24 ou 48 V. Le standard qui s'est imposé dans le photovoltaïque pour applications en sites isolés est de 24 V [68].

II.1.5. **Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque**

Les avantages :

- Ressource gratuite et énorme potentiel réparti sur la terre ;
- Moyen décentralisé de production, autonomie ;
- Grande fiabilité et peu d'entretien (pas de pièces mobiles) ;

- Pas de pollution durant l'utilisation
- Grande souplesse de production, du milliwatt au Mégawatt.

Les inconvénients :

- Investissement élevé, nécessité d'aides, dépendance aux décisions politiques ;
- Disponibilité intermittente (réseau électrique ou stockage ou énergie d'appoint) ;
- Source diffuse, grande surface de capteur, difficulté d'intégration bâti/paysagères ;
- Technologie de fabrication poussée, énergivore, utilisation de produits chimiques ;
- Difficulté à recycler des composants qui doivent résister plus de 20 ans aux intempéries.

III. Dimensionnement d'une installation photovoltaïque

III.1. La consommation énergétique

Un système bien adapté nécessite l'évaluation de la puissance électrique des applications à alimenter. L'énergie nécessaire s'exprime par [71] :

$$E_c = P \times t \quad (\text{II.6})$$

Avec :

E_c : énergie consommée, P : puissance de fonctionnement de appareil,
 t : temps d'utilisation.

L'énergie est donc le produit de la puissance par le temps. La relation (II.6) permet de calculer les besoins journaliers en énergie.

En effet, comme un système photovoltaïque doit fournir son énergie durant une journée entière, il est naturel de prendre la période de 24 heures comme unité de temps.

L'énergie E , est donc l'énergie électrique consommée en 24 heures par l'application et s'exprime en Watt-heure par jour (Wh/j). On l'appelle aussi consommation journalière.

Pour calculer la consommation totale d'une installation, on calcule d'abord l'énergie électrique consommée en 24 heures par chaque équipement ou chaque fonction électrique et ensuite on les additionne.

Elle s'exprime par :

$$E_t = \sum P_i \times T_i \quad (\text{II.7})$$

Avec :

P_i : Puissance électrique d'un appareil « i » exprimée en Watt (W).

T_i : Durée d'utilisation de cet appareil « i » en heure par jour (h/j).

Lorsque tous les appareils fonctionnent à la même tension, la consommation journalière peut également se chiffrer en Ampère - heure par jour (Ah/j), unité pratique pour tous les systèmes liés à une batterie. Comme ces équipements fonctionnent en alternatif et que la consommation énergétique passe par un onduleur, il est nécessaire de tenir compte du rendement de l'onduleur pour évaluer la puissance requise, on écrit alors :

$$\text{Puissance corrigée} = \text{puissance des appareils à alimenter} \times \text{Rendement de l'onduleur} \quad (\text{II.8})$$

III.2. Dimensionnement d'un générateur photovoltaïque

Cette étape consiste à calculer la quantité de modules photovoltaïques que l'on devra posséder pour couvrir les besoins en électricité.

III.2.1. La puissance crête du générateur photovoltaïque

La puissance crête des panneaux à installer dépend de l'irradiation du lieu d'installation. On la calcule en appliquant la formule suivante [72] :

$$P_{ch} = \frac{E_c}{K \times I_r} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

P_{ch} : puissance crête de champs photovoltaïque en Watt crête (Wc) ;

E_c : énergie consommée par jour (Wh/jour) ;

I_r : Temps moyen d'ensoleillement journalier (h/jour).

- En Algérie $2 \geq I_r \leq 8$. On prend la moyenne de 5h/jour.

K : coefficient correcteur, ce coefficient tient compte :

- De l'incertitude météorologique.
- De l'inclinaison non corrigée des modules suivant la saison.
- Du point de fonctionnement des modules.
- Du rendement moyen charge/décharge de la batterie (90%).
- Du rendement de régulateur (95%).
- Des pertes dans les câbles et connexions pour les systèmes avec batterie.

K est en générale compris entre 0,55 et 0,75. La valeur souvent utilisée dans les calculs du système avec batterie est $k=0,65$.

III.2.2. La tension de fonctionnement du champ photovoltaïque

Le choix de la tension de fonctionnement dépend de la puissance crête du champ photovoltaïque en watt. De façon générale :

Tableau II.14 : Tension du champ en fonction de sa puissance crête [71].

Puissance crête (W _c)	Moins de 500W _c	De 501W _c à 2000W _c	De 2001W _c à 10000W _c	Plus de 10000W _c
Tension du champ (V)	12	24	48	96

III.2.3. Le nombre des panneaux photovoltaïques

A partir de la puissance crête des panneaux on peut déterminer le nombre de [72] :

- Panneaux solaires nécessaires à l'installation :

$$N_m = \frac{P_{ch}}{\text{Puissance crête unitaire panneau}} \quad (\text{II.10})$$

- Le nombre des modules connectés en série sera égale à :

$$N_s = \frac{V_{ch}}{V_n} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

V_{ch} : tension total du champ, V_n : la tension délivrée par un seul panneau photovoltaïque.

N_s : nombre de panneaux connectés en série.

- Le nombre des modules connectés en parallèles exprimé par :

$$N_p = \frac{N_m}{V_n} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

N_m : nombre total de panneaux photovoltaïques,

N_p : nombre de panneaux connectés en parallèle.

III.2.4. Dimensionnement d'un système de stockage

Si l'application doit fonctionner en direct sans stockage, on prendra un photo-générateur dont la puissance maximale à l'éclairement de travail correspond à la puissance de l'appareil.

Pour déterminer la capacité de l'accumulateur, multiplier la consommation électrique en ampère heure (Ah) de l'application par la durée d'autonomie désirée, et appliquer un coefficient de sécurité :

$$C(\text{Ah}) = \frac{\text{Conso du système (Ah)} * \text{durée d'auto en jours}}{0.6} \quad (\text{II.13})$$

Le coefficient de 0.6 est une valeur typique, qui dépend énormément de la technologie de l'accumulateur, et surtout de la réduction de sa capacité de stockage aux températures basses. Introduire ce coefficient revient à dire que la capacité réellement disponible sur le terrain est à tout moment égale à 60 % de la capacité nominale. On appelle capacité utile cette capacité réduite [70] :

$$\text{Capacité utile} = \text{Capacité nominale} * \text{pourcentage utile} \quad (\text{II.14})$$

CONCLUSION

Après avoir étudié profondément les différentes sources d'énergie renouvelable et non renouvelable, il s'avère que les énergies renouvelables sont de grandes utilités grâce à plusieurs raisons.

Les énergies renouvelables représentent une grande partie de notre avenir énergétique. Elles permettent le développement futur et sont une solution de nos problèmes énergétiques et environnementaux, car elles sont renouvelables comme leur nom l'indique, disponibles avec des quantités illimitées, respectueuses de l'environnement, donc peuvent se présenter comme un concurrent sérieux des énergies enfouies (non-renouvelables).

La comparaison de ces énergies selon plusieurs facteurs intervenants nous a guidé à choisir le système solaire photovoltaïque comme une solution appropriée à notre cas d'étude. C'est un système très fiable, silencieux et rentable dans les régions éloignées. Il peut être élargi à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité et constitue une source propre qui peut convenir à toute une gamme d'application telle que l'épuration des eaux usées.



CHAPITRE III :

ADAPTATION DU TYPE D'ÉNERGIE
RENOUVELABLE À LA CHAÎNE
D'ÉPURATION ÉTUDIÉE.

INTRODUCTION

Pour pouvoir étudier un projet de réalisation d'une station d'épuration ou proposer une chaîne de traitement des eaux usées, il faut au préalable disposer de certaines données de bases requises pour le dimensionnement de la station d'épuration tel que : le nombre d'équivalent habitant (EH), le débit total journalier, le débit moyen horaire, les débits de pointe en temps sec et en temps de pluie, les charges polluantes (DBO₅, MES ...).

Une station d'épuration comprend un ensemble des filières dont ils ont besoin d'énergie. Elle est composée généralement : d'un poste de relevage, un prétraitement, un traitement biologique, un traitement tertiaire pour des améliorations en terme de qualité et un traitement des boues.

Dans ce chapitre nous allons, dans un premier temps, étudier, dimensionner et comparer notre système d'épuration à base de deux procédés que nous avons étudiés dans le (chapitre 1), en fonction de notre zone d'étude (collectivité rurale de 2000 EH). Ensuite, nous allons faire le calcul en besoins énergétiques pour alimenter la chaîne d'épuration par une énergie solaire photovoltaïque. Sur la base de cette énergie nous allons choisir le procédé le plus adéquat à notre cas étudié.

I. Evaluation des données de bases de dimensionnement

I.1. Estimation de la charge hydraulique

I.1.1. Débit moyen journalier

Le débit d'eaux usées domestiques de temps sec d'une station d'épuration dépend essentiellement de la consommation moyenne journalière d'eau potable et le nombre d'équivalent habitant.

La consommation moyenne journalière varie en fonction de plusieurs paramètres (la disponibilité de la ressource, le niveau de vie, la culture des populations ...), dans notre cas elle est estimée à 120 l/j/hab. Et pour 2000 équivalents habitant on a :

$$Q_{jep} = D \times N \quad (III.1)$$

Avec : Q_{jep} : Débit journalier en eau potable en (l/j), D : La dotation (l/hab/j),

N : Nombre d'habitant (hab).

AN :	$Q_{jep} = 120 \times 2000 = 240000 \text{ l/j} = 240 \text{ m}^3/\text{j}$
------	---

Le taux de restitution des eaux usées domestiques est généralement compris entre 70 et 80% des eaux consommées, dans notre cas nous le prenons égal à 80%.

Le débit journalier d'eaux usées est donné par :

$$Q_{\text{jeu}} = Q_{\text{jep}} \times R \quad (\text{III.2})$$

AN :	$Q_{\text{jeu}} = 240000 \times 0,8 = 192000 \text{ l/j} = \mathbf{192 \text{ m}^3/\text{j}}$
------	---

Avec : Q_{jeu} : débit d'eaux usées journalier (m^3/j), R : taux de restitution (0,8).

I.1.2. Débit moyen horaire

Le débit moyen horaire est définie par :

$$Q_{\text{mh}} = \frac{Q_{\text{jeu}}}{24} \quad (\text{III.3})$$

AN :	$Q_{\text{mh}} = \frac{192}{24} = \mathbf{8 \text{ m}^3/\text{h}}$
------	--

I.1.3. Débit de pointe

Du fait des activités et des modes de vie, on constate que les débits d'eaux usées se caractérisent par des pointes à certaines périodes de la journée. Le débit de pointe de temps sec est défini par la relation :

$$Q_p = C_p \times Q_{\text{mh}} \quad (\text{III.4})$$

Avec : C_p : coefficient de pointe.

Nous avons : $Q_{\text{mj}} = 192000 \text{ l/j} = \mathbf{2,22 \text{ l/s}} < \mathbf{2,8}$

Alors : nous prenons directement $C_p = \mathbf{3}$

AN :	$Q_p = 3 \times 2,22 = \mathbf{6.66 \text{ l/s}}$
------	---

I.1.4. Débit diurne

Ce débit correspond à la période diurne dans laquelle la station reçoit le plus grand volume, Il est défini par :

$$Q_d = \frac{Q_{\text{jeu}}}{16} \quad (\text{III.5})$$

AN :	$Q_d = \frac{192}{16} = \mathbf{12 \text{ m}^3/\text{h}}$
------	---

I.2. Estimation de la charge polluante

Pour l'estimation de la charge polluante journalière, on utilise le **tableau III.1** qui nous donne la quantité moyenne journalière de la pollution produite par personne.

Tableau III.1 : La pollution journalière par personne.

Paramètre de pollution	La valeur en (g/hab/j)
MES	70 à 90
DBO ₅	60 à 70
DCO	120 à 180
NTK	15 à 17
P	4

Puisque nous n'avons pas les concentrations des paramètres de pollution, nous allons travailler avec les valeurs du tableau (III.1) et le nombre d'équivalent habitant pour le calcul des charges polluantes.

Comme nous avons une consommation journalière de 120 l/j/hab, donc nous prenons les valeurs minimales du tableau.

I.2.1. Charges polluantes journalières et leur concentration

- La charge polluante journalière de MES est calculé sur la base de 70 g/hab/j ce qui donne :

$$\text{MES (kg/j)} = 70 \times 2000 \times 10^{-3} = \mathbf{140 \text{ kg/j.}}$$

- La charge polluante journalière de DBO₅ est calculé sur la base de 60 g/hab/j ce qui donne :

$$\text{DBO}_5 \text{ (kg/j)} = 60 \times 2000 \times 10^{-3} = \mathbf{120 \text{ kg/j.}}$$

- La charge polluante journalière de DCO est calculé sur la base de 120 g/hab/j ce qui donne :

$$\text{DCO (kg/j)} = 120 \times 2000 \times 10^{-3} = \mathbf{240 \text{ kg/j.}}$$

- La charge polluante journalière de NTK est calculé sur la base de 15 g/hab/j ce qui donne :

$$\text{NTK (kg/j)} = 15 \times 2000 \times 10^{-3} = \mathbf{30 \text{ kg/j.}}$$

- La charge polluante journalière de P est calculé sur la base de 4 g/hab/j ce qui donne :

$$\text{P (kg/j)} = 4 \times 2000 \times 10^{-3} = \mathbf{8 \text{ kg/j.}}$$

➤ Les concentrations des charges précédentes sont :

$$\blacksquare [\text{MES mg/l}] = \frac{\text{MES (mg/j)}}{Q_{\text{jeu}} (\text{l/j})} = \frac{140 \times 10^6}{192000} = \mathbf{729,2 \text{ mg/l.}}$$

$$\blacksquare [\text{DBO}_5 \text{ mg/l}] = \frac{\text{DBO}_5 (\text{mg/j})}{Q_{\text{jeu}} (\text{l/j})} = \frac{120 \times 10^6}{192000} = \mathbf{625 \text{ mg/l.}}$$

$$\blacksquare [\text{DCO mg/l}] = \frac{\text{DCO (mg/j)}}{Q_{\text{jeu}} (\text{l/j})} = \frac{240 \times 10^6}{192000} = \mathbf{1250 \text{ mg/l.}}$$

$$\blacksquare [\text{NTK mg/l}] = \frac{\text{NTK (mg/j)}}{Q_{\text{jeu}} (\text{l/j})} = \frac{30 \times 10^6}{192000} = \mathbf{156,3 \text{ mg/l.}}$$

$$\blacksquare [\text{P mg/l}] = \frac{\text{P (mg/j)}}{Q_{\text{jeu}} (\text{l/j})} = \frac{8 \times 10^6}{192000} = \mathbf{41,7 \text{ mg/l.}}$$

I.3. Résumé des charges hydrauliques et charges polluantes arrivant à la STEP

Les charges hydrauliques et polluantes sont très essentielles, elles représentent les paramètres de base pour le dimensionnement d'une station d'épuration.

Les paramètres de notre dimensionnement sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableau III.2 : Charges hydrauliques arrivant à la STEP.

Charges hydrauliques	Unités		
	m ³ /j	m ³ /h	l/s
Débit moyen Q _m	192	8	2,22
Débit de pointe Q _p	-	24	6,66

Tableau III.3 : Charges polluantes / Concentrations arrivant à la STEP.

Paramètres de pollution	Charges polluantes journalières (kg/j)	Concentrations (mg/l)
MES	140	729,2
DBO ₅	120	625
DCO	240	1250
NTK	30	156,3
P	8	41,7

I.4. Normes de rejets

Les eaux usées se caractérisant par des paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Elles ne doivent être rejetées dans le milieu récepteur que lorsqu'elles correspondent à des normes fixées par voie réglementaires pour la préservation de la santé publique et de l'environnement. Pour cela, les eaux usées sont acheminées vers une station d'épuration où elles subissent plusieurs phases de traitement.

Selon le décret exécutif paru en juillet 1993 réglementant les rejets des eaux domestiques après le traitement, les valeurs limites maximales de la concentration sont :

Tableau III.4 : Normes de rejet dans le milieu récepteur (Valeurs limites maximales).

Paramètres	Unités	Valeurs maximales
Température	°C	30
PH	/	5.5 à 8.5
MES	mg/l	30
DBO ₅	mg/l	40
DCO	mg/l	120
NTK	mg/l	40
P	mg/l	2

(Source : Journal officiel N° 46, 1993)

I.5. Rendement épuratoire

$$\eta_e = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (\text{III.6})$$

Avec :

C_i : concentration en MES à l'entrée de la station (729,2 mg/l),

C_f : concentration en MES à la sortie de la station (30 mg/l, est une norme), (voir le tableau III.4).

AN :	$\eta_e = \frac{729,2 - 30}{729,2} \times 100 = 96 \%$
------	--

II. Dimensionnement des ouvrages de la station d'épuration

II.1. Le poste de relevage

Un poste de relevage sert à relever les eaux usées pour les transférer d'un point bas vers un point plus haut en fonction de la topographie du terrain. Il peut être placé :

- en amont de la STEP (prétraitement, traitement ...) si celle-ci est plus élevée que l'habitation ;
- entre la chaîne de traitement un dispositif qui doit être surélevé par rapport aux autres dispositifs pour des raisons topographiques du terrain.
- en sortie de traitement pour amener les eaux usées à exutoire.

Les postes de relevages sont de différente nature en fonction :

- de la composition des effluents à pomper (eaux claires, ou à l'inverse, eaux chargées, présence de corps solides, de filasses, de matières minérales, ...);
- du débit à évacuer;
- de la dénivelée à vaincre;
- de l'éloignement de la station par rapport au point de rejet (relevage ou refoulement).

Ces différentes caractéristiques vont conditionner le dimensionnement de l'ouvrage.

Une ou deux pompes placées à l'intérieur de l'ouvrage refoulent ces eaux, dans notre cas étudié le poste de relevage sera équipé par une pompe, en raison du faible débit. Mais pour assurer le bon fonctionnement, il faut avoir une deuxième pompe en stock.

L'ouvrage se présente sous la forme d'un parallélépipède vertical. Il sera réalisé en béton. Le dimensionnement de la bache de pompage est basé sur le volume utile (V_u) calculé par la formule [29] :

$$V_u = \frac{Q_p}{4 \cdot n \cdot z} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

V_u : le volume utile de la bache en (m^3),

Q_p : débit de pointe horaire en (m^3/h);

z : nombre maximal de démarrage par heure est fixé de 6 à 10 en fonction de la puissance de la pompe;

n : nombre de pompes.

Dans notre cas, on fixe $z=6$, donc le volume utile sera :

AN :	$V_u = \frac{24}{4 \cdot 1 \cdot 6} = 1 \text{ m}^3$
------	--

Selon le calcul ci-dessus, le volume utile de la bache est très petit, en raison du faible débit. Donc lors de la réalisation il faut prendre en compte les espaces nécessaires requis pour assurer une certaine aisance lors des interventions des opérateurs.

II.2. Ouvrage de prétraitement

Les eaux brutes doivent subir avant leur traitement un prétraitement qui comporte un certains nombres d'opérations uniquement physiques. Cette étape est destinée à extraire de l'eau brute la plus grande quantité possible d'éléments où leurs dimensions constitueraient une gêne pour les traitements ultérieurs.

II.2.1. Le dégrillage

Le dégrillage est le premier poste de traitement pour les eaux résiduaires, il permet de séparer et évacuer facilement les matières volumineuses charriées par l'eau brute afin de protéger les ouvrages en aval contre l'arrivée de gros objets susceptibles de provoquer des bouchages (nuire l'efficacité du traitement).

Pour notre cas, petite localité, un dégrilleur à grilles manuelles suffit, et il sera mis en place à la tête de la station afin de limiter le maximum les dépenses énergétiques.

Ce type de dégrillage est composé de barreaux droits de section circulaire ou rectangulaire généralement inclinées sur l'horizontale (60° à 80°) [27].

La vitesse à travers les grilles doit être comprise entre 0,6 et 1,2 (m/s) [26]. Pour notre dimensionnement on prendra une vitesse de 0,6 m/s (pour un débit max) et on effectuera les calculs.

A. La section de la grille

La section de la grille est donnée par la formule [29] :

$$S_G \text{ (m}^2\text{)} = \frac{Q_p}{v \cdot \theta \cdot c} \quad \text{(III.8)}$$

Avec :

Q_p : Débit de point (m^3/s) ;

V : La vitesse de passage à travers la grille (m/s) ;

θ : Coefficient de passage libre à travers la grille donné par la relation :

$$\theta = \frac{e}{e+E} \quad \text{(III.9)}$$

e : espacement entre les barreaux (m), E : épaisseur des barreaux (m),

C : coefficient de colmatage dépend de la qualité de l'eau et du système de reprise des résidus.

Généralement : $0.1 < C < 0.3$ pour un dégrillage manuel, on le prend 0,25.

On prend l'espacement entre barreaux $e = 25$ mm pour un dégrilleur moyen (tableau I.5)) et l'épaisseur $E = 8$ mm (pour permettre une perte de charge minimale).

Alors:

$$Q_p = 6,66 \cdot 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}.$$

$$S_G = \frac{6,66 \times 10^{-3}}{0,6 \times 0,78 \times 0,25} = \mathbf{0,057 \text{ m}^2}$$

$$V = 0,6 \text{ (m/s)}.$$

$$\theta = 25/(25+8) = 0,78.$$

$$C = 0,25.$$

Pour des raisons pratiques, nous prenons la section $S_G = \mathbf{0,06 \text{ m}^2}$.

B. La perte de charge

KIRSCHMER a établi une relation entre les pertes de charge et le coefficient de forme des barreaux et l'angle de la grille avec l'horizontale [99].

$$\Delta H = \beta \cdot \left(\frac{E}{e}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{V_{\max}^2}{2 \cdot g}\right) \cdot \sin(\alpha) \quad \text{(III.10)}$$

Avec :

ΔH : la perte de charge (m) ;

E/e : Épaisseur des barreaux (m) / espacement entre les barreaux (m) ;

V : la vitesse maximale de passage à travers la grille (m/s) ;

α : angle d'inclinaison de la grille par rapport à l'horizontal en $^\circ$;

g : accélération de la pesanteur ($9,81 \text{ m/s}^2$) ;

β : facteur dépendant de la forme des barreaux.

Tableau III.5 : les valeurs de β dépendant de la forme des barreaux [99].

Forme des barres	Rectangulaires	Arrondies	Arrondies amont	Arrondies amont et aval
β	2,42	1,79	1,83	1,67

On prend une forme rectangulaire des barreaux ($\beta = 2,42$), et on a un angle de 70° , alors :

$$\alpha = 70^\circ \rightarrow \Delta H = 2,42 \cdot \left(\frac{8}{25}\right)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{1,2^2}{2 \cdot 9,81}\right) \cdot \sin(70) = 0,039 \cdot \sin(70) = \mathbf{0,037 \text{ m}}$$

C. Dimensionnement de la grille

❖ La longueur mouillée de la grille est donnée par la relation suivante :

$$L_0 = \frac{t}{\sin(\alpha)} \quad (\text{III.11})$$

Avec : t : tirant d'eau (m). On le prend 20 cm.

AN :	$L_0 = 0,2 / \sin(70) = \mathbf{0,21 \text{ m}}$
------	--

❖ La largeur de la grille est donnée par :

$$l_0 = \frac{S}{L_0} \quad (\text{III.12})$$

AN :	$l_0 = \frac{0,06}{0,21} = \mathbf{0,29 \text{ m}}$
------	---

❖ La hauteur de la grille est donnée par :

$$H = \frac{S}{l_0} \quad (\text{III.13})$$

AN :	$H = \frac{0,06}{0,29} = \mathbf{0,21 \text{ m}}$
------	---

D. Nombre de barreaux

Pour le dimensionnement des barreaux, on détermine d'abord le nombre des espacements entre les barreaux de la grille.

On a : θ : l'efficacité = $\frac{S_{\text{vide}}}{S_{\text{grille}}} = 0,78$

Alors : $S_{\text{vide}} = 0,78 \cdot S_{\text{grille}} = 0,78 \times 0,06 = \mathbf{0,047 \text{ m}^2}$

Et : La largeur totale de l'entrefer à travers la grille est :

$$A = \frac{S_{\text{vide}}}{t} = \frac{0,047}{20 \cdot 10^{-2}} = \mathbf{0,24 \text{ m}}$$

Or : L'espacement entre les barreaux est : $e = 25 \text{ mm}$, donc le nombre d'espacement est :

$$N_{\text{esp}} = \frac{A}{e} = \frac{0,24}{25 \cdot 10^{-3}} = \mathbf{10 \text{ espacements.}}$$

$$N_{\text{esp}} = N_b + 1$$

Donc on obtient le nombre de barreaux : $N_b = N_{\text{esp}} - 1 = \mathbf{9 \text{ barreaux.}}$

E. Volume des déchets retenus

Le volume des déchets retenus dans notre cas sera ainsi estimé comme suit :

$$V \left(\frac{\text{m}^3}{\text{j}} \right) = \frac{\text{Nbr d'ahabitant} \times \text{volume retenue}}{365 \text{ j}} \quad (\text{III.13})$$

Pour une eau usée urbaine, le volume de déchets récupérés par les grilles par an est estimé à [28] :

- ❖ **2 à 5 l/hab/an** pour une grille grossière ;
- ❖ **5 à 10 l/hab/an** pour une grille fine.

Le volume des déchets retenus par les grilles dépend :

- ❖ du débit de l'effluent ;
- ❖ de la finesse du dégrillage.

Pour notre station on prend **5 l/hab/an** et on calcul : $V = \frac{2000 \times 5 \times 10^{-3}}{365} = \mathbf{0,027 \text{ m}^3/\text{j}}$

F. Récapitulatif de dimensionnement du dégrilleur

Tableau III.6 : Récapitulatif de dimensionnement du dégrilleur.

Paramètres	Valeurs	unités
La section de la grille (S_G)	0,06	m^2
La perte de charge (ΔH)	0,037	m
La longueur mouillée de la grille (L_0)	0,21	m
La largeur de la grille (l_0)	0,29	m
La hauteur de la grille (H)	0,21	m
Le nombre de barreaux (N_b)	9	-
Le volume des déchets retenus	0,027	m^3/j

Remarque :

En fonction de ses dimensions, un panier dégrilleur sera une bonne solution. Le choix peut se faire selon les modèles commercialisés adaptables à notre station.

II.2.2. Le dessablage-déshuilage

Cette filière de traitement a pour but d'extraire une proportion appréciable des impuretés que contiennent les eaux usées en provoquant leur remontée à la surface et en les écumant, tel est le cas notamment pour les graisses et les huiles de densité inférieure à celle de l'eau.

Il existe différents types de dessableurs-déshuileurs, dans notre cas de 2000EH on va choisir un dessableur couloir à section rectangulaire. L'utilisation de ce type de dessableur est limitée aux petites installations.

C'est un canal muni d'une goulotte de recueil des sables dans laquelle on ralentit la vitesse de l'eau à moins de 0,3 (m/s) (vitesse du passage), de façon à éviter le réentraînement par le courant des particules déposées.

Ce prétraitement nous permet d'éliminer les particules de petites tailles contenues dans les eaux usées (entre 0,2 et 20 mm) [16]. Ce qui réduira la teneur de la partie minérale de MES et évitera l'ensablement des filières ultérieures.

Les sables sont périodiquement extraits de façon manuelle du canal longitudinal à l'aide d'une pelle manuelle, Cette opération nous conduit à prévoir deux dessableurs à couloirs parallèles fonctionnant alternativement. C'est à dire l'un en fonctionnement et l'autre en nettoyage. Soit :

- Une vitesse ascensionnelle (V_{asc}) de 15 m/h.
- Un temps de séjour de 10 min.

A. Volume du canal

Le volume est donné par la formule suivante :

$$V = Q_p \times T_s \quad (\text{III.14})$$

Avec : Q_p : débit de pointe par temps sec en (m^3/h), T_s : temps de séjour en (min).

AN :	$V = 24 \times \frac{10}{60} = 4 \text{ m}^3$
------	---

B. Surface du canal

La surface est déterminée de la manière suivante :

$$S = \frac{Q_p}{V_{asc}} \quad (\text{III.15})$$

Avec : V_{asc} : vitesse ascensionnelle en (m/h).

AN :	$S = \frac{24}{15} = 1,6 \text{ m}^2$
------	---------------------------------------

C. Hauteur du canal

La hauteur est donnée par la relation :

$$H = \frac{V}{S} \quad \text{Ou} \quad H = V_{asc} \times T_s \quad (\text{III.16})$$

AN :	$H = \frac{4}{1,6} = 2,5 \text{ m}$
------	-------------------------------------

Alors : on détermine la largeur (l) et la longueur (L) :

$$l = \sqrt{\frac{S}{2}} \quad \text{et} \quad L = 2 \times l \quad [16].$$

Nous adapterons deux dessableur-deshuileurs de dimensions unitaires suivantes :

- Hauteur : 2,5 m.
- Largeur : $l = \sqrt{\frac{1,6}{2}} = 0,89$ m.
- Longueur : $L = 2 \times 0,89 = 1,78$ m.

➤ Valeur à prendre en compte

$$1,25 \text{ m} \leq \frac{V}{S} \leq 2,5 \text{ m} \quad (\text{Condition vérifiée puisque on a le rapport } \frac{V}{S} = 2,5 \text{ m}).$$

➤ Quantité de matières éliminées dans le dessableur

- Les matières minérales totales = $0,2 \times 140 = 28$ Kg/j.
- Les matières minérales éliminées par le dessableur = $0,8 \times 28 = 22,4$ kg/j.
- Les matières minérales restantes = $28 - 22,4 = 5,6$ kg/j.
- MES sortantes du dessableur = $(0,8 \times 140) + 5,6 = 117,6$ kg/j.

II.3. Traitement biologique

Pour cette phase, qui consiste en une réduction et/ou élimination de la pollution organique, nous allons faire le dimensionnement pour deux variantes : 1) variante 1 lit bactérien ; 2) variante 2 lagunage naturel. Ensuite, nous allons faire la comparaison qui nous permettra de choisir un procédé parmi les deux.

II.3.1. Variante 1 : Lit bactérien

II.3.1.1. Traitement Primaire

Les cultures fixées sur supports grossiers nécessitent un traitement primaire en tête ne générant pas d'effluents septiques à traiter. Généralement, en tête des lits bactériens seront prévus des décanteurs-digesteurs.

A. Le décanteur-digester

Cet ouvrage correspond surtout à un bon traitement primaire pour les filières sensibles au colmatage à l'aval.

Le décanteur digester assure, dans deux compartiments séparés, la décantation des matières en suspension et la digestion anaérobie de la fraction organique des boues décantées. La digestion (ou fermentation) est plus ou moins avancée selon le temps de séjour des particules solides décantées.

Pour le dimensionnement du décanteur—digester dans une station d'épuration, il est recommandé de prendre comme données de base une vitesse ascensionnelle de décantation entre 1 et 1,5 m/h et un temps de séjour maximal de 1,5 à 2 h.

Nous avons pris pour notre cas (2000 EH) une vitesse ascensionnelle de 1m/h et un temps de séjour de 1,5 h. Sur la base de ces données nous avons fait les calculs suivants :

A.1. Le débit du décanteur : (Q_d)

Pour le calcul de ce débit en tenant compte du débit de recirculation, le calcul ce fait par la formule suivante :

$$Q_d = Q_p \times (1 + R) \quad \text{(III.15)}$$

Avec : Q_p : débit de pointe (m^3/h) ;

R : taux de recirculation (pour le calcul voir poste de recirculation).

Donc : $Q_d = 24 \times 3 = 72 \text{ m}^3/h$
--

A.2. Le volume du décanteur : (V_d)

$$V_d = Q_d \times T_s \quad V_d = 72 \times 1,5 = 108 \text{ m}^3$$

A.3. La surface du décanteur : (S_d)

$$S_d = \frac{Q_d}{V_{asc}} \quad S_d = \frac{72}{1} = 72 \text{ m}^2$$

A.4. Le diamètre du décanteur : (D_d)

$$S_d = \frac{\pi \times D_d^2}{4} \rightarrow D_d = \sqrt{\frac{4 \times S}{\pi}}$$

$$D_d = \sqrt{\frac{4 \times 72}{3,14}} = 9,57 \text{ m}$$

- On prend un diamètre normalisé du décanteur : $D_{nor} = 10 \text{ m}$.

A.5. La surface du décanteur avec le diamètre normalisé : (S'_d)

$$S'_d = \pi \times \frac{10^2}{4} = 78,54 \text{ m}^2 = 79 \text{ m}^2$$

A.6. Le volume de digesteur : (V'_d)

D'après le tableau (**annexe 1**), Le volume de digestion varie de 1 à $1,5 \times V_{admis}$

On prend un volume de digestion de $1,5 \times V_{admis}$ et on calcul :

$$V'_d = 1,5 \times V_{admis} \quad \text{(III.16)}$$

Avec : $V_{admis} = \text{nombre d'habitant} \times \text{Consommation}$.

Alors, pour 2000 EH le volume de digesteur est :

$$V'_d = 1,5 \times 2000 \times 120 = 360000 \text{ (l)} = 360 \text{ m}^3$$

A.7. Le volume de décanteur-digesteur

Le volume du décanteur-digesteur est égal à la somme de volume de décanteur et le volume correspond à la digestion :

$$V = V_d + V'_d \quad (\text{III.17})$$

$$V = 108 + 360 = 468 \text{ m}^3$$

Donc on prévoit un décanteur-digesteur avec les caractéristiques suivantes :

Tableau III.7 : caractéristiques de décanteur-digesteur.

Caractéristiques	Valeurs
La surface (m ²)	79
Le diamètre (m)	10
Le volume (m ³)	468
La hauteur (m)	6

L'objectif attendu de la décantation primaire par un décanteur-digesteur est la réduction des MES de 60% ce qui correspond à un abattement sur la matière organique carbonée exprimée par la DBO₅ de l'ordre de 30%, ainsi une réduction de la DCO de l'ordre de 30%.

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.8 : Les charges polluantes à l'entrée et la sortie du décanteur-digesteur.

Charges polluantes	MES en (kg/j)	DBO ₅ en (kg/j)	DCO en (kg/j)
Charges polluantes à l'entrée du décanteur primaire en kg/j	117,6	120	240
Charges polluantes éliminées en kg/j	70,56	36	72
Charges polluantes à la sortie du décanteur primaire en kg/j	47,04	84	168

II.3.1.2. Dimensionnement du lit bactérien

Le lit bactérien est une filière de traitement biologique aérobie à biomasse fixée, consiste à alimenter en eau usée préalablement décantée, un ouvrage contenant une masse de matériaux servant de support aux microorganismes épurateurs qui y forment un film biologique, tout en maintenant, dans la plupart des cas, une aération naturelle.

La masse de matériaux du lit bactérien se compose soit : de cailloux, de pouzzolane (roche volcanique) ou encore de matériaux plastiques. Les eaux usées sont distribuées sur le matériau filtrant par un sprinkler (force motrice de l'eau), et s'écoulent au travers du lit sous l'effet de la pesanteur.

Le film biologique se décroche au fur et à mesure que l'eau percole. En sortie du lit bactérien, est recueilli un mélange d'eau traitée et de biofilm. Ce dernier est piégé au niveau d'un décanteur secondaire sous forme de boues et l'eau traitée rejoint le milieu naturel.

Il est indispensable d'avoir un décanteur-digester afin de limiter le colmatage du matériau dans les supports et aussi de limiter l'accumulation de dépôts dans les ouvrages et de garantir la stabilisation des boues primaires piégées et des boues biologiques en excès. La recirculation des boues vers le décanteur-digester est essentielle. Cette dernière a plusieurs objectifs : la dilution des eaux brute dont la concentration est trop élevée pour assurer un traitement secondaire efficace, évité les périodes de non alimentation du lit ...etc.

Nous allons dimensionner un lit bactérien de forte charge avec un matériau traditionnel (pouzzolane). D'après le tableau (**annexe 1**) on prend comme donnée de base :

- La hauteur de lit « matériau traditionnel » : $H = 2,5$ m.
- La charge organique : $0,7$ kg DBO₅/m³/j.
- La charge hydraulique : $1,05$ m³/m²/h.

A. Calcul de la surface du lit

$$Ch = \frac{Q_{mj} + Q_r}{s} \rightarrow S = \frac{Q_{mj} (1+R)}{Ch} \quad (\text{III.18})$$

Avec : **Ch** : la charge hydraulique (m³/m²/j) ;

R : taux de recirculation (%) (200% d'après le tableau (Annexe 1)) ;

Q_{mj} : débit moyen journalier de temps sec en (m³/j).

$$S = \frac{192 \times (1+2)}{1,05 \times 24} = 22,86 \text{ m}^2$$

B. Calcul du volume rempli du lit

$$V_L = S \times H \quad V_L = 22,86 \times 2,5 = 57,15 \text{ m}^3$$

C. Calcul de la surface unitaire d'un lit

Pour notre cas on va placer deux lits bactériens identiques en série, donc la surface unitaire d'un lit devient :

$$S_u = \frac{S}{N} \quad (\text{III.19})$$

Avec : **S_u** : la surface unitaire d'un lit en (m²), **N** : nombre de lits choisi.

$$S_u = \frac{22,86}{2} = 11,43 \text{ m}^2$$

D. Calcul du diamètre unitaire du lit

Le lit bactérien est de forme circulaire. Le calcul ce fait par la formule :

$$D_u = \sqrt{\frac{4 \times S_u}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 11,43}{\pi}} = 3,8 \text{ m}$$

Avec : **D_u** : diamètre unitaire d'un lit bactérien (m).

E. Calcul de la charge volumique

La charge en DBO₅ (la charge volumique) du lit bactérien traditionnel, exprimée en g/m³ par jour, est calculée en utilisant la DBO₅ brute de l'effluent primaire sans tenir compte de la contribution de la DBO₅ des eaux recyclées.

$$C_v = \frac{Q \times DBO_5^*}{V} \quad (\text{III.20})$$

Avec : C_v : la charge en DBO₅ (kg DBO₅/m³/j), Q : débit de l'eau usée en m³/j,

DBO₅^{*} : DBO de l'eau brute après décantation primaire en kg/m³,

V : volume rempli du lit en (m³).

$$DBO_5^* = 625 - (625 \times 0,3) = 437,5 \text{ mg/l}$$

$$C_v = \frac{192 \times 437,5 \times 10^{-3}}{57,15} = 1,47 \text{ kg DBO}_5/\text{m}^3/\text{j}$$

F. Calcul du rendement épuratoire

La concentration de la DBO₅ à l'entrée de la station est égale 625 mg /l, après une décantation primaire (décanteur-digesteur) qui élimine 30% de la DBO₅, il reste à l'entrée du lit bactérien, une concentration de DBO₅ égale 437,5 mg/l,

Comme on désire une DBO₅ de sortie de l'ordre de 30 mg /l, le rendement d'épuration est alors égale a :

$$\eta_e = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 = \frac{437,5 - 30}{437,5} \times 100 = 93,14 \%$$

II.3.1.3. Dimensionnement de la recirculation

Dans la plupart des installations, l'effluent traité subit un retour en tête du lit bactérien. Cette opération est appelée recyclage, ou parfois « recirculation ». Le rapport entre le débit recyclé et le débit de l'effluent est appelé taux de recyclage. Dans les lits bactériens à remplissage traditionnel, le recyclage pourrait améliorer les performances d'élimination de la DBO₅. Il a plusieurs objectif tel que : la dilution des eaux brutes dont la concentration est trop élevée pour assurer un traitement secondaire efficace, d'augmenter le rendement par des passages successifs dans le massif filtrant et l'évitement des périodes de non alimentation du lit [36].

Selon le tableau (**Annexe 1**), le taux de recirculation dans un lit bactérien pour une localité de 2000 EH est de 200%.

Le taux de recirculation r est égal au rapport du débit de recirculation sur le débit de pointe entrant dans le dispositif :

$$R = \frac{Q_r}{Q_p} \quad (\text{III.21})$$

Donc le débit de la recirculation est :

$$Q_R = R \times Q_p = 2 \times 24 = 48 \text{ m}^3/\text{h}$$

II.3.1.4. Dimensionnement du clarificateur

Un clarificateur, que l'on appelle également un décanteur secondaire, est très important dans une station d'épuration. Il permet de séparer l'eau épurée et les boues par une décantation gravitaire. Les boues sont récupérées au fond du clarificateur par un pont racleur ou suceur. L'eau traitée est évacuée par surverse et peut être rejetée dans le milieu naturel.

Notre clarificateur se présente sous la forme d'un bassin circulaire équipé d'un racleur, fixé sur un axe placé au centre du bassin. Son dimensionnement consiste à déterminer son volume et sa surface nécessaire pour le fonctionnement.

Le clarificateur doit être dimensionné en tenant compte de la recirculation.

Selon le tableau (**Annexe 1**), les données de base pour dimensionner un clarificateur associé avec un lit bactérien sont :

- Vitesse ascensionnelle $V_{asc} = 1$ m/h.
- Hauteur périphérique $H_{per} = 2,5$ m (réseau unitaire).
- Pente du radier (statique/raclé) : $I_b = 0,02$ %.

A. Calcul de la surface du clarificateur

La surface dépend du débit et le débit recirculation, donc on doit le déterminer :

$$Q_c = Q_p + Q_R = 24 + 48 = 72 \text{ m}^3/\text{h}$$

Alors, la surface est égale :

$$Q_c = V_{asc} \times S_c \rightarrow S_c = \frac{Q_c}{V_{asc}}$$

$$S_c = \frac{72}{1} = 72 \text{ m}^2$$

B. Calcul de diamètre du clarificateur

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \times S_c}{\pi}}$$

$$D_c = \sqrt{\frac{4 \times 72}{\pi}} = 9,57 \text{ m}$$

On normalise le diamètre à 10 m et on recalcule la surface avec le nouveau diamètre :

$$D_{nor} = 10 \text{ m} \quad S'_c = \frac{\pi \times D_{nor}^2}{4} = \frac{\pi \times 10^2}{4} = 78,54 \text{ m}^2$$

C. Calcul de la profondeur d'eau

- La profondeur d'eau à la périphérique d'un clarificateur, elle est déterminée par :

$$H_{per} = w + \frac{I_b \times D_{nor}}{3} \quad (\text{III.22})$$

$$w = H_{\text{per}} \times \frac{I_b \times D_{\text{nor}}}{3} = 2,5 + \frac{0,02 \times 10}{3} = 2,57 \text{ m}$$

- La profondeur d'eau inférieure, elle est donnée par :

$$H_{\text{inf}} = w + \frac{2 \times (I_b \times D_{\text{nor}})}{3} \quad (\text{III.23})$$

$$H_{\text{inf}} = 2,5 + \frac{2 \times (0,02 \times 10)}{3} = 2,63 \text{ m}$$

A partir des deux profondeurs précédentes, on peut calculer la profondeur d'eau au milieu d'un clarificateur, la profondeur au milieu est donnée par :

$$H_m = \frac{H_{\text{per}} + H_{\text{inf}}}{2} \quad (\text{III.24})$$

$$H_m = \frac{2,57 + 2,63}{2} = 2,6 \text{ m}$$

D. Calcul de volume du clarificateur

$$V_c = S'_c \times H_m \quad (\text{III.25})$$

Avec : S'_c : la surface du clarificateur (m^2) ;

H_m : la profondeur au milieu du clarificateur (m).

$$V_c = 78,54 \times 2,6 = 204,3 \text{ m}^3$$

E. Calcul de temps de séjour du clarificateur

Le temps de séjour dans un clarificateur est donné par :

$$T_s = \frac{V_c}{Q_c} \quad (\text{III.26})$$

$$T_s = \frac{204,3}{72} = 2,84 \text{ h}$$

Donc on prévoit un clarificateur dont ses caractéristiques sont ci-dessous :

Tableau III.9 : Les caractéristiques du clarificateur.

Caractéristiques	valeurs
La surface (m^2)	78,54
Le volume (m^3)	204,3
La hauteur (m)	2,6
Le temps de séjour (h)	2,84

II.3.2. Variante 2 : Lagunage naturel

Le Lagunage naturel est une filière de traitement biologique à biomasse libre.

Dans le procédé de traitement de type lagunage naturel, la destruction de la pollution à traiter s'opère grâce à une succession et une association de processus physique et biologiques extrêmement large.

Le traitement est réalisé dans un ensemble de bassins creusés dans le sol ; une lagune primaire d'une profondeur de 5 m, une lagune secondaire d'une profondeur de 2 m et une lagune tertiaire d'une profondeur égale à 1,5 m.

Notre station d'épuration par lagunage sera composée, en plus des bassins de stabilisation, d'un dégrilleur et un dessableur comme ouvrage de prétraitement.

Le dimensionnement des bassins de lagunage fait l'objet de nombreuses méthodes ou formules conduisant en général à des résultats différents pour les mêmes hypothèses.

Il s'appuie sur les données de population, consommation d'eau potable, rejets d'eaux usées et charges de pollution spécifique.

Ci-après on présente les calculs pour le dimensionnement des paramètres principaux des lagunes pour l'épuration des eaux usées avec l'aération naturelle.

Les calculs de capacité des lagunes sont faits sur la base des données de départ suivantes :

- Débit moyen journalier : 192 m³/j.
- DBO₅ à l'entrée de la station : 625 mg/l.

Le degré de dégradation des matières organiques polluantes dans les bassins de lagunage à aération naturelle est : dans le bassin anaérobie 40-60%, de bassin facultatif 30-50% et de bassin de maturation 10-20% [73].

II.3.2.1. Dimensionnement du bassin anaérobie

Ces bassins servent au piégeage et la séparation gravitaire des matières à décanter des eaux usées brutes et à la décomposition des boues décantées par digestion anaérobie au fond des bassins. Elles permettent de réduire 40 à 60% de la charge en DBO₅ initiale avec un temps de séjour relativement court. La profondeur de ces bassins peut aller de 2 à 5 m. Ces types de bassins sont placés en tête de traitement afin de réduire la surface totale requise pour l'épuration.

Le dimensionnement des bassins anaérobies se base principalement sur la charge volumique, alors que la charge surfacique n'est qu'un critère de vérification. Le dimensionnement de ces bassins ce fait comme suit :

A. Le temps de séjour du bassin anaérobie

$$T_{S,A} = \left(\frac{1}{\beta \times K} \right) \times \log \left(\frac{L_0}{L_{S,A}} \right) \quad (\text{III.27})$$

Avec :

$T_{S,A}$: Temps de séjour des eaux usées dans le bassin anaérobie (jours) ;

β : Coefficient d'utilisation de la capacité des bassins de lagunage ; ($\beta=0,9$).

K : Constante de la vitesse de dégradation des polluants organiques ; ($K = 0,019 \text{ j}^{-1}$) à une température de 20°C .

$L_0 = \text{DBO}_{\text{totale}}$ des eaux usées brutes ; $\text{DBO}_{\text{totale}} = 625 \text{ mg/l}$.

$L_{S,A} = \text{DBO}_5$ résiduelle des eaux usées épurées à la sortie du bassin anaérobie, on l'adopte égale à 60% avec une élimination de 40%.

$$L_{S,A} = 0,6 \times L_0 \quad (\text{III.28})$$

$$L_{S,A} = 0,6 \times 625 = 375 \text{ mg/l}$$

$$T_{S,A} = \left(\frac{1}{0,9 \times 0,019} \right) \times \log \left(\frac{625}{375} \right) = 12,97 \text{ jours}$$

B. Le volume du bassin anaérobie

$$V_A = Q_{mj} \times T_{S,A} \quad (\text{III.29})$$

$$V_A = 192 \times 12,97 = 2490,24 \text{ m}^3$$

C. La surface du bassin anaérobie

$$S_A = \frac{V_A}{P_A} \quad (\text{III.30})$$

Avec : V_A : le volume du bassin anaérobie (m^3),

P_A : la profondeur du bassin anaérobie (nous fixons la profondeur $H = 5 \text{ m}$).

$$S_A = \frac{2490,24}{5} = 498,05 \text{ m}^2$$

Avec un ratio longueur/largeur = 2, notre bassin aura les dimensions suivantes [73] :

On a : $L/l = 2$, $L \times l = S_A$

Donc : $L = 2 \times l$, $2 \times l^2 = S_A$

Alors : $l = \sqrt{\frac{S_A}{2}}$, $L = \frac{S_A}{l}$

On obtient :

- Largeur (l) = $15,78 \approx 16 \text{ m}$
- Longueur (L) = $31,56 \approx 32 \text{ m}$
- Profondeur (H) = 5 m

II.3.2.2. Dimensionnement du bassin facultatif

En aval des bassins anaérobies, se trouvent des bassins de grandes dimensions, dits bassins facultatifs. Dans ces derniers, se déroule l'essentiel de la bio-épuration grâce à une synergie algo-bactérienne. La charge surfacique constitue dans le cas des bassins facultatifs le critère de base pour le dimensionnement.

Ces bassins qui ont une profondeur qui varie de 1 à 2m, jouent un rôle important pour la réduction des matières polluantes. Ils permettent de réduire 30 à 50% de la charge en DBO₅.

Le degré de dégradation des matières polluantes dans le bassin facultatif est adopté égal à 50% de DBO_{totale} des eaux usées dans sortant du bassin anaérobie.

$$L_{S,F} = L_{S,A} \times 0,5 = 375 \times 0,5 = \mathbf{187,5 \text{ mg/l}}$$

Avec : $L_{S,F}$: DBO₅ à la sortie du bassin facultatif (mg/l) ;

$L_{S,A}$: DBO₅ à la sortie du bassin anaérobie (mg/l).

A. Le temps de séjour du bassin facultatif

$$T_{S,F} = \left(\frac{1}{\beta \times K} \right) \times \log \left(\frac{L_{S,A}}{L_{S,F}} \right)$$

$$T_{S,F} = \left(\frac{1}{0,9 \times 0,019} \right) \times \log \left(\frac{375}{187,5} \right) = \mathbf{17,6 \text{ jours}}$$

B. Le volume du bassin facultatif

$$V_F = Q_{mj} \times T_{S,F}$$

$$V_F = 192 \times 17,6 = \mathbf{3379,2 \text{ m}^3}$$

C. La surface du bassin facultatif

$$S_F = \frac{V_F}{P_F} = \frac{3379,2}{2} = \mathbf{1689,6 \text{ m}^2}$$

Avec : V_F : le volume du bassin facultatif (m³),

P_F : la profondeur du bassin facultatif (nous fixons la profondeur H = 2 m).

Pour le calcul des dimensions, le ratio optimal pour un bon fonctionnement des bassins facultatifs est longueur/largeur = 3. Donc, notre bassin aura les dimensions suivantes [73] :

- Largeur (l) = 23,79 m ≈ **24 m**
- Longueur (L) = 71,02 m ≈ **71 m**
- Profondeur (H) = **2 m**

II.3.2.3. Dimensionnement du bassin de maturation

Les bassins de maturation revoient les effluents des bassins facultatifs. Ce sont des bassins entièrement aérobies, avec une faible profondeur (ne dépasse pas 1,5 m). Ces bassins assurent une bonne élimination des germes pathogènes et ainsi les eaux épurées seront favorables à une éventuelle utilisation en agriculture. L'abattement de la DBO_5 est beaucoup plus lent que les autres bassins.

Le degré de dégradation des matières polluantes dans ce bassin est adopté égal à 20% de DBO_{totale} des eaux sortant du bassin facultatif.

$$L_{S,M} = L_{S,F} \times 0,2 = 187,5 \times 0,2 = \mathbf{37,5 \text{ mg/l}}$$

Avec : $L_{S,M}$: DBO_5 à la sortie du bassin de maturation (mg/l) ;

$L_{S,F}$: DBO_5 à la sortie du bassin facultatif (mg/l).

A. Le temps de séjour du bassin de maturation

$$T_{S,M} = \left(\frac{1}{\beta \times K} \right) \times \log \left(\frac{L_{S,F}}{L_{S,M}} \right)$$

$$T_{S,M} = \left(\frac{1}{0,9 \times 0,019} \right) \times \log \left(\frac{387,5}{37,5} \right) = \mathbf{40,88 \text{ jours}}$$

B. Le volume du bassin de maturation

$$V_M = Q_{mj} \times T_{S,M}$$

$$V_M = 192 \times 40,88 = \mathbf{7848,96 \text{ m}^3}$$

C. La surface du bassin de maturation

$$S_M = \frac{V_M}{P_M} = \frac{7848,96}{1,5} = \mathbf{5232,64 \text{ m}^2}$$

Avec : V_M : le volume du bassin de maturation (m^3),

P_M : la profondeur du bassin de maturation

(nous fixons la profondeur $H = 1,5 \text{ m}$).

Avec un ratio longueur/largeur = 2, les dimensions de ce bassins sont [73] :

- Largeur (l) = 51,15 m \approx **51 m**
- Longueur (L) = 102,3 m \approx **103 m**
- Profondeur (H) = **1,5 m**

II.3.2.4. Récapitulatif de dimensionnement des bassins de lagunage naturel

On récapitule les caractéristiques des bassins de lagunage dans le tableau suivant :

Tableau III.10 : Tableau récapitulatif des caractéristiques de bassins de lagunage.

Caractéristiques	Bassin anaérobie	Bassin facultatif	Bassin de maturation
Temps de séjour (jours)	12,97	17,6	40,88
Volume (m ³)	2490,24	3379,2	7848,96
Surface (m ²)	498,05	1689,6	5232,64
Profondeur (m)	5	2	1,5
Largeur (m)	16	24	51
Longueur (m)	32	71	103

II.4. Traitement de boues

II.4.1. Evaluation des volumes de boues

La station d'épuration produit en permanence des boues dont l'excès doit être évacué à intervalles réguliers pour garantir un bon fonctionnement du système. Dans cette partie nous allons aborder le traitement de boues uniquement pour la variante 1, car la variante 2 du lagunage naturel ne nécessite pas de traitement de boue.

Les boues provenant du décanteur primaire (décanteur-digesteur) et secondaire (le clarificateur) sont admises dans une filière de traitement. La connaissance des volumes journaliers de ces boues est essentielle pour le choix de la filière du traitement.

A. Volume de boues provenant du décanteur primaire

La station d'épuration reçoit une quantité de 140 kg/j de MES. Le dessablage permet d'éliminer 80% de la matière minérale existant dans les eaux usées. Sachant que la matière minérale représente 20% de la charge en MES, le flux de matière en suspension devient 117,6 kg/j.

Le décanteur-digesteur à son tour permet d'éliminer 60% de MES, donc la filière du traitement des boues reçoit 70,56 Kg/j de la matière en suspension (voir tableau III.8).

En admettant une concentration des boues primaires C_{bp} égale à 50 g/l, Le volume journalier des boues primaires V_{bp} est :

$$V_{bp} = \frac{\text{MES} \left(\frac{\text{kg}}{\text{j}}\right)}{C_{bp}} \quad (\text{III.31})$$

$$V_{bp} = \frac{70,56}{50} = 1,41 \text{ m}^3$$

B. Volume des boues provenant du décanteur secondaire

La masse des boues secondaires est donnée par la formule suivante :

$$M_{bs} = a_m \times L_e \quad (III.32)$$

Avec :

M_{bs} : la masse des boues secondaires en (kg) ;

a_m : quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation de 1 kg de DBO₅ ;

L_e : quantité de DBO₅ à éliminer (Kg/j).

Selon les normes de rejets présentés dans le **tableau I.3**, la DBO₅ de sortie est limitée à 40 g/l. La quantité de DBO₅ à éliminer est donc :

$$L_e = (437,5 - 40) \times 192 \times 10^{-3} = \mathbf{76,32 \text{ kg/j}}$$

On prend une valeur $a_m = 0,9$, la masse des boues M_{bs} sera :

$$M_{bs} = 0,9 \times 76,32 = \mathbf{68,69 \text{ kg}}$$

En admettant une concentration des boues primaires C_{bs} égale à 40 g/l, Le volume journalier des boues primaires V_{bs} est :

$$V_{bs} = \frac{M_{bs} \text{ (kg)}}{C_{bs}}$$

$$V_{bp} = \frac{68,69}{40} = \mathbf{1,72 \text{ m}^3}$$

C. Volume total des boues

Le volume total journalier des boues produit par les deux filières (décanteur- digesteur et le clarificateur) est :

$$V_T = V_{bp} + V_{bs}$$

$$V_T = 1,41 + 1,72 = \mathbf{3,13 \text{ m}^3}$$

II.4.2. La filière de traitement des boues

Il existe plusieurs techniques qui fonctionnent correctement mais il s'agit d'équipements relativement complexes dont l'exploitation nécessite un suivi mécanique régulier et une main d'œuvre qualifiée. De plus, la consommation énergétique et la quantité de réactifs utilisées ne sont pas négligeables.

Les filtres plantés de roseaux offrent une alternative intéressante. Ce type de procédé rustique semble correspondre en effet aux contraintes économiques et techniques. Il peut même donner la possibilité de stocker des boues épandables sur plusieurs années et la réutilisation des eaux épurées en agriculture.

Un lit planté est un massif filtrant de sable et de graviers drainé dans lesquels croissent des plantes macrophytes. Les boues à traiter sont envoyées par bêche et réparties à la surface du lit où les matières en suspension (MES) s'accumulent pendant que l'eau qu'elles contiennent percolent. Le massif filtrant est donc responsable de la formation du dépôt de boues.

L'association de filtres plantés de roseaux avec d'autres procédés de traitements des eaux (à biomasse libre ou fixée) plus intensifs, semble être une solution bien adaptée pour garantir de meilleures efficacités.

II.4.2.1. Dimensionnement du LSPR

Le dimensionnement des lits plantés de roseaux s'appuie sur plusieurs critères :

- La surface et le nombre des lits en béton ;
- Le nombre de plants de roseaux par m² de lit filtrant ;
- Le dispositif d'alimentation en boue ... etc.

En se référant au document technique FNDAE N° 22 bis établi par l'office international de l'eau, les dispositions constructives sont [55] :

- * Pour une charge de l'ordre de 50 kg MS/m² /an, le dimensionnement correspond à 0,25 m² /EH.
- * Les apports doivent être répartis dans la journée mais suivis de périodes de repos de l'ordre de 10 jours pour favoriser le ressuyage et la minéralisation des boues. Il est nécessaire de prévoir plusieurs lits. (Quatre lits voire plus selon les quantités à traiter) afin de respecter les périodes de repos sur chaque lit.
- * La géométrie et la disposition du lit doivent être adaptées à la taille des bras des pelles disponibles et aux possibilités de circulation autour des ouvrages lors des évacuations de boue. La largeur des lits ne doit pas excéder 6m ce qui permettra un curage à la pelle.
- * La hauteur totale sera de l'ordre de 2,5 m dont 1,8 m utile
- * La densité de plantation des roseaux est de 4 pieds par m² soit un pied tous les 50 cm dans toutes les directions.
- * Il est indispensable de surveiller la qualité du massif filtrant et les différents matériaux qui doivent satisfaire à certains critères notamment, la taille, la forme, composition, lavage si nécessaire avant la mise en place afin d'optimiser les performances hydraulique de l'installation.

Il est donc possible de dimensionner notre ouvrage avec ces données de base.

La surface nécessaire à mettre en œuvre pour une station d'épuration de 2000 EH est donnée par la formule suivante :

$$S = 0,25 \times \text{nombre d'habitants}$$

$$S = 0,25 \times 2000 = 500 \text{ m}^2$$

Dans le cas de notre station, la surface nécessaire sera de 500 m², répartie en plusieurs lits permettant l'alimentation et le séchage dans des bonnes conditions.

Nous sommes donc partis sur 4 lits, la surface unitaire de chaque lit est :

$$S_u = \frac{S}{4} = \frac{500}{4} = 125 \text{ m}^2$$

Pour une hauteur totale de 2,5 m le volume de chaque lit sera :

$$V = S_u \times H$$

$$V = 125 \times 2,5 = \mathbf{312,5 \text{ m}^3}$$

Le nombre de pied de roseaux à planter est donné par la relation suivante :

$$N = S \times 4$$

$$N = 500 \times 4 = \mathbf{2000 \text{ pieds}} \text{ soit } \mathbf{500 \text{ pieds/lit.}}$$

Si on prend une largeur de 6 m pour chaque lit, la longueur sera :

$$L = \frac{125}{6} = 20,83 \text{ m} \approx \mathbf{21 \text{ m}}$$

On obtient les dimensions suivantes :

- Longueur : **21 m**
- Largeur : **6 m**
- Hauteur : **2,5 m**

III. Conception et dimensionnement de l'installation photovoltaïque

La conception et le dimensionnement d'un champ photovoltaïque précis est en réalité un processus relativement complexe car il y a de nombreux paramètres à prendre en considération, une certaine dose d'impondérable (la météorologie), et surtout de multiples interactions entre les choix.

Les étapes ci-dessous nous présentent d'une façon détaillée la démarche à suivre pour concevoir un système photovoltaïque.

- * Etape 1 : l'estimation des besoins journaliers d'utilisation en électricité (en Wh/j) ;
- * Etape 2 : Evaluation du gisement solaire local ;
- * Etape 3 : Estimation du champ photovoltaïque (tension et puissance crête installée nombre de modules) ;
- * Etape 4 : Estimation de la capacité de stockage de la batterie et choix de la technologie ;
- * Etape 5 : Dimensionnement du régulateur et de l'onduleur ;
- * Etape 6 : Dimensionnement des câbles.

III.1. Estimation des besoins journaliers d'utilisation d'électricité

Dans notre cas, il s'agit d'estimer la consommation des équipements de procédés proposés (lit bactérien et le lagunage naturel) pour l'épuration des eaux usées d'une zone rurale de 2000 EH, L'objectif est d'obtenir la consommation totale moyenne par jour.

L'énergie totale moyenne nécessaire chaque jour E (Wh/j) est la somme des consommations énergétiques des divers équipements constituant le système à étudier, à savoir le poste de relevage, le poste de recirculation ... etc.

Elle est donnée par la formule suivante :

$$E = \sum_i E_i \quad (\text{III.33})$$

Le nombre moyen d'utilisation est plus délicat à cerner, il faut le rapporter à : la saison, le nombre d'occupants et le mode d'utilisation.

Pour les équipements qui ne sont pas utilisés quotidiennement et pour tous les équipements à forte consommation, partez de la durée du cycle de fonctionnement de la tâche. Ainsi, la consommation de chaque équipement peut être calculée comme suit :

$$E_i = P_i \times T_i \quad (\text{III.34})$$

Avec :

E_i : L'énergie journalière consommée d'un équipement en (Wh/j) ;

P_i : La puissance de cet équipement en (W) ;

T_i : La durée de fonctionnement (h).

III.1.1. Présentation des procédés

Pour l'épuration des eaux usées de notre station, on a choisi deux procédés à comparer en termes d'énergie consommé.

1. Procédé intensif à culture fixée variante 1 : lit bactérien ;
2. Procédé extensif à culture libre variante 2 : lagunage naturel.

III.1.2. Bilan de la consommation énergétique des procédés

Le tableau suivant présente la consommation énergétique des différents équipements des procédés à comparer et leur bilan :

Tableau III.11 : La consommation énergétique des équipements.

Procédé	Équipement	Durée de fonctionnement	Puissance (W)	Consommation énergétique (KWh/j)
Lit bactérien	Poste de relevage	4 heures par jour	3600	15
	Lit bactérien	Fonctionnement permanent h24	1500	34
	Poste de recirculation	8 heures par jour	3600	29
	Eclairage et divers équipements	Fonctionnement permanent h24	150	3,6
Bilan	-	-	8850	81,6
Lagunage naturel	Poste de relevage	4 heures par jour	3600	15
	Aérateurs de lagunes	Fonction Intermittente (On prend 2heures)	6000	12
	Eclairage et divers équipements	Fonctionnement permanent h24	150	3,6
Bilan	-	-	9750	30,6

Remarque

Pour réduire le développement bactérien dans la première lagune de lagunage naturel, lié notamment à un effet de stratification thermique, on peut envisager l'installation d'une petite aération.

III.1.3. Comparaison et choix du procédé

La comparaison de ces deux procédés repose sur deux paramètres majeurs la puissance électrique et la consommation énergétique journalière des équipements.

La puissance influence le coût du projet et d'entretien, par contre la consommation énergétique journalière influence le coût d'exploitation et la demande en électricité.

Dans le tableau (**III.11**), on observe que le lit bactérien ne nécessite pas une forte puissance en comparant avec le lagunage naturel bien qu'il a plus d'équipement, cela est dû à la capacité et la taille des ouvrages de traitement.

Dans un autre côté, on observe que le lagunage naturel ne nécessite par une forte consommation énergétique journalière en comparant avec le lit bactérien (grande différence), cela dû à la durée de fonctionnement des équipements.

Puisqu'on va utiliser une électricité solaire photovoltaïque qui n'est pas adaptable avec les grandes consommations donc nous choisirons le procédé de lagunage naturel comme un meilleur procédé pour notre conditions.

III.2. Estimation de l'ensoleillement sur le site de l'installation du générateur PV

Les données de l'ensoleillement (exprimé en KWh /m²/j) peuvent être relevées sur le site ou enregistrées sur la carte de l'ensoleillement de la région ou encore obtenues au niveau de la station météo la plus proche de la zone.

L'Algérie est en effet l'un des plus importants gisements au monde avec une durée d'insolation de 2000 à 3900 heures par an, et une irradiation journalière de 3000 à 6000 Wh/m², soit l'équivalent de 10 fois la consommation mondiale [100].

III.3. Estimation du champ photovoltaïque

A. Calcul de la puissance crête totale du champ photovoltaïque

La puissance crête totale du champ photovoltaïque, dépend de l'irradiation quotidienne du lieu d'utilisation, elle est donnée par [100] :

$$P_{ch} = \frac{E_c \left(\frac{Wh}{j}\right)}{K \times I_r} \quad (III.35)$$

Avec :

P_{ch} : en (Wc) ; E_c : en (Wh/j) ; $K = 0,65$;
 I_r : Irradiation (en considérant une irradiation moyenne de 5 Wh/m²/j en Algérie) [100] ;

$$P_{ch} = \frac{30,6}{0,65 \times 5} = 9,4 \text{ KWc} = 9400 \text{ Wc}$$

B. Choix de la tension de fonctionnement du champ photovoltaïque

On choisit la tension de fonctionnement en fonction de la puissance crête du champ PV en (Wc) (Voir tableau II.14).

Donc notre tension de fonctionnement du champ PV est de **48V**.

C. Calcul de nombre des panneaux nécessaires à l'installation : (Selon le choix)

$$N_p = \frac{P_{ch}}{P_{cu}} \quad (III.36)$$

Avec : P_{cu} : en (Wc).

Notre choix des panneaux est fait en fonction des types disponibles sur le marché. Le modèle des panneaux photovoltaïques que nous avons choisi est [101] : Panneau solaire VICTRON monocristallin. Il a les caractéristiques suivantes :

- ✓ Puissance crête $P_{cu} = 90 \text{ Wc}$.
- ✓ Tension nominale : 12 V.
- ✓ Tension à puissance maximale : 19,6 V.
- ✓ Courant à puissance maximale : 4,59 A.
- ✓ Dimensions : 780 × 668 × 30 mm.

Le nombre de panneau pour une puissance crête de 9400 Wc est :

$$N_p = \frac{9400}{90} = 104,4 \approx \mathbf{105 \text{ panneaux.}}$$

A partir des dimensions et le nombre des panneaux on peut prévoir la surface nécessaire pour la pose des panneaux :

$$S_{np} = N_p \times S_p \quad (\text{III.37})$$

$$S_{np} = 105 \times (0,780 \times 0,668) = 54,71 \text{ m}^2 = \mathbf{55 \text{ m}^2}$$

D. Calcul de nombre des panneaux connectés en série

Puisque on a une tension de 48V donc on doit installer les panneaux en série pour l'augmentation de la tension. Le nombre de panneau connectés en série est :

$$N_{ps} = \frac{V_{ch}}{V_n} = \frac{48}{12} = \mathbf{4 \text{ panneaux.}}$$

III.4. Estimation de la capacité de stockage de la batterie et le choix de la technologie

Pour déterminer la capacité de stockage des batteries, on procède de la façon suivante :

Etape 1 : On calcule l'énergie consommé (E_c) par les différents récepteurs ;

Etape 2 : On détermine le nombre de jours d'autonomie nécessaire ;

Etape 3 : On détermine la profondeur de décharge acceptable pour le type de batterie utilisé ;

Etape 4 : On calcule la capacité C de la batterie en appliquant la formule suivante :

$$C = \frac{E_c \times N}{D \times U} \quad (\text{III.38})$$

Avec :

C : capacité du champ de batterie en ampère heure (Ah) ;

E_c : énergie consommée par jour (Wh/j) ;

N : nombre de jour d'autonomie ;

D : décharge maximale admissible (0,8 pour les batteries au plomb) ;

U : tension de la batterie (V).

De la même façon de choix des panneaux, nous avons choisi une batterie disponible sur le marché. Le modèle que nous avons choisi est [101] : Batterie VICTRON étanche Plomb-Carbone. Il a les caractéristiques suivantes :

- ✓ Tension nominale : 12 V.
- ✓ Capacité : 160 Ah.
- ✓ Dimensions : 532 × 207 × 226 mm.

A. Calcul de la capacité

Pour une autonomie de 5 jours, la capacité C à prévoir est :

$$C = \frac{30,6 \times 10^3 \times 5}{0,8 \times 12} = \mathbf{15937,5 \text{ Ah}}$$

B. Calcul de nombre nécessaire des batteries

- Le nombre de batteries nécessaire est donné par :

$$N_b = \frac{C}{C_b} = \frac{15937,5}{160} = 99,61 = \mathbf{100 \text{ batteries.}}$$

- La surface nécessaire pour la pose des batteries S_b est :

$$S_b = 100 \times (0,532 \times 0,207) = 11,01 = \mathbf{11 \text{ m}^2}$$

C. Calcul de nombre de batteries en série

Comme pour les panneaux, on doit placer les batteries en série pour augmenter la tension. Le nombre de batteries en série est donné par :

$$N_{bs} = \frac{V_{ch}}{V_n} = \frac{48}{12} = \mathbf{4 \text{ batteries.}}$$

La durée de vie d'une batterie décroît rapidement lorsque la profondeur de décharge augmente. En général, on essaie de limiter la profondeur de décharge à 50%, c'est-à-dire que l'on utilisera que la moitié de la capacité de batteries.

III.5. Dimensionnement du régulateur et de l'onduleur**III.5.1. Dimensionnement de régulateur de charge**

Le régulateur de charge est dimensionné en fonction des paramètres suivants : tension, courant d'entrée et courant de sortie.

- * Tension nominale : celle du champ photovoltaïque (12 V) ;
- * Courant d'entrée I_e : C'est le courant maximal que les modules sont susceptibles de débiter. Il est donné par la formule suivante :

$$I_e = I_{pm} \times N_p \quad \text{(III.39)}$$

$$I_e = 4,59 \times 105 = \mathbf{481,95 \text{ A}}$$

- * Courant de sortie I_s : L'intensité de courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale que peuvent tirer les récepteurs simultanément. Elle peut être déterminée par la formule suivante :

$$I_s = I_{max} = \frac{P_T}{U} \quad \text{(III.40)}$$

Avec :

P_T : La puissance totale en (W) des équipements lorsqu'ils fonctionnent au maximum de leur puissance ;

U : la tension à la puissance maximale des panneaux en (V).

$$I_s = \frac{9750}{19,6} = \mathbf{497,45\ A}$$

III.5.2. Dimensionnement de l'onduleur

La tension produite par les modules photovoltaïques et celle fournie par les batteries pour l'alimentation des charges sont de nature continue. Dans ces conditions, il faudra intégrer obligatoirement un onduleur pour le système PV destiné à alimenter des charges alternatives.

L'onduleur est un convertisseur DC-AC, c'est-à-dire convertir la sortie continue (DC) du champ de module ou des batteries en électricité alternative (AC) standards.

Donc pour le choix de notre onduleur il faut respecter les étapes suivantes [75] :

Etape 01 : Calcule la puissance totale de toutes les charges à courant alternative ;

Etape 02 : dans cette étape on distingue 3 cas :

- * Si toutes les charges AC ne fonctionnent pas au même temps : $P_{on} \geq 0,75 \times P_T$;
- * Si toutes les charges AC fonctionnent au même temps : $P_{on} \geq P_T$;
- * Si toutes les charges AC à une durée importante : $P_{on} \geq P_T$ (**pointe**).

Alors, l'onduleur utilisé dans notre système est supérieur ou égale à $0,75 \times P_T$;

$$P_{on} \geq \mathbf{7312,5\ W}$$

III.6. Dimensionnement des câbles

Les systèmes solaires fonctionnent généralement sous faible tension (12V, 24V, 48V), donc, avec un courant élevé ($P = U \times I$), si U est faible, I est très élevé pour la même puissance. Le transport à distance de ce courant de plusieurs ampères provoque des pertes par effet joule aux niveaux des conducteurs.

Afin de réduire ces pertes à moins de 3% de l'énergie produite, Il est nécessaire de limiter la longueur des câbles électriques entre le générateur photovoltaïque et les récepteurs. Cette distance n'excède jamais quelques mètres.

A. Section du câble module/batteries

Pour déterminer résistance du câble entre le module et la batterie on pourra utiliser la formule ci-dessous :

$$P = R \times I^2 \tag{III.41}$$

Avec :

P : Les pertes de puissance entre le câble et la batterie en (W) ;

R : Résistance du câble en Ω (Ohm) ;

I : Courant de circulation (module/batterie) en (A).

Sachant qu'on a choisi un module d'une puissance de 90 Wc, et qu'on ne doit pas dépasser les 3% :

$$\text{Alors :} \quad P = 2,7 \text{ W.}$$

$$\text{Et :} \quad P = R \times I^2 \rightarrow R = \frac{P}{I^2}$$

$$\text{D'où :} \quad R = \frac{2,7}{(4,59)^2} = 0,13 \Omega$$

La section du câble offrant une résistance inférieure à 0,13 Ω est donnée par la formule suivante :

$$R = \frac{\rho \times L}{S} \rightarrow S = \frac{\rho \times L}{R} \quad (\text{III.42})$$

Avec :

S : Section du câble en m^2 .

ρ : Résistivité linéaire du conducteur constructif du câble 0,017 Ohm mm^2/m (pour le cuivre) ;

L : Longueur du câble entre le module et les batteries (on prend une longueur de 5 m).

$$\text{D'où :} \quad S_{mb} = \frac{0,017 \times 10}{0,13} = 1,31 \text{ mm}^2$$

B. Section du câble batteries/onduleur

Par la même façon de calcul précédente, on calcul la section du câble batteries/onduleur :

L'onduleur produit une puissance supérieure ou égale à 7312,5 W. Alors, on ne doit pas dépasser 219,38 W de perte.

Le courant circulant entre les batteries et l'onduleur :

$$I = \frac{P}{U} = \frac{7312,5}{19,6} = 373,1 \text{ A}$$

$$\text{Donc :} \quad P = R \times I^2 \rightarrow R = \frac{P}{I^2} = \frac{219,38}{(373,1)^2} = 0,0016 \Omega$$

D'où, la section des câbles entre les batteries et l'onduleur est :

$$R = \frac{\rho \times L}{S} \rightarrow S_{bo} = \frac{\rho \times L}{R} = \frac{0,025 \times 2,5}{0,0016} = 39,06 \text{ mm}^2$$

Avec :

L : La longueur du câble entre les batteries et l'onduleur ($L= 2\text{m}$) ;

ρ : Résistivité linéaire du conducteur constructif du câble 0,025 Ohm mm^2/m
(Pour l'aluminium).

III.7. Récapitulatif de dimensionnement de l'installation photovoltaïque

On récapitule les caractéristiques de l'installation photovoltaïque dans le tableau ci-dessous :

Tableau III.12 : Tableau récapitulatif des caractéristiques de l'installation photovoltaïque.

Equipements	Caractéristiques	Valeurs	Unités
Champ photovoltaïque	La puissance crête totale (W_c)	9400	W
	La tension de fonctionnement (V)	48	V
Panneaux photovoltaïques	Le nombre de panneaux nécessaires (N_p)	105	Panneaux
	La surface nécessaire pour la pose des panneaux (S_{np})	55	m ²
	Le nombre de panneaux connectés en série (N_{ps})	4	Panneaux
Batteries	La capacité de stockage de la batterie (C)	15937,5	Ah
	Le nombre de batteries nécessaires (N_b)	100	batteries
	La surface nécessaire pour la pose des batteries (S_b)	11	m ²
	Le nombre de batteries connectés en série (N_{bs})	4	Batteries
Régulateur de charge	Le courant d'entrée (I_e)	481,95	A
	Le courant de sortie (I_s)	497,45	A
Onduleur	La puissance de l'onduleur (P_{on})	$P_{on} \geq 7312,5$	W
Câbles	La section du câble module/batteries (S_{mb})	1,31	mm ²
	La section du câble batteries/onduleur (S_{bo})	39,06	mm ²

CONCLUSION

La consommation énergétique d'une station d'épuration dépend de plusieurs critères tels que : type de filière de traitement des eaux usées, la taille de l'agglomération, des niveaux de rejet exigés, de l'emplacement et de la surface disponible. Le taux de charge des installations, la conception et la gestion technique des ouvrages et des équipements constituent également des critères clés d'une limitation des dépenses énergétiques.

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude détaillée de deux filières de traitement des eaux usées dans le but d'une comparaison de la consommation énergétique des différents ouvrages et équipements afin de pouvoir intégrer l'énergie renouvelable photovoltaïque pour la génération d'électricité dans cette station.

La première filière (lit bactérien) ne nécessite pas une grande surface, ni des équipements importants (la taille, et les caractéristiques), par contre la deuxième filière (lagunage naturel) exige une grande surface et des équipements importants.

La différence se trouve dans le fait que le lit bactérien est plus énergivore (consommateur d'énergie) par rapport au lagunage naturel en raison de leur intensivité et leur durée de fonctionnement des différents dispositifs. Bien qu'il exige des dispositifs importants, l'avantage de lagunage naturel se trouve dans la consommation journalière et ceci est notre problème vu le manque des ressources d'électricité dans les zones rurales et que l'énergie photovoltaïque ne génère pas des grandes quantités d'énergie. Il est vrai qu'un deuxième critère qui n'est pas des moindres pour nous guider dans le choix, à savoir le coût des deux installations. Mais comme dans les conditions actuelles (confinement à cause de la pandémie de la COVID-19), cette opération n'a pu être réalisée.

Finalement, nous avons opté pour une station d'épuration de type lagunage naturel, pour une installation photovoltaïque, du moment qu'elle consomme moins d'énergie que le lit bactérien.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de notre travail était de trouver des solutions de traitement des eaux usées domestiques adaptées aux petites collectivités, et en même temps de résoudre le problème d'électricité des zones isolées pour assurer le processus de traitement de ces eaux.

En effet, ce travail s'inscrit dans une optique de développement durable, et nous poussait à trouver des solutions simples et économiques non seulement pour préserver notre environnement, mais aussi de contribuer au développement durable à long terme.

La station d'épuration sert à purifier les eaux usées afin de protéger la santé publique contre les maladies à transmission hydrique, ainsi la préservation du milieu récepteur contre la destruction de la structure.

Pour les stations d'épurations des petites collectivités (2000 équivalents habitants), Il existe plusieurs procédés de traitement des eaux usées qui peuvent être mis en place : lagunage naturelle et aérée, boues activées, disque biologique, lit bactérien. Cependant, le choix de la meilleure filière d'épuration se base sur plusieurs critères, parmi les critères fondamentaux : la consommation énergétique.

Dans notre étude, et sur la base de la consommation énergétique, le lagunage naturel s'est révélé comme étant une filière à faible consommation énergétique. Ce qui a conforté notre choix pour cette filière, qui pourrait convenir parfaitement aux petites localités.

Les sources d'énergies sont diverses, Cependant, elles sont mal réparties. L'application des énergies renouvelables pour le traitement des eaux usées est une solution alternative et attractive en termes de l'indépendance énergétique, de la production locale et du faible coût en KWh. Elles peuvent être aussi prévisibles pour l'investissement à long terme.

Dans notre étude le choix s'est porté sur le système solaire photovoltaïque pour alimenter en énergie une station d'épuration de 2000 EH avec un procédé de lagunage naturel. Selon les calculs entrepris, il faut 105 panneaux photovoltaïques avec une surface de 55 m² pour assurer une puissance crête de l'ordre de 9400 Wc.

Donc, nous pouvons conclure que l'introduction de l'énergie solaire photovoltaïque est très faisable, c'est une solution alternative face à l'augmentation exponentielle de la demande en énergie et la discontinuité des autres énergies à l'échelle régionale.

In fine, nous pouvons dire, donc, que l'énergie photovoltaïque est économiquement rentable, environnementale acceptable et socialement équitable. Ce qui est conforme aux trois piliers de développement durable.

ANNEXES

ANNEXE 1 : Tableau des points-clé du dimensionnement de lit bactérien [59].

Paramètres	Unité	Valeurs standard ⁽¹⁾		Valeurs préconisées ⁽²⁾
Prétraitement				
Espacement barreaux dégrillage	cm	3		3
Décanteur-digesteur				
Vitesse ascensionnelle	m/h	1 à 1,5		1,5
Temps de séjour	h	1,5		/
Volume de digestion		1 à 1,5 x Vadmis		1,5 x Vadmis
Lit bactérien				
Hauteur de lit matériau traditionnel	m	2,5		2,5
Hauteur de lit matériau plastique	m	4		4
Charge organique				
Faible charge	kg DBO ₅ /m ³ /j	0,08 à 0,2		0,2
Forte charge	kg DBO ₅ /m ³ /j	0,7 à 0,8		0,7
Très forte charge	kg DBO ₅ /m ³ /j	1 à 5		1,1
Charge hydraulique				
Faible charge	m ³ /m ² /h	0,04 à 0,20		0,4
Forte charge	m ³ /m ² /h	0,6 à 1,6		1,05
Très forte charge	m ³ /m ² /h	1,5 à 3		1,05
Charge maximale	m ³ /m ² /j	40		25
Objectif de rejet	mg DBO ₅	≤ 35	≤ 25	≤ 30
Garnissage traditionnel				
Vitesse ascensionnelle	m/h	1,2	1,0	/
charge organique	kg DBO ₅ /m ³ /j	0,7	0,4	/
hauteur de matériau	m	2,5	2,5	/
charge hydraulique	m ³ /m ² /h	1,0	0,7	/
taux de recyclage	%	/	/	200
taux de recirculation	%	200	250	20
Garnissage plastique				
Vitesse ascensionnelle	m/h	1,2	1,0	
charge organique	kg DBO ₅ /m ³ /j	0,7	0,4	/
hauteur de matériau	m	4,0	5,0	/
charge hydraulique	m ³ /m ² /h	2,2	1,8	/
taux de recyclage	%	/	/	200
taux de recirculation	%	200	250	20
Clarificateur				
Vitesse ascensionnelle	m/h	1		1,4 si recyclage amont primaire, 1,0 si amont lit
Hauteur périphérique	m	2 (réseau séparatif) 2,5 (réseau unitaire)		2 (réseau séparatif) 2,5 (réseau unitaire)
Pente du radier (statique/raclé)	°	> 55 / < 5		> 55 / < 5

⁽¹⁾Valeurs tirées de la bibliographie.

⁽²⁾Valeurs résultant de l'observation du fonctionnement des installations du bassin Rhin-Meuse.

ANNEXE 2 : Type de panneaux solaires utilisés dans la l'installation PV [101].



Panneau solaire VICTRON monocrystallin 90 Wc - 12 V.

Fiche technique :

- ✓ Coefficient tension-température favorable pour une utilisation à des températures élevées.
- ✓ Performances exceptionnelles en faible irradiation et sensibilité élevée à tout le spectre solaire.
- ✓ 25 ans de garantie limitée de performance et de puissance.
- ✓ 5 ans de garantie limitée sur matériaux et ouvrage.
- ✓ Boîte de raccordement multifonctionnelle scellée étanche pour un niveau de sécurité élevé.
- ✓ Diodes de dérivation haute-performance pour une meilleure protection contre les effets de point chaud en cas d'occultation partielle.
- ✓ Procédé d'encapsulation avancé EVA (Ethylène-acétate de vinyle) avec face inférieure tri-couche répondant aux exigences les plus sévères de sécurité haute-tension.
- ✓ Cadre robuste en aluminium anodisé pour assemblage facile, compatible avec une grande diversité de structures de montage du marché.
- ✓ Face supérieure en verre trempé à haute transmissibilité pour une rigidité accrue et une excellente résistance aux impacts.
- ✓ Système de câblage rapide avec connecteurs MC4 (PV-ST01).

ANNEXE 3 : Type de batteries utilisés dans la l'installation PV [101].



Batterie VICTRON étanche Plomb-Carbone 12V / 160Ah.

Fiche technique :

- ✓ Modes de défaillance des batteries au plomb VLRA en cas d'intensité du nombre de cycles.
- ✓ Il faut un certain temps pour recharger une batterie au plomb.
- ✓ Batterie plomb-carbone : meilleure performance de l'état de charge partiel ; davantage de cycles et efficacité supérieure.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Méot, B., Alamy, Z.,** (1990) : « Les Eaux Usées Urbaine : Réglementation Des Rejets Urbains, Traitement De Finition Par Géoépuraton », R 31588, Août 1990.
- [2] **Salghi, R.,** (2004) : « Chimie Des Eaux ». L'école National Des Sciences Appliquées D'Agadir (ENSA Agadir), 21 p.
- [3] **Satin, M., Selmi, B.,** (1999) : « Guide Technique De L'assainissement, 2e Edition. Broché ». 1 Janvier 1999, 660 p.
- [4] **Belghyti, D., El Guamri, Y., Ztit, G., Ouahidi, M., Joti, M., Harchrass, A., ... Bounouira, H.,** (2010) : « Caractérisation Physico-Chimique Des Eaux Usées D'abattoir En Vue De La Mise En Œuvre D'un Traitement Adéquat : Cas De Kénitra Au Maroc ». Afrique Science : Revue Internationale Des Sciences Et Technologie, 216 p.
- [5] **Hébert, S., Légaré, S.,** (2000) : « Suivi De La Qualité De L'eau Des Rivières Et Petits Cours D'eau, Quebec ». Direction Du Suivi De L'état De L'environnement, Ministère De L'environnement, Envirodoq N° env-2001-0141, 24 p et 3 annexes.
- [6] **Metahri, M-S.,** (2012) : « Élimination Simultanée De La Pollution Azotée Et Phosphatée Des Eaux Usées Traitées, Par Des Procédés Mixtes. Cas De La Step Est De La Ville De Tizi-Ouzou », 148 p.
- [7] **Rodier, J., Legube, B., Merlet, N.,** : « Collectif. L'analyse De L'eau ». 9ème Edition, Edition Dunod, 1579p.
- [8] **Rodier, J., Bazin, C., Broutin, J.-P., Chambon P., Champsaur H., Rodi L.,** (2005) : « L'analyse De L'eau : Eaux Naturelle, Eau Résiduaire Et L'eau De Mer ». 8^{ème} Ed. Dounod, Paris.
- [9] **Rejsek, F.,** (2002) : « Analyse De L'eau : Aspects Et Réglementaire Et Technique ». Ed. Crdp D'aquitaine, France, 358 p.
- [10] **Gaid, A.,** (1984) : « L'épuration Biologique Des Eaux Résiduaire ». Edition Technique Et Documentation, p 219-395.
- [11] **Ami Saadi, K., Chennafi, L.,** (2016) : « Contribution A L'évaluation Des Paramètres De Traitement Des Eaux Usées Domestiques De La Step Ouest De La Commune De Tizi Ouzou Wilaya De Tizi-Ouzou ».
- [12] **Rouabah, N.,** (2008) : « Conception De La Station De La Ville De Khemis Mliana ». Thèse D'ingénieur D'état En Hydraulique E.N.S.H.
- [13] **Ouali, M-S.,** (2001) : « Cours De Procèdes Unitaires Biologiques Et Traitement Des Eaux ». Office Des Publications Universitaires, Edition 2.10.4334, 156 p.
- [14] **Journal Officiel De La République Algérienne.,** (1993) : « Normes De Rejets Dans Le Milieu Récepteur », N° 46, p 7/12.

- [15] **Journal Officiel De La République Algérienne.**, (2012) : « Annexe, Spécifications Des Eaux Usées Epurées Utilisées A Des Fins D'irrigation », N° 41, p 18/21.
- [16] **Zeghoud, M-S.**, (2014) : « Etude De Système D'épuration Des Eaux Usées Urbaines Par Lagunage Naturel De Village De Méghibra », Université D'el-Oued, 90 p.
- [17] **Bounoua C., Meziti K., Sahli R.**, (2016) : « Analyses Physico-Chimiques Des Eaux Usées Au Niveau De La Station D'épuration De La Wilaya De Bordj Bou Arreridj », 61 p.
- [18] **Joradp .**, (2010) : « Décret Exécutif N° 10-23 Du 26 Moharram 1431 Correspondant Au 12 Janvier 2010 Fixant Les Caractéristiques Techniques Des Systèmes D'épuration Des Eaux Usées », Art.5.
- [19] **Peyraut, T.**, (2011) : « État De L'art Sur La Technique « Filtres Plantés De Roseaux » Pour L'épuration Domestique En Adour-Garonne ». Rapport De Stage A Destination De L'agence De L'eau Adour-Garonne, Université De Limoges, 114 p.
- [20] **Rosselet, J.**, (2006) : « Choix De Techniques D'assainissement Adaptées Aux Communes Et Ruisseaux. De Tête De Bassin Versant ». Parcs Naturels Régionaux Du Haute-Jura Et Du Morvan. C39-701eu051 - Programme Life-Ruisseaux.
- [21] **Imhoff, K.**, (1970) : « Manuel De L'assainissement Urbain », Cinquième Edition. Dunod, Paris, 452 p.
- [22] **Falcon, Y.**, (2010) : « Les Ouvrages De Génie Civil Des Stations D'épuration Des Petites Collectivités : Conception Et Dimensionnement Rapide ». Architecture, Aménagement De L'espace. (Dumas-00576804f).
- [23] **Tabet, M.**, (2015) : « Etude Physico-Chimique Et Microbiologique Des Eaux Usées Et Evaluation Du Traitement D'épuration ». Université 8 Mai 1945-Guelma, 161 p.
- [24] **Saadi, H.**, (2013) : « Etude Des Performances D'un Lit Bactérien Classique A Garnissage En Pouzzolane De Beni Saf ». Université Abou Bekr Belkaid, 185 p.
- [25] **Berriah, A.**, (2014) : « Proposition Et Dimensionnement D'une Step Pour La Localité De Marsat Ben M'hidi Et Réutilisation De Ses Eaux En Irrigation », 144 p.
- [26] **Bessedik, M.**, (2011) : « Pratiques De L'eau En Situation De Pénurie Dans La Ville De Tlemcen ». Editions Universitaires, 272 p.
- [27] **Le Hyaric, R., Canler, J-P., Barillon, B., Naquin, P. And Gourdon, R.**, (2009) : « Caractérisation, Traitabilité Et Valorisation Des Refus De Dégrillage Des Stations D'épuration ». LGCIE – INSA Lyon, 190 p.
- [28] **Meziani, F.**, (2016) : « Contribution A L'étude De Dimensionnement Et A L'élaboration D'un Guide De Gestion Et D'exploitation Du Système D'épuration De L'agglomération De Remchi », 130 p.
- [29] **Salghi, R.**, (2004) : « Dimensionnement D'une Station Épuration Par Boues Activées ». L'école National Des Sciences Appliquées D'Agadir, 22 p.

- [30] **Adler, E.**, (2005) : « Eléments Sur L'épuration Des Eaux Usées Et La Gestion Des Sous-Produits De L'assainissement ». Centre D'affaires Des Monts D'or 69290 St Genis Les Ollières, 87 p.
- [31] **Boumaaza, M.**, (2019) : « Polycopié De Cours Destiné Aux Etudiants En Licence Hydraulique ». Traitement Et Epuration Des Eaux, 77 p.
- [32] **Desjardins, R.**, (1997). Le Traitement Des Eaux. Deuxième Edition Revue Et Enrichie, Chapitre 2 : Micro tamisage.
- [33] **Dhaouadi, H.**, (2008) : « Traitement Des Eaux Usées Urbaines : Les Procédés Biologiques D'épuration ». Université Virtuelle De Tunis, 34 p.
- [34] **Rouin, N., Bounedjar, W.**, (2019) : « Traitement Des Eaux Usées Par Boues Activée (Cas De La Station D'épuration De La Ville De Ain Defla) ». Université Djilali Bounama Khemis Miliana, 82 p.
- [35] **Bakiri, Z.**, (2007) : « Traitement Des Eaux Usees Par Des Procedes Biologiques Classiques : Experimentation Et Modelisation ». 120 p.
- [36] **Dehbi, F-Z.**, (2015) : « Etude Comparative Des Performances D'un Lit Bactérien A Garnissage En Pouzzolane De Beni Saf Et D'un Lit Bactérien A Garnissage Plastique ».Université Abou Bekr Belkaid, 195 p.
- [37] **Chekroun, A.**, (2013) : « Étude Et Conception D'une Station D'épuration Des Eaux Usées Domestiques Par Lits De Roseaux Pour Les Petites Agglomérations : Cas De Fraouna (Commune De Terny) », 116 p.
- [38] **AERM**, (2007) : « Procédés D'épuration Des Petites Collectivités Du Bassin Rhin-Meuse ». Fiche 3, Lit Bactérien, 12 p.
- [39] **Kaid, N.**, (2018) : « Etude De Performance D'un Lit Bactérien A Garnissage En Double Couches (pouzzolane, brique) », 132 p.
- [40] **En-Nawaoui, A.**, (2010) : « Dimensionnement D'une Step A Lits Bactériens Précédés D'étangs Anaérobies Et Gestion Des Sous-Produits, Cas De La Ville De Kalaa Des Sraghna ». Pfd. Maroc, 98 p.
- [41] **Merizak, M.**, « Elaboration D'un Logiciel De Dimensionnement Des Lits Bactériens Au Maroc », 67 p.
- [42] **Artois -. Picardie.**, (2001) : « Guide Technique Pour L'assainissement Des Communes Rurales ». Disques Biologiques, Lit Bactérien, 93 p.
- [43] **EPNAC**, (2016) : « Guide D'exploitation Des Ouvrages De Traitement Par Disques Biologiques », 35 p.
- [44] **Liénard, A., Bardeau, L.**, (1993) : « Epuration Des Eaux Usées Par Disques Biologiques : Etude Bibliographique, Tome 1 » IRSTEA. 1993, Ffhal-02574633f, 82 p.

- [45] **Perera, P., Baudot, B.**, (1991) : « Procédés Extensifs D'épuration Des Eaux Usées Adaptés Aux Petites Et Moyennes Collectivités (500-5000 Eq-Hab) ». Mise En Oeuvre De La Directive Du Conseil N° 91/271 Du 21 Mai 1991 Relative Au Traitement Des Eaux Urbaines Résiduaire, 44 p.
- [46] **Seine-Et-Marne.**, (2014) : « La Filière Lit Bactérien Et Disque Biologiques », Fiche Technique N° 2,3 Sur L'assainissement Conseil Général De Seine-Et-Marne.
- [47] **LüThi, C., Morel, A., Zurbrügg, C., Tilley, E., Schertenleib, R.**, (2004) : « Compendium Des Systa. Chaib, Bioépuration Par Lagunage Naturel », Bulletin Des Energies Renouvelables N°5 Juin 2004. Emes Et Technologies D'assainissement, 158 Pages | Oct 2009.
- [48] **Techniques De L'ingénieur.**, (2014) : « Traitement Des Eaux Résiduaire Des Agglomérations – Filières Extensives », C 5223, 37 p.
- [49] **Chaib, A.**, (2004) : « Bio Epuration Par Lagunage Naturel », Bulletin Des Energies Renouvelables N°5 Juin 2004, p 21-22.
- [50] **Boughanzai, L.**, (2012) : « Dimensionnement D'une Station D'épuration De Type Lagunage Naturel Au Centre D'ain Cheggag, Fès, Maroc ». Revue Agrobiologia 2012 ; 2 ; p 29-33.
- [51] **Hammadi, B.**, (2018) : « Lagunage Aéré En Zone Aride Performances Epuratoires, Paramètres Influent : Cas De La Région De Ouargla ». Université Kasdi-Merbah-Ouargla, 136 p.
- [52] **AERM.**, (2007). Procédés D'épuration Des Petites Collectivités Du Bassin Rhin-Meuse, Fiche 8, Lagunage Aérée, 10 pages.
- [53] **Bassompierre, C.**, (2007) : « Procédé A Boues Activées Pour Le Traitement D'effluents Papetiers : De La Conception D'un Pilote A La Validation De Modèles ». Domain_Stic.inge. Institut National Polytechnique De Grenoble - INPG, 2007. Français. tel-00130907, 232 p.
- [54] **Chabat, L.**, (2013) : « Analyse Du Cycle De Vie Des Filières De Traitement Des Boues Issues Du Traitement Des Eaux Usées ». Sciences De L'environnement.Hal-02599211f, 106 p.
- [55] **Pronost, J., Pronost, R., Deplat, L., Malrieu, J., Berland, J-M.**, (2002) : « Stations D'épuration : Dispositions Constructives Pour Améliorer Leur Fonctionnement Et Faciliter Leur Exploitation ». Document Technique FNDAE N° 22 Bis (pages 51 et 79).
- [56] **Gourdet, C.**, (2014) : « Évaluation Des Performances Environnementales Des Procédés De Traitement Des Boues D'épuration Par L'analyse Du Cycle De Vie ». Hal-02600266, 54 p.
- [57] **Malamaire, G.**, (2013) : « Techniques Innovantes En Matière D'assainissement Déshydratation Des Boues De Stations D'épuration Grâce A Des Lits De Séchage Plantés De Roseaux : Présentation De La Filière.
- [58] **Slimani, A., Azzouzi, S.**, (2018) : « Application Des Énergies Renouvelables (Solaires) Pour Renforcer Le Débit D'eau De Foggara Dans La Région D'Adrar (Alguid-Tamentit) », 78 p.
- [59] **Hamidat, A.**, (2012) : « Le Solaire Thermique En Algérie : Histoire Et Perspective ». Bulletin Des Energies Renouvelables N°22, 4 p.
- [60] **Belaid Lalouni, S.**, (2015) : « Cours Energie Solaire Photovoltaïque ». Université A. Mira De Bedjaya, 62 p.

- [61] **Benghezala, I.**, (2014) : « Contribution A L'étude Des Performances Dynamiques Et Thermiques D'un Échangeur Enterré ». Mémoire De Magistère.
- [62] **Touil, A., Laid, M., Soualah.,** (2018) : « Etude Numérique D'un Échangeur Géothermique Eau-Sol », 74 p.
- [63] **Flèche, A., Delagnes, D.**, (2007) : « Production D'énergie Electrique : Energie Solaire Photovoltaïque », 18 p.
- [64] **Bouzekrine, S., Zioui, R.**, (2019) : « Caractérisation Des Modules Photovoltaïques A L'aide De Ftv200 I-V Tracer », Université Saâd Dahlab, Blida-1.
- [65] **Durand, H.**, (1982) : « Les Energies Redécouvertes : L'énergie Solaire, L'énergie Eolienne Et L'énergie De La Biomasse», Dans M. De Perrot (Dir.), Energie Et Société. Le Choix Des Energies Et Ses Implications Socio-Economiques (Paris, 16-18 Septembre 1981), Pergamon Press, Paris/New York/Oxford, 1982, p 129-142.
- [66] **Ndiaye, A., Achari, K.**, (2019) : « Production D'énergie A Partir D'un Système Photovoltaïque ». Université 8 Mai 1945-Gualma.
- [67] **Halouma, B.**, (2008) : « Contribution A La Modélisation Du Problème De «Hot Spot» Dans Les Modules Solaires Photovoltaïques Occultées ».
- [68] **Ricaud, A.**, (2008) : « Modules Et Systèmes Photovoltaïques », 161 p.
- [69] **Belhadj, M.**, (2008) : « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome », 95 p.
- [70] **Bendjamâa, I.**, (2012) : « Modélisation Et Commande D'un Système De Stockage Photovoltaïque », 131 p.
- [71] **Belabed, M-R.**, (2017) : « Etude Et Dimensionnement D'une Installation Photovoltaïque ». Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou ». 98 p.
- [72] **Labouret, A., Villosz, M.**, (2006) : « Energie Solaire Photovoltaïque », 3^{ème} Edition, Edition Dunod, 368 p.
- [73] **Abbas, S., Raselma, S.**, (2017) : « Dimensionnement D'une Station D'épuration Usées De La Ville De Khemis Miliana », Université Djilali Bounaâma De Khemis Miliana, 67 p.
- [74] **Michel, E., Deves, Arnaud.**, (2003) : « Énergie Photovoltaïque, Application Au Traitement De L'eau Potable Et Des Eaux Usées », FNDAE N°12. Document Technique Réédition 2003, 53 p.
- [75] **Benkhelif, B., Seddiki,** (2018) : « Etude Technico Economique D'un Système Photovoltaïque En Site Isole Par PVSYST », Université Mohamed Boudiaf - M'sila.
- [76] **Bengouga, K.**, (2010) : « Contribution A L'étude De La Végétation Dans L'épuration Des Eaux Usée Dans Les Régions Arides ». Université Mohamed Khider - Biskra -. 212 p.

RÉFÉRENCES WEBOGRAPHIQUES

[77] **RéfFEA** : Analyse physico-chimique, site web : <https://www.oieau.fr/> (consulté le 26/09/2020).

[78] **Anonyme** : Relation entre la DBO et la DCO, site web : <https://www.1h2o3.com/> (consulté le 16/10/2020).

[79] **ONA** : Comprendre les eaux usées, site web : <https://www.ona-dz.org/article/> (consulté le 16/10/2020).

[80] **MAGE 42**, (2006) : Fiche d'exploitation n°1 : QUELQUES PARAMETRES CARACTERISTIQUES DES BOUES ACTIVEES, site web : <https://epnac.irstea.fr/> (consulté le 16/10/2020).

[81] **Bettach, A.**, (2013) : Traitement des eaux usées domestique par biodénitrification : Effet du nitrate, Université Chouaib Doukkali - MAROC, site web : <https://www.memoireonline.com/> (consulté le 07/10/2020).

[82] **Grand-Duche De Luxembourg** : Traitement par le procédé des disques biologiques, site web : <https://eau.public.lu/> (consulté le : 09/10/2020).

[83] **ISMA** : Aérateurs pour lagunages et bassins à boue activée, lagunage aérée, site web : <https://www.isma.fr/> (consulté le : 13/10/2020).

[84] **SMRA68** : Boues déshydratées des lits plantes de roseaux, Syndicat Mixte Recyclage Agricole du Haut-Rhin, site web : <https://www.smra68.net/> (consulté le 14/10/2020).

[85] **Hatari.**, (2018) : Les énergies fossiles, site web : <https://www.hatari.fr/les-energies-fossiles/> (consulté le 21/10/2020).

[86] **Mathilde Lepage** : À partir de quelles sources d'énergie l'électricité est-elle fabriquée ?, site web : <https://www.killmybill.be/fr/sources-energie/> (consulté le 20/10/2020).

[87] **Anonyme**, Connaissance des énergies, site web : <https://www.connaissancedesenergies.org/f> (consulté le 22/10/2020).

[88] **CEA** – Mémento sur l'Énergie édition 2018, site web : <http://www.cea.fr/english/> (consulté le 23/10/2020).

[89] **Mme Ruault-Djerrab** (2020) : Energies fossiles et énergies renouvelables, Université de Guelma, site web : <http://djerrab-geologie-guelma.e-monsite.com/pages/dossiers-scientifiques/energies-fossiles-et-renouvelables.html#histoire> (consulté le 21/10/2020).

- [90] **Al Gore, S.** : Les avantages et les inconvénients du gaz naturel, site web : <https://www.acteurdurable.org/gaz-naturel-inconvenients/> (consulté le : 23/10/2020).
- [91] **Anonyme** : connaissance des énergies, site web : <https://www.connaissancedesenergies.org/f> (consulté le 22/10/2020).
- [92] **Demirdjian, H.**, (2005) : Les combustibles fossiles : formation, composition et réserve, site web : <https://culturesciences.chimie.ens.fr/> (consulté le 22/10/2020).
- [93] **Anonyme** : TPE sur les énergies propres, site web : <http://energiespropres.e-monsite.com/> (consulté le 22/10/2020).
- [94] **EDF** : Energies renouvelables, site web : <https://www.edf.fr/> (consulté le 22/09/2020).
- [95] **Anonyme** : Généralité sur les énergies renouvelables, site web : <https://pmb.univ-saida.dz/> (consulté le 23/10/2020).
- [96] **Manam, K., DESCAMPS, M.**, (2012) : L'énergie éolienne, site web : <https://sites.google.com/site/lenergieeoliennedm/> (consulté le 23/10/2020).
- [97] **LANDES**, (Annexe 2008) : L'énergie solaire thermique, conseil général des Landes, site web : <https://www.landes.fr/> (consulté le 25/10/2020).
- [98] **Derouin, F.**, (2010) : Comparaison des énergies fossiles et renouvelables à l'échelle humaine, site web : <http://francois.derouin.free.fr/> (consulté le 26/10/2020).
- [99] **Fb Procèdes**, Spécialiste du dégrilleur : DEGRILLEUR AUTOMATIQUE TYPE NG, site web : <https://www.fb-procedes.com/> (consulté le 03/10/2020).
- [100] **Noredine Grim**, (2018) : Energie solaire : l'Algérie enfin déterminée à exploiter son énorme potentiel, site web : <https://www.algerie-eco.com/> (consulté le 6/11/2020).
- [101] **Solaris-Store**, Spécialiste de l'autonomie solaire, site web : <https://www.solaris-store.com/> (consulté le : 06/11/2020).