

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

N° :



DOMAINE : SIENCE ET TECHNOLOGIE
FILIERE : DE TECHNOLOGIE
OPTION : MAINTENANCE DES
INSTALATION HYDRAULIQE

Mémoire présenté pour l'obtention
Du diplôme de Master 2 Académique

Par: Toufik Said et Kamal Mokhtari

Intitulé

**Modélisation et montage d'un prototype de traitement
d'eau par électrodialyses avec énergie solaire.**

Soutenu devant le jury composé de:

Nom et prénom Enseignant Université De M'sila Président Mr.Bouabdallah


Encadreur: Mr. Mezali Farouk Université De M'sila Rapporteur Mr. Mezali

Co-encadreur: Mr. Issaad Azzouz Université De M'sila Examineur Mr.Mahdi

Année universitaire :2016 /2017



REMERCIEMENT



*Je Nous tenons à tout premièrement Dieu le tout puissant
Pour la volonté, la santé et la patience, qu'il nous a donné
durant toutes ces longues années.*

*En second lieu, Je tiens à remercier aussi et chaleureusement ma mère
nous tenons à remercier notre encadreur **Mr : Mezali Farouk** pour
l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport
considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon port.
Nous tenons à remercier vivement toutes personnes qui nous ont aidés à
élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous ont aidés de près
ou de loin à accomplir ce travail.*

*Nos remerciements à tous les membres du jury qui ont accepté de juger
notre travail.*

*En fin, nous tenons à exprimer notre reconnaissance à tous nos amis et
collègues pour le soutien moral matériel.*

Kamal & Toufik





DEDICACES

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chères Mères et à mon chers Pères, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

A mes Chers frères, **RABEH . BADEL et MOHAMED**

A mes Chères Sœurs,

A toute ma famille.

A mes amis

Saad ; Hicham ; Gharbi ; Nouri ; fateh ; ba3bon ; tayeb ; Bilal ; Foudil ;

Toufik ; Walid ; Sadem ; Ward ;

A tous les amis

➤ **KAMAL MOKHTARI**



DEDICACES

Je tiens à dédier ce mémoire :

A ma très chères Mères et à mon chers Pères, en témoignage et en gratitude de leurs dévouement, de leurs soutien permanent durant toutes mes années d'études, leurs sacrifices illimités, leurs réconfort moral, eux qui ont consenti tant d'effort pour mon éducation, mon instruction et pour me voir atteindre ce but, pour tout cela et pour ce qui ne peut être dit, mes affectations sans limite.

A ceux qui sont la source de mon inspiration et mon courage, à qui je dois de l'amour et de la reconnaissance :

*A mes Chers frères : Samir- Faisal- Adel- Riyadh- Saddam hossine- Kamal-
Seifdine*

Ma fiancée Hanane

A mes Chères Sœurs.

A toute ma famille.

*A mes amis : Bilal.B - Ayoub - Abdellah – Walid - Kamal.M - Mokhtar -
Mohamed - Sufian A tous les amis*

➤ *Toufik Said*



Liste des symboles

E : Eclairement (W/m^2).

D : Diamètre de soleil ($1.39.10^9m$).

D_t : Diamètre de soleil ($1.27.10^7m$).

D_{LTS} : Distance moyenne soleil terre ($1.5.10^{11}m$).

R_p : Résistance parallèle shunt(Ω).

R_s : Résistance série(Ω).

I_{ph} : Le photo-courant (A).

I_{sat} : Courant de saturation (A).

T_c : Température de jonction ($^{\circ}K$).

G : L'éclairement de référence ($1000 W/m^2$).

α : Le coefficient de courant en fonction de température ($A/^{\circ}C$).

T_{ref} : La température de référence ($298 ^{\circ}K$).

n : Facture de non idéalité de la jonction.

I_{cc} : Le courant de court-circuit (A).

V_{co} : La tension de circuit ouvert (V).

N_s : Nombre de modules dans le panneau en série.

N_p : Nombre de modules dans le panneau en parallèle.

P_{max} : La puissance maximale produite PV (W).

V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).

I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).

V_{opt} : Tension optimale (V).

I_{opt} : Courant optimum (A).

V_{co} : Tension à circuit ouvert (V).

I_{cc} : Courant de court-circuit (A)

K : coefficient de Boltzman ($1.38.10^{-23} J / K$)

T_c : Température de la cellule (C°)

Abréviation utilisées

PV: Panneau Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

DC: Courant Continu (Direct Current).

AC: Courant Alternatif (Alternative Current).

Table des matières

Introduction Générale.....	1
Chapitre I. Irrigation et salinité	
Introduction.....	3
I.1. L'irrigation.....	3
I.1.1. Définition d'irrigation.....	3
I.1.2. Les systèmes d'irrigation.....	3
I.1.2.1. Les systèmes gravitaires.....	3
I.1.2.2. Les systèmes sous pression.....	3
I.2. la salinisation.....	5
I.2.1. Définition de la salinisation.....	6
I.2.2. Origine de la salinisation.....	6
I.2.3. Salinité dans le monde.....	7
I.2.4. Salinité en Algérie.....	8
I.2.5. Causes de la salinité des sols.....	9
I.2.6. Définition de sols salés (sols halomorphes).....	9
I.2.6.1. Facteurs intervenant dans le processus de la salinisation.....	9
I.2.7. Causes de la salinisation des sols.....	10
I.2.8. Salinisation secondaire.....	10
I.2.8.1. Critères de qualité des eaux destinées à l'irrigation.....	11
Conclusion.....	11
Chapitre II. Dessalement par électrodialyse	
Introduction.....	13
II.1. Généralités sur le dessalement.....	13
II.2. Eaux saumâtres.....	13
II.3. Les principales technologies de dessalement.....	13
II.4. Dessalement de l'eau par électrodialyse.....	13
II.4.1. Principe et définition.....	14
II.5. Membranes échangeuses d'ions.....	15
II.5.1. Principe et définition.....	16
II.6. Classification des membranes.....	17

II.7. Propriétés caractéristiques.....	17
II.7.1. Le taux d'hydratation.....	17
II.7.2. La résistance électrique.....	17
II.7.3. La sélectivité.....	17
II.8. Membranes homopolaires.....	17
II.9. Membranes bipolaires.....	18
II.9.1. Principe et définition.....	18
II.10. Propriétés caractéristiques.....	18
II.11. Applications de l'électrodialyse.....	19
II.12. La technologie d'un électrodialyseur.....	19
II.12.1. Description générale.....	19
II.12.2. Electrode.....	21
II.12.3. Compartiment.....	21
Conclusion.....	21

Chapitre III. modélisation et simulation de photovoltaïque

Introduction.....	22
III.1. L'énergie solaire.....	22
III.2. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire.....	23
III.3. La Cellule photovoltaïque.....	23
III.4. Principe de fonctionnement.....	24
III.7. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque).....	25
III.8. Générateur photovoltaïque.....	26
III.9. paramètre photovoltaïque.....	26
III.9.1. Courant de court-circuit ICC.....	26
III.9.2. Tension en circuit ouvert VCO.....	27
III.9.3. Point de puissance maximale Pm.....	27
III.9.4. Rendement énergétique η	27
III.9.5. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque.....	28
III.10. Caractéristique courant-tension d'un module.....	28
III.10.1. Panneau photovoltaïque.....	29
III.11. Avantages et inconvénients d'une installation PV.....	29

III.11.1. Avantages.....	29
III.11.2. Inconvénient.....	33
III.12. Les convertisseurs statiques.....	33
III.12.1. Les Hacheurs.....	34
III.12.2. Les onduleurs.....	34
III.12.3. Principe de fonctionnement d'un onduleur.....	34
III.12.4. La commande de la tension de convertisseur DC/DC.....	35
III.12.5. Méthodes à contre réaction de courant.....	35
III.12.6. Méthodes à contre réaction de puissance.....	35
III.13. Modélisation d'un système photovoltaïque.....	35
III.13.1. Le générateur photovoltaïque « GPV ».....	35
III.13.2. Modélisation du système photovoltaïque.....	35
III.14. Simulation étudié.....	35
III.14.1. Résultat de simulation.....	36
Conclusion.....	37

Chapitre IV. Résultat et discussions

Introduction.....	38
IV.1. Modélisation Mathématique.....	39
IV.2. Résultats Et Discussion.....	46
IV.3. Résultats Expérimentaux.....	52
Conclusion.....	54
Conclusion générale.....	55

Liste des Tableaux

Tableau I.1 Superficie affectée par la salinité dans le monde [11].	8
Tableau I.1 Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation [21].	12
Tableau II.1 Principaux types des charges fixes utilisés dans les ME.	16
Tableau II.2 présente les principales applications de l'électrodialyse par secteur d'activité... ..	19
Tableau IV.1 Les valeurs de p, q, r et s dans les fonctions polynomiales de 3e degré De concentration d'aliments.	45
Tableau IV.2 Conditions auxquelles la valeur de β est nulle.	45

Liste des figures

Figures du chapitre I

Figure I.1 : Les systèmes d'irrigation.	3
Figure I.2 : Irrigation en bassins (plus connue).....	3
Figure I.3 : Irrigation à la raie	4
Figure I.4 : Irrigation par siphon ou rampes à vannettes.....	4
Figure I.5 : Irrigation par aspersion.....	Error! Bookmark not defined.
Figure I.6 : Irrigation par aspersion.....	Error! Bookmark not defined.
Figure I.7 : Les conséquences de l'eau salée d'irrigation	6
Figure I.8 : Origine de la salinisation du sol.	8

Figures du chapitre II

Figure II.1 : Procédés de dessalement de l'eau de mer	13
Figure II.2 : Principe de dessalement d'une eau saline par électrodialyse.....	14
Figure II.3 : Représentation schématique d'une membrane échangeuse de cations	15
Figure II.4 : Représentation schématique du fonctionnement d'une membrane bipolaire	18
Figure II.5 : Technologie d'un électrodialyse.	20

Figures du chapitre III

Figure III.1 : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque.	22
Figure III.2 : Structure basique d'une cellule solaire	24
Figure III.3 : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.....	25
Figure III.4 : Types de cellules photovoltaïques. (a) silicium monocristalline, (b) silicium poly cristallin, (c) silicium amorphe	25
Figure III.5 : Les différentes zones de Caractéristique I(V) entre générateur et module Photovoltaïque.....	27
Figure III.6 : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.....	28
Figure III.7 : Panneau photovoltaïque.....	28
Figure III.8 : les différents types de convertisseurs statiques.	30
Figure III.9 : Symbole d'un convertisseur DC-DC.....	31
Figure III.10 : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.	31
Figure III.11 : Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I_{sc}	32
Figure III.12 : System photovoltaïque.....	33
Figure III.13 : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.	33
Figure III.14 : Modèle SIMULINK de la système PV étudié.	35
Figure III.15 : Evolution de tension, courant et puissance du GPV	36
Figure III.16 : Evolution de tension, courant et puissance de la charge.....	36

Figures du chapitre IV

Figure IV.1 : Une vue schématique d'une cellule ED	38
Figure IV.2 : Élément différentiel du compartiment dilué.....	39
Figure IV.3 : Courbe d'étalonnage du conductimètre	46
Figure IV.4 : Différentes concentrations C_0 dans le cas d'utilisation de la tension 6V	49
Figure IV.5 : Différentes concentrations C_0 dans le cas d'utilisation de la tension 4V	49
Figure IV.6 : Différentes concentrations C_0 dans le cas d'utilisation de la tension 2V	50
Figure IV.7 : Différentes concentrations C_0-C dans le cas d'utilisation de la tension 6V	50
Figure IV.8 : Différentes concentrations C_0-C dans le cas d'utilisation de la tension 4V.	51
Figure IV.9 : Différentes concentrations C_0-C dans le cas d'utilisation de la tension 2V.	51

Figure IV.10 : Un image montre le montage de système.....	52
Figure IV.11 : Un image montre le bassin.	52
Figure IV.12 : Un image montre l'installation électrique.....	53
Figure IV.13 : Un image montre le convertisseur DC/DC.....	53

Résumé:

Dans ce mémoire, nous avons étudié la modélisation et le montage d'un prototype du traitement d'eau par électrodialyse avec énergie solaire. La modélisation et la simulation de l'électrodialyse est faite à l'aide d'un modèle 1D qui regroupe les paramètres fluído-physico-chimiques du phénomène, le code écrit est fait par MATLAB. La modélisation et la simulation de la partie solaire a été réalisé par MATLAB/SIMULINK. Un montage prototype est réalisé au laboratoire afin de confronter les résultats théoriques à ceux de l'expérience. Le but ultime était de réaliser un kit-expérimentale portatif complètement autonome destiné aux agriculteurs.

Mots clefs : électrodialyse, photovoltaïque, convertisseur dc-dc, membrane, agriculteurs.

Summary:

In this paper, we studied the modeling and the assembly of a prototype of water treatment by electro dialysis with solar energy. The modeling and the simulation of the electro dialysis is done using a 1D model, which combines the fluído-physico-chemical parameters of the phenomenon, the written code, is made by MATLAB. The modeling and simulation of the solar part was carried out by MATLAB / SIMULINK. A prototype assembly is carried out in the laboratory to compare the theoretical results with those of the experiment. The ultimate goal was to produce a completely self-contained portable experimental kit for farmers.

Keywords: électrodialysis, photovoltaïque, converter dc-dc, membrane, farmers

خلاصة:

في هذه المذكرة قمنا بدراسة نمذجة و إعداد نموذج مصغر في المخبر لمعالجة المياه عن طريق التحليل الكهربائي ممون عن طريق الطاقة الشمسية. النمذجة و المحاكات تمت عن طريق نموذج ذو بعد واحد يحوي معظم العوامل المتعلقة بالظاهرة (سائلية، كيميائية، فيزيائية). المحاكات تمت عن طريق الماتلاب و سيمولينك. نموذج مصغر قمنا بإعداده في المخبر كي نقوم بمواجهة النتائج النظرية بنظيرتها العملية. الهدف النهائي من العمل هو إعداد حزمة عملية لمعالجة ملوحة المياه مستقلة كليا موجهة للاستعمال الفلاحي



Introduction générale

Introduction général

La salinité est l'accumulation de sels solubles dans le sol. Ces sels sont le potassium (K^+), le magnésium (Mg^{+2}), le calcium (Ca^{+2}), le sulfate et le sodium (Na^+), on l'appelle : accumulation de sodium. Ce processus se produit par une grande proportion par l'accumulation des sels dans l'eau dues à l'irrigation inappropriée, par exemple l'irrigation avec de l'eau riche en sels ou eaux usées.

L'accumulation de sels et de sels de sodium représente un grand danger pour l'écosystème. L'eau salée provoque l'augmentation et la fixation du sodium au niveau du sol fertile, ce qui entraîne une dispersion de la boue, une détérioration de la structure du sol et entraîne un manque d'oxygène et influence la croissance des plantes, ce qui entraîne la dégradation de la production agricole et à terme une salinisation irréversible du sol, ce qui réduit la production agricole du pays.

L'Algérie est un pays dont les terres sont exposées à ce problème, en particulier dans les zones proches de la mer ou des zones arides ou semi-arides dont les terres sont plus exposées à la salinisation. Nous trouvons ici un gros problème qui peut affecter la production agricole du pays, qui doit être combattu et éliminé ou essayer de minimiser sa gravité.

Nous pensons que les opérations d'irrigations effectuées par le fermier algérien sont des opérations inappropriées, surtout avec la pénurie des pluies, le fermier recourt à des eaux de saumâtres ou d'égout sans connaître la dangerosité de tels ces opérations.

Nous avons proposé une solution simple et peu coûteuse pour l'agriculteur qui peut lui assuré la préservation de ses terres et la protéger du problème de la salinisation qui conduit à la perte définitive de la fertilité des terres. Le procéder proposer vise à proposer une solution efficace et pratique à ce problème.

Il y a plusieurs façons de traiter l'eau salée, ou ce qu'on appelle le dessalement de l'eau, l'objectif est d'éliminer ou de réduire la concentration du sel jusqu'à les norme établies pour l'irrigation de façon à préserver les terres agricoles. Parmi ces méthodes, il y a le traitement électrique ; la méthode est basée sur la circulation d'un courant entre une électrode bipolaire positif et l'autre négatif, ce qui permet la circulation des électrons et des ions entre deux électrodes, ce processus est appelé électrodialyse.

Dans notre travail, nous voulons fournir un dispositif simple aux paysans, un dispositif économique basé sur l'énergie électrique des panneaux solaires, qui convertissent l'énergie solaire en énergie électrique afin d'effectuer le processus de dessalement.

Notre mémoire s'articule sur quatre chapitres :

Le premier chapitre présente le problème et le danger que représente la salinisation des terres et les normes qui doit respecter l'eau d'irrigation afin de pouvoir contrôler ce fléau.

Nous avons consacré le deuxième chapitre à l'étude de l'électrodialyse et son rôle dans le processus de dessalement de l'eau. Une présentation sur les membranes a été faite. Nous avons étudié aussi les propriétés physiques et chimiques qui se produisent au cours de ce processus.

Le troisième chapitre porte sur la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système photovoltaïque (PV) adapté par une commande numérique (commande MPPT).

Nous avons étudié aussi convertisseur DC/DC de type buck et boost qui fournit une tension continue. Ce convertisseur présente l'avantage d'être un élévateur et abaisseur de tension ce qui permet à ce système de s'adapter aux changements météorologiques et pour extraire le maximum de puissance disponible et un autre convertisseur DC/AC.

Le chapitre quatre a été réservé à la modélisation et à la simulation du processus de l'électrodialyse dans un canal rectangulaire. La complexité du phénomène nous a poussé à adopté un modèle monodimensionnel dans un régime permanent. Il lie la concentration des sels dans l'eau en fonction de l'abscisse x du canal. Nos résultats ont été confronté avec des résultats de référence et avec des mesures sur notre modèle réduit.



Chapitre 1
Irrigation et salinité

Introduction

Dans ce chapitre on va parler sur l'irrigation et la salinité des sols. Le but est d'expliquer ces deux concepts afin de montrer l'utilité de traitement proposé.

I.1. L'irrigation

I.1.1. Définition d'irrigation

L'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production et permettre leur développement normal, en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe, en particulier dans les zones arides [1].



Figure I.1: Les systèmes d'irrigation.

I.1.2 Les systèmes d'irrigation

I.1.2.1. Les systèmes gravitaires

I.1.2.1.1 Irrigation en bassins (plus connue)

L'eau est apportée sous forme d'une nappe dans un bassin (qui peut être cloisonné), aménagé sur un sol nivelé (pente de 0,1 à 1 %) [2].



Figure I.2 : Irrigation en bassins (plus connue).

I.1.2.1.2 Irrigation à la raie

L'eau est apportée par ruissellement dans des sillons séparés d'une distance de 0,6 m à 1,25 m ; le sol est nivelé (pente de 0,2 à 3%) [2].



Figure I.3 : Irrigation à la raie.

I.1.2.1.3 Irrigation par siphon ou rampes à vannettes

L'eau est amenée à la raie par des siphons ou des rampes à vannettes qui permettent la réduction de l'érosion en tête de la raie, une meilleure maîtrise des débits et de l'uniformité de répartition de l'eau [2].



Figure I.4 : Irrigation par siphon ou rampes à vannettes.

I.1.2.2. Les systèmes sous pression

I.1.2.2.1 Irrigation par aspersion

Épandage de l'eau sous forme de pluie avec régulation et uniformité de la dose apportée, à condition que la zone ne subisse pas de vents supérieurs à 4 m/s ; les systèmes d'irrigation par aspersion sont soit fixes, soit mobiles [2].



Figure I.5 : Irrigation par aspersion.

I.1.2.2.2. Irrigation localisée

L'eau circule dans des tuyaux souples, de petits diamètres, disposés à la surface du sol et sont munis de dispositifs "égoutteurs" qui apportent l'eau au pied des végétaux. Les systèmes d'irrigation localisée les plus répandus sont la goutte à goutte (indiqué pour le maraîchage) et le micro-jet (indiqué pour l'arboriculture fruitière) [2].



Figure I.6 : Irrigation par aspersion.

Les systèmes d'irrigation sous pression engendrent une économie d'eau moyenne de 30 à 60 % par rapport aux systèmes gravitaires. Les systèmes d'irrigation localisée, quant à eux, peuvent engendrer une économie d'eau allant jusqu'à 50 % par rapport aux systèmes par aspersion (limitation maximale de l'évaporation et de la percolation, car l'eau est livrée à faible dose, qui n'humidifie qu'une fraction du sol) [2].

I.2 la salinisation

I.2.1 Définition de la salinisation

La salinisation est un processus d'enrichissement d'un sol en sels solubles qui aboutit à la formation d'un sol salin [3]. Ce phénomène s'établit lorsque les concentrations en (Na^+), (Ca^{+2}), (Mg^+) sous formes de chlorures, carbonates, ou sulfates sont présentes en concentrations anormalement élevées. Un sol salé indique la prédominance de (NaCl). La salinisation est définie par la FAO (2001), comme un enrichissement en sels solubles de la surface et de la tranche supérieure du sol lorsque la salinité dans les 20 cm sommitaux dépasse 1 à 2% (20g de sel par Kg de sol). La salinité est un facteur limitatif majeur de la productivité agricole. Ces charges en sels soumettent les plantes à un stress permanent [4]. La salinisation a été identifiée comme un processus majeur de la dégradation des terres. Le monde perd au moins 3 ha de terres arables chaque minute à cause de la salinité du sol [5], Actuellement 800 millions d'hectares de terres à travers le monde sont affectés par la salinité; 397 millions ha sont salins et 434 ha sont salins et sodiques [6]. Selon la banque mondiale, près de 2 milliards \$US sont perdus à cause de la salinité des sols [7] [5]



Figure I.7 : Les conséquences de l'eau salée d'irrigation.

I.2.2 Origine de la salinisation

Il est commode de distinguer trois hypothèses Dans un premier cas, les horizons supérieurs du sol sont salés avant toute intervention humaine. Il est hors de sujet de traiter ici la genèse de cette salinité qui peut avoir diverses causes, marines ou continentales. Un second cas provient de l'emploi de l'eau sur des sols initialement sains. Il est aisé de comprendre que si le sol reçoit, par irrigation et par pluie, la quantité d'eau correspondant exactement à la consommation des végétaux et à l'évaporation du sol, les sels que la végétation n'absorbe pas s'accumuleront, car l'eau d'irrigation, qu'elle soit de surface ou de profondeur, est toujours minéralisée, ne serait-ce que très faiblement. Il n'est besoin que d'observer ce qui se passe dans la plupart des cas avec une plante en pot, gardée en appartement : après un certain temps, des efflorescences blanchâtres qui se forment, mais elles disparaissent, si on apporte un excès d'eau et qu'on le laisse ensuite s'écouler librement. La salinisation par irrigation n'apparaît pas en zone humide car les eaux déployées ne sont pas riches en sels, sauf cas exceptionnel et, qu'en outre, les pluies sont assez abondantes pour lessiver les sols. Il n'en est pas de même en zone aride ou semi-aride, car la concentration en sels des eaux utilisées est souvent non négligeable du fait d'une faible pluviométrie, conjuguée à une forte évaporation, et les pluies ne provoquent pas un lessivage suffisant [8].

Les sols salés sont naturellement présents sous tous les climats et sur les continents Sablons [9]. Ils sont étroitement liés à une source de salinité d'ordre géologique (évaporites), hydrogéologique (eaux souterraines) ou hydrologique (eau marine). Les processus de formation des sols salés sont associés à la redistribution des sels dans les pédala sages par divers agents, l'eau mobilisant les sels à l'état dissous, le vent à l'état dissous ou cristallisé...etc.

L'accumulation des cristaux de sels est favorisée sous les climats où les processus évaporatoires dominants Bresler et al et Chhapra [9].

Par ailleurs, le développement mondial de la culture irriguée entraîne souvent une extension secondaire des terres salées, liée à la dégradation chimique et physique des sols et à la mauvaise conduite de l'irrigation Ghassemi et al et Cheverry et Bourrié [9].

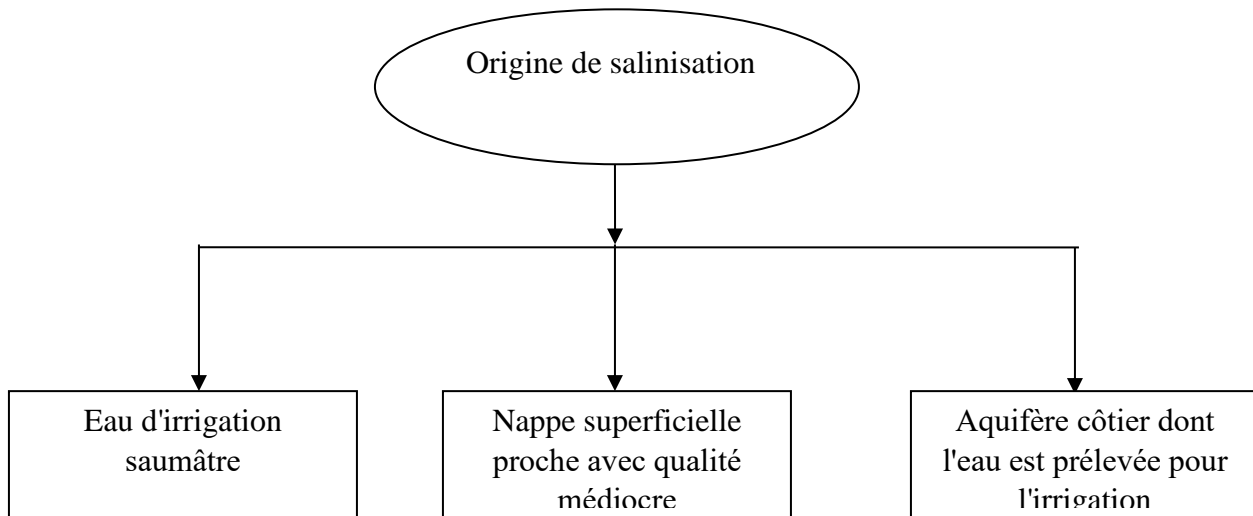


Figure I.8: Origine de la salinisation du sol [10].

I.2.3 Salinité dans le monde

A l'échelle mondiale, les sols salés occupent des surfaces étendues et constituent un grand problème pour l'agriculture. La surface affectée par la salinité dans le monde est évaluée à 954,8 millions d'hectare, soit 23 % des terres cultivées [11] Le tableau suivant présente la superficie affectée par la salinité dans le monde.

Tableau I.01 : Superficie affectée par la salinité dans le monde [11].

Région	Superficie (millions d'hectares)
Afrique	80.5
Europe	50.8
Amérique du Nord	15.7
Amérique du Sud	129.2
Australie	357.3
Mexique et Amérique centre	2
Asie du Sud Est	20
Asie du centre et du Nord	221.7
Asie du sud	87.6
Total	954.8

I.2.4. Salinité en Algérie

En Algérie, les sols agricoles sont dans leur majorité affecté par la salinité ou susceptibles de l'être [12]. Ils sont répons dans les basses plaines d'Oranie, dans la vallée de Mina près de Relizane, sur les hautes plaines au Sud de Sétif et de Constantine, aux bords de certains Chotts comme Chott Melghir. Ils ont aussi une grande extension dans les régions sahariennes au Sud de Biskra jusqu'à Touggourt, Ouargla et d'autres [13].

D'après HALITIM (1988), dans les régions arides, les sols salés représentent environ 25% de la surface cartographiée. Soit 3,2 millions d'hectares [14]. Les sols situés au Sud sont nettement plus sodiques que ceux du Nord [15].

I.2.5 Causes de la salinité des sols

Les rares précipitations, l'évaporation élevée, l'irrigation avec de l'eau saline et les pratiques culturales sont parmi les facteurs principaux qui contribuent à la salinité croissante. La salinisation secondaire, en particulier, aggrave le problème où une fois que les superficies agricoles productives deviennent impropres à la culture due à la qualité inférieure de l'eau d'irrigation [14].

La salinité excessive affecte la rhizosphère et limite la répartition des plantes dans leur habitat naturel. Le fort éclaircissement et les rares pluies dans les régions semi-arides et arides accentuent la salinisation des périmètres irrigués et les rendent impropres aux cultures [15].

L'eau saline occupe 71% de la surface de la terre. Environ la moitié des systèmes d'irrigation existant du monde sont sous l'influence de la salinisation. De tels sols défavorables, de faible fertilité sont généralement peu convenables pour la production agricole, entraînant la réduction inacceptable de rendements. En raison du besoin accru de distribution de la production alimentaire et de l'augmentation des sols affectés par la salinité

I.2.6 Définition de sols salés (sols halomorphes)

Les sols salins sont naturellement présents sous tous les climats et sur tous les continents. Ils sont là où l'évaporation excède les précipitations pluviales de façon permanente ou temporaire, ils sont étroitement liés à une source de salinité d'ordre géologique (évaporites), hydrogéologique (eaux souterraines) ou hydrologique (eaux marines) [16].

Les sols salés sont ceux dont l'évolution est dominée par la présence de fortes quantités de sels solubles, ou par la richesse de leur complexe absorbant en ions, provenant de ces sels et susceptibles de dégrader leurs caractéristiques et propriétés physiques, en particulier leur structure. On parle en général de sol salé lorsque la concentration des solutions dépasse 0,5 g/l [17]. Un sol est dit salé quand la conductivité électrique est supérieure à 4ds/m.

Génétiquement, les sols sont constitués par deux unités très différentes, les salisols, dans lesquels les sels de sodium, de calcium ou de magnésium sont sous la forme soluble de sels simples ou complexes. Les sodisols à complexe sodique dans lesquels les cations, essentiellement le sodium sont sous la forme échangeable, les sels solubles étant très peu abondants [18].

Les sols salins contiennent souvent des niveaux considérables de sels tels que (Na_2SO_4), ($MgSO_4$), ($CaSO_4$), ($MgCl_2$), et (Na_2CO_3) [19].

Cependant, les sols sont souvent dominés par les sels de sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}) et/ou magnésium (Mg^{+2}). Le sodium (Na^+) est le sixième élément le plus abondant sur terre, et les sels du sodium (Na^+) se dissolvent aisément dans l'eau [20].

I.2.6. Facteurs intervenant dans le processus de la salinisation

La salinisation des sols peut être due à :

La lixiviation des sels solubles et/ou à l'évaporation, qui déposent leurs sels dans lessols. En régime, non saturé, la remontée capillaire entraîne un transport des sels par flux de masse vers la surface du sol où ils s'accumulent après évaporation de l'eau [21].

I.2.7 Causes de la salinisation des sols

Bien que l'altération des roches et les minéraux primaires soit la principale source de tous les sels, les sols salés sont rarement formés par accumulation de sels *in situ*. Plusieurs causes sont à l'origine de ce phénomène [20].

D'après [16], la salinisation d'un milieu, implique la présence d'une source de sels qui peut être naturelle, dénommée primaire, et une salinisation anthropique, généralement liée à l'irrigation, que l'on appellera secondaire.

I.2.8 Salinisation secondaire

Près de 20% des terres salinisées ont une origine humaine ou anthropique et sont qualifiées de «secondaires». L'irrigation est la principale cause anthropique de la salinisation des sols [5]. Dans environ la moitié des situations, le développement de l'irrigation s'est accompagné de l'apparition de processus de salinisation, sodisation ou alcalinisation des sols d'importance variable. Si les situations apparaissent très diverses en raison des caractéristiques du milieu naturel, des pratiques agricoles ou de la gestion de l'eau, ces dégradations ne sont pas inéluctables et apparaissent pour l'essentiel comme la résultante de mode de gestion inappropriée des ressources en sol et en eau [14].

Dans les aires de grande irrigation s'ajoute l'inadéquation du réseau de drainage des eaux usées souvent insuffisant par sa densité, par la profondeur des drains, par sa pente et son mauvais état [11].

L'irrigation altère le bilan hydrique du sol en générant un apport d'eau supplémentaire ; cet apport est toujours associé à un apport de sels. En effet, même une eau douce de la meilleure qualité contient des sels dissous et, si la quantité de sels apportée par cette eau peut sembler négligeable, les quantités d'eau apportées au fil du temps entraînent un dépôt cumulé de sels dans les sols qui peut s'avérer considérable.

Les échanges de cations entre le sol et l'eau d'irrigation sont le début de la salinisation du sol [5].

I.2.8 Critères de qualité des eaux destinées à l'irrigation :

Les caractéristiques de qualité chimique et physique sont identiques pour n'importe quelle eau d'irrigation. À cet égard, les directives générales présentées dans le tableau suivant peuvent être employées pour évaluer la qualité de l'eau utilisée à des fins d'irrigation, en mesurant des constituants chimiques tels que les sels dissous, le contenu en sodium et les ions toxiques.

Tableau I.2 : Directives pour l'interprétation de la qualité de l'eau pour l'irrigation [21].

Problèmes potentiels	Unités	Degré de restriction à l'usage		
		Aucun	Léger à modéré	Sévère
Salinité				
EC_w	Ds / m	< 0.7	0.7 – 3.0	> 3.0
Ou				
TDS	Mg/l	< 450	450 - 2000	> 2000
Infiltration				
$SAR_2 = 0 - 3$ et $EC_w =$	ds/l	> 0.7	0.7 - 0.2	< 0.2
$= 3 - 6$ =		>1.2	1.2 – 0.3	< 0.3
$= 6 - 12$ =		>1.9	1.9 – 0.5	< 0.5
$= 12 - 20$ =		>2.9	2.9 – 1.3	< 1.3
$= 20 - 40$ =		>5.0	5.0 – 2.9	< 2.9
Toxicité Spécifique des ions				
Sodium (Na)				
Irrigation de surface	SAR	<3	3 – 9	> 9
Irrigation par aspersion	méq/l	<3	> 3	
Chlorure (Cl)				
Irrigation de surface	méq/l	< 4	4 -10	> 10
Irrigation par aspersion	méq/l	< 3	> 3	
Boer (B)	mg/l	> 0.7	0.7 – 3.0	>3.0
Effets divers				
Azote ($NO_3 - N$) ³	mg/l	< 5	5 – 30	>30
Bicarbonate (HCO_3)	méq/l	<1.5	1.5 – 8.5	>8.5
PH		Gamme normale 6.5 – 8.4		

- EC_w signifie la conductivité électrique en deci Siemens par mètre à 25°C.
- SAR signifie le taux d'adsorption de sodium (sodium adsorption ratio).
- $NO_3 - N$ signifie l'azote sous forme de nitrate rapporté en terme d'azote élémentaire.

Conclusion

La salinité est un phénomène complexe qui conduit à un stress osmotique du à la diminution des quantités d'eau disponible au niveau de la rhizosphère, suite à la réduction de l'aptitude des plantes à absorber l'eau. Par conséquent, cela provoque une baisse de croissance de la plante stressée et sa productivité de biomasse végétale.

Par ailleurs, la salinité provoque l'agrégation des particules d'argile, ainsi qu'elle modifie les propriétés de gonflement de l'argile et leur potentiel de rétention d'eau.



Chapitre II
dessalement par électrodialyse

Introduction

Dans ce chapitre nous parlons du dessalement de l'eau et salée, et il y a plusieurs façons de dessalé.

Dans cette étude nous comptons sur le dessalement par électrodialyse pour réduire les risques de salinité sur le sol [22].

II.1. Généralités sur le dessalement

Le dessalement de l'eau est un moyen d'obtenir de l'eau potable qui est de plus en plus utilisée à l'échelle planétaire. C'est un processus qui consiste à extraire le sel d'une eau salée ou d'une eau saumâtre pour la rendre potable ou utilisable pour l'industrie ou l'irrigation.

II.2. Eaux saumâtres

On appelle eau saumâtre une eau salée non potable de salinité inférieure à celle de l'eau de mer. La plupart des eaux saumâtres contiennent entre 1 et 10 g de sels par litre. Ce sont parfois des eaux de surface mais le plus souvent des eaux souterraines qui se sont chargées en sels en dissolvant certains sels présents dans les sols qu'elles ont traversés. Leur composition dépend donc de la nature des sols traversés et de la vitesse de circulation dans ces sols. Les principaux sels dissous sont le $(CaCO_3)$, $(CaSO_4)$, $(MgCO_3)$ et le $(NaCl)$.

II.3. Les principales technologies de dessalement :

Les technologies actuelles de dessalement des eaux sont classées en deux catégories (figure 2), selon le principe appliqué :

Les **procédés thermiques** faisant intervenir un changement de phases : la congélation et la distillation.

Les **procédés membranaires**: l'osmose inverse et l'électrodialyse.
et la distillation.

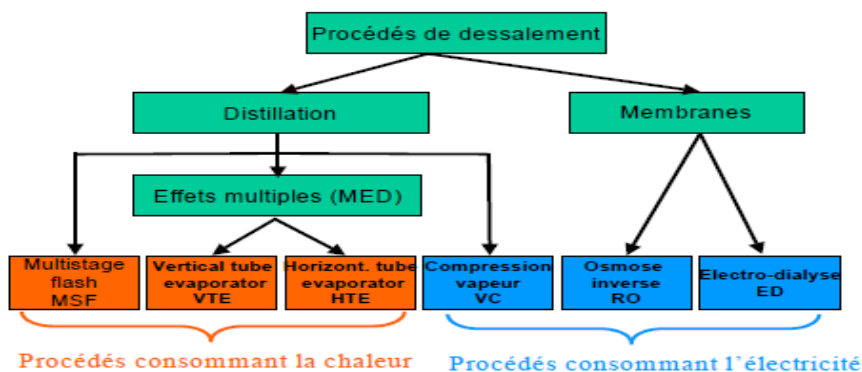


Figure II.1 : procédés de dessalement de l'eau de mer.

sont piégés dans (2) à cause de la MEA. Les anions migrent en sens inverse [23]. Donc, le compartiment (1) dans lequel arrive l'effluent brut s'appauvrit progressivement en espèces ioniques (la solution qui en résulte est appelée « dilué ») tandis que le compartiment (2) s'enrichit en ces mêmes ions (concentré) [24].

Les espèces neutres présentes dans l'alimentation ne sont pas modifiées et se retrouvent dans le dilué. Les électrodes sont maintenues au contact de circuits indépendants seulement destinés à assurer la conduction électrique. Dans les installations industrielles, les empilements peuvent atteindre plusieurs centaines de cellules élémentaires dans des assemblages de type filtre-presses.

II.5. Membranes échangeuses d'ions

II.5.1 Principe et définition

Une membrane échangeuse d'ions, appelée aussi membrane perméable aux ions ou membrane ionique, est constituée d'un matériau généralement macromoléculaire, plus ou moins réticulé en un réseau tridimensionnel insoluble dans l'eau, sur lequel sont fixés de façon covalente de groupements fonctionnels ionisés appelés aussi des ions fixes, neutralisés électriquement par des ions mobiles de signe opposé appelés ions compensateurs ou contre-ions. Ce sont les ions fixes qui sont à la base de la spécificité de la membrane ; s'ils sont de charge négative, la membrane sera sélective aux cations et est dite alors échangeuse de cations (MEC), dans le cas contraire il s'agit d'une membrane échangeuse d'anions (MEA) [25].

Les co-ions sont des ions ayant une charge de même signe que les sites fixes. Ils sont idéalement exclus des transferts au travers de la membrane. Les contre-ions et les co-ions sont les ions composants de l'électrolyte (figure 4).

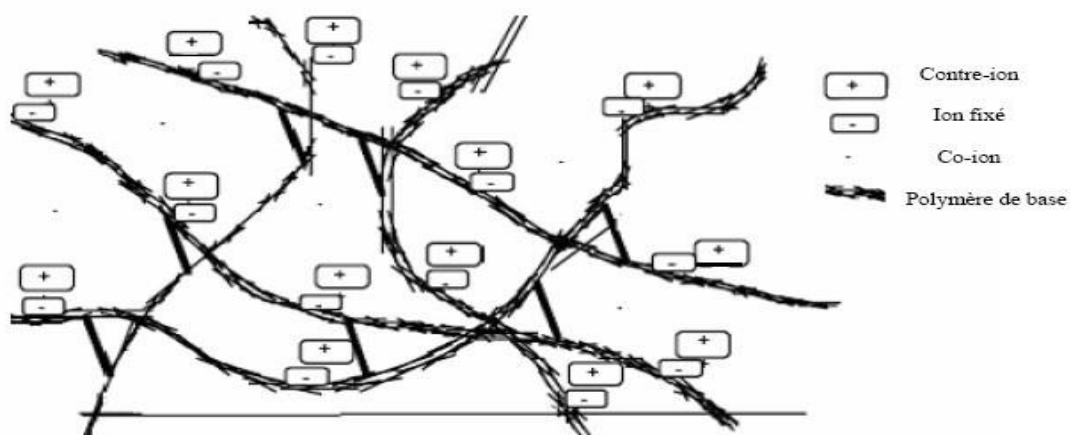


Figure II.3 : représentation schématique d'une membrane échangeuse de cations

Les groupes échangeurs les plus couramment utilisés dans les MEI sont regroupés dans le tableau 2 suivant :

Tableau II.01 : Principaux types des charges fixes utilisés dans les ME.

Type de membrane	Nature du groupement ionique	Caractère conféré à la membrane
MEC	Sulfonique - SO ₃	Acide fort
	Phosphorique - PO ₃ ²⁻	Acide fort
	Carboxylique - COO ⁻	Acide faible
	Arsenique -AsO ₃	Acide faible
MEA	Alkylammonium-NR ₃ ⁺ , NHR ₂ ⁺	Base forte
	Alkylsulfonium-SR ₂ ⁺	Base forte
	Alkylphosphonium-PR ₃ ⁺	Base faible
	Vinylpyridinium - C ₅ H ₄ NH ⁺	Base faible

Les groupes sulfoniques et ammoniums quaternaires confèrent à la membrane dans laquelle ils sont fixés un caractère respectivement acide et basique forts ; on peut admettre que leur dissociation est complète pour tout pH. Les membranes contenant les groupes carboxyliques et ammoniums secondaires ou primaires sont respectivement cationiques et anioniques à caractère acides faibles et basiques faibles. Les membranes d'électrodialyse sont surtout des membranes ioniques fortes [22].

Suivant le type de sites échangeurs (de cations, d'anions ou des deux à la fois), on obtient différents types de MEI que l'on distingue comme suit : les membranes homopolaires et les membranes bipolaires.

II.6. Classification des membranes:

Du point de vue propriétés on distingue deux types de membranes :

Les membranes échangeuses de cations qui sont perméables uniquement aux cations et dont le groupement fonctionnel est en général un groupement acide sulfonique (SO₃⁻) ; par exemple, le copolymère styrène-divinylbenzène ammonium sulfoné .

Les membranes échangeuses d'anions qui sont perméables uniquement aux anions et dont le groupement fonctionnel est un groupement ammonium quaternaire (NR₃⁺) ; par exemple, le copolymère styrène-divinylbenzène ammonium quaternaire [23].

Du point de vue fabrication on distingue deux types de membranes :

Les membranes hétérogènes sont élaborées à partir de particules colloïdales échangeuses d'ions, incorporées dans une résine phénolique ou un polymère (polystyrène ou

polypropylène, par exemple).

Les membranes homogènes sont obtenues par polymérisation directe de monomères fonctionnels ou en fonctionnalisant des films de polymères, c'est-à-dire en y fixant des groupements fonctionnels, par voie chimique ou radiochimique.

II.7. Propriétés caractéristiques

Que les membranes soient homogène ou hétérogène, elles doivent, pour être utilisées avec succès en électrodialyse, posséder les qualités principales suivantes :

II.7.1. Le taux d'hydratation

Ou gonflement, résulte d'un compromis entre l'accessibilité des sites échangeurs d'ions, d'autant plus élevée que le taux d'hydratation est important, et la résistance mécanique; d'autant plus grande que ce taux est faible.

II.7.2. La résistance électrique

De la membrane contribue à la consommation énergétique. Cependant, dans la pratique, cette contribution est négligeable. La capacité d'échange, exprimée en équivalents par gramme de matériau échangeur, est directement liée au nombre de sites échangeurs (groupements fonctionnels).

II.7.3. La sélectivité

Est exprimée par le nombre de transport t_i , qui représente la fraction du courant transporté par une espèce i , (t_i), ou par une famille d'espèces, les cations par exemple.

II.8. Membranes homopolaires

Les membranes homopolaires ne contiennent qu'un seul site échangeur d'ions. Les membranes échangeuses de cations ou cationiques (MEC) contiennent des groupes fonctionnels chargés négativement tels que SO_3^- , COO^- , PO_3^{2-} , HPO_4^{2-} et $AsSO_3^{2-}$, tandis que les membranes échangeuses d'anions ou anioniques, (MEA) ne portent que des sites chargés positivement tels que NH_3^+ , RNH_3^+ , R_2NH^+ , R_3N^+ , R_3P^+ , R_2S^+ .

Les différents groupes ioniques ont un effet sur la stabilité vu que certains seront dissociés sur tout le domaine de pH pendant que d'autres ne le seront qu'au-delà ou en deçà d'une limite donnée : ces membranes se comportent comme des acides et des bases, forts ou faibles [25].

Les ions échangeables, les contre-ions, sont de signe opposé au groupe fonctionnel fixé sur le matériau et peuvent circuler de site en site.

Les groupes fonctionnels sont appelés ions fixés : les ions de même signe, les co-ions, sont normalement rejetés de la membrane par répulsion électrostatique mais une forte concentration de la solution au contact de la membrane amène parfois certains d'entre eux à tout de même y

pénétrer.

II.9. Membranes bipolaires

II.9.1. Principe et définition

Une membrane bipolaire est constituée de trois couches : une face échangeuse de cations (EC), une face échangeuse d'anions (EA) et une interface hydrophile adjacente (figure 5). Sous l'effet d'un champ électrique dans des conditions spécifiques, l'eau contenue dans la membrane est dissociée en ions H^+ et OH^- . Les faces EC et EA sont disposées respectivement du côté de la cathode et du côté de l'anode, de façon à permettre le transfert des ions ainsi produits vers les solutions adjacentes. L'utilisation d'une membrane bipolaire permet donc de réaliser une titration physique, c'est-à-dire sans ajout d'acide ou de base. En effet, elle produit simultanément des ions H^+ , qui migrent à travers la face EC et provoquent une titration acide dans le compartiment proche de la cathode, et des ions OH^- , qui migrent à travers la face EA et provoquent une titration basique dans le compartiment proche de l'anode. Les compartiments adjacents aux faces EA et EC sont donc appelés respectivement compartiments base et acide. Les MB peuvent être utilisées dans des motifs élémentaires de différentes configurations permettant, par association avec des membranes homopolaires, de réaliser diverses transformations.

II.10. Propriétés caractéristiques

Les caractéristiques principales sont directement liées au principe décrit précédemment :
 perméabilité à l'eau élevée, afin d'entretenir la réaction de dissociation de l'eau.

faible résistance des faces EC et EA au transfert des ions H^+ et OH^- produits.

bonne sélectivité des faces EA et EC.

bonne résistance aux pH extrêmes.

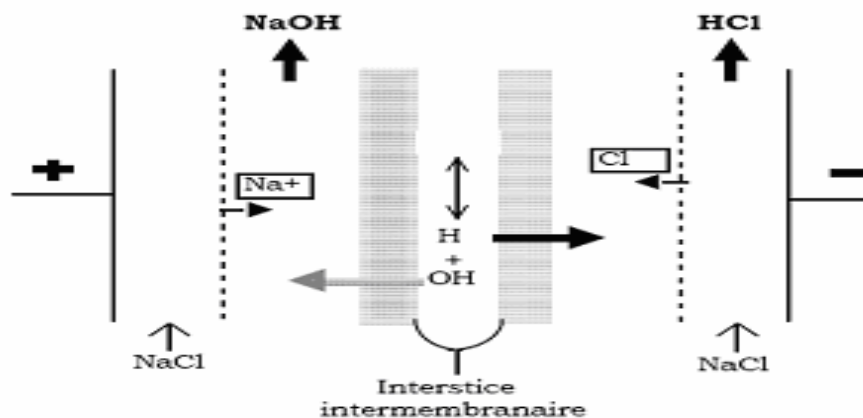


Figure II.4 : Représentation schématique du fonctionnement d'une membrane bipolaire.

II.11. Applications de l'électrodialyse

De nombreuses applications de l'électrodialyse ont été développées lors de ces dernières années. L'intégration de ces technologies dans des procédés de purification ou de production de molécules organiques permet de diminuer, entre autres, les effluents salins générés par l'utilisation des résines échangeuses d'ions [24].

Le tableau 2 présente les principales applications de l'électrodialyse par secteur d'activité.

Domaine d'application	Application
Traitement de l'eau et des effluents	Production d'eau potable à partir d'eau de mer (et production de sel)
	Élimination des nitrates contenus dans les ressources en eau
	Traitement d'effluents d'industries papetières
	Effluents d'industries de traitement de surface
Agroalimentaire	Déminéralisation de lactosérum en vue de la valorisation des protéines
	Stabilisation tartrique du vin
	Déminéralisation de jus sucrés
	Désacidification de jus de fruits
	Production d'acides organique
Chimie fine et pharmacie	Extraction d'acide nitrique d'une solution de glyoxal
	Régénération d'amines dans la purification de fumées d'incinération
	Purification et recyclage de phénylacétate lors de la production de pénicillin
	Préparation de solutions isotoniques
	Purification d'acides aminés
	Production de vitamine C
	Production d'acides organiques

II.12. La technologie d'un électrodialyseur

II.12.1. Description générale

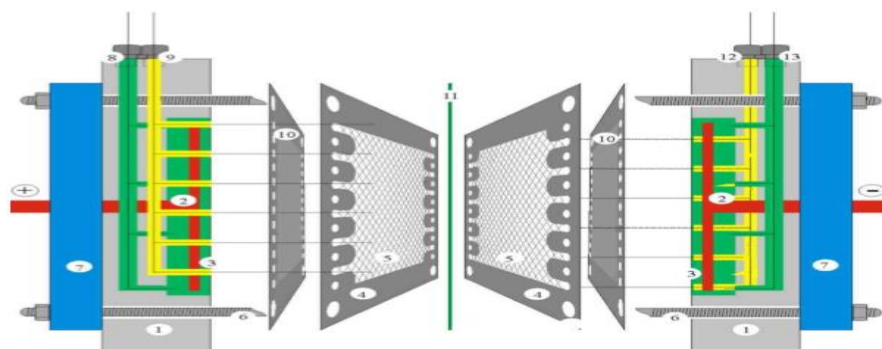
Un électrodialyseur est constitué par un empilement de membranes alternativement échangeuses d'anions et échangeuses de cations, séparées par des compartiments dans lesquels circulent les solutions salines. Cet empilement est serré entre deux presses, soit à l'aide des tiges filtrées et de boulons, soit à l'aide d'un vérin hydraulique.

La (figure 6) représente une vue éclatée d'un électrodialyseur. La technologie est proche de celle de filtres-presses, notons que les termes « modules d'électrodialyse » ou « stack » sont souvent utilisés pour désigner l'électrodialyseur proprement dit. Un module d'électrodialyse peut être considéré comme une succession de cellules unitaires, une cellule unitaire étant l'ensemble constitué par :

- Un compartiment de déminéralisation .
- Une membrane échangeuse de cations .
- Un compartiment de concentration .
- Une membrane échangeuse d'anions.

Le nombre de cellules unitaires par module doit être assez élevé de manière, d'une part à minimiser les pertes d'énergie aux électrodes, et d'autre part à rendre l'installation la plus compacte possible [22].

En général, le nombre de cellules unitaires est compris entre 100 et 500. La manière générale d'assemblage d'une cellule à électrodialyse est décrite comme suit :



- | | | |
|---------------------------|---------------------|--------------------------|
| 1 : Bloc en polypropylène | 2 : Electrode | 3 : Electrode chamber |
| 4 : Joint du spacer (PVC) | 5 : Toile du spacer | 6 : Visses |
| 7 : Cadre en acier | 8 : Electrode 9 | 9 : Entrée du concentrât |
| 10 : Membrane échangeuse | 11 : AAM | 12 : Entrée du diluât |
| 13 : Entrée du concentrât | | |

Figure II.07: Technologie d'un électrodialyseur.

III.12.2. Electrodes

Dans le cas le plus simple, un module est équipé de deux électrodes (une anode et une cathode) qui sont placées à chacune de ses extrémités. Mais il est possible, et parfois souhaitable, de placer à l'intérieur du module une ou plusieurs électrodes reliées chacune et alternativement à un pôle positif et négatif (branchement électrique parallèle). Ce système à multi-électrodes est utilisé :

Soit lorsque le nombre de cellules unitaires est trop élevé, de manière à diminuer la tension électrique aux bornes des modules .

Soit lorsqu'on l'on veut faire travailler plusieurs paquets et membranes à des densités de courant différentes, ce qui permet d'améliorer les performances de l'appareil [24].

Soit lorsque l'utilisateur possède un redresseur ayant une tension de sortie trop faible.

Les matériaux constitutifs des électrodes sont, pour l'anode, le titane ou le tantale platinés, et pour la cathode, l'acier inoxydable.

III.12.3. Compartiment

Chaque module d'électrodialyse est caractérisé par le type de compartiment utilisé et, en particulier, par le système de distribution et de répartition du liquide entre les membranes. Il existe actuellement deux systèmes : écoulement labyrinthe et écoulement en nappe [23].

Conclusion

L'électrodialyse est un procédé électrochimique permettant de séparer les ions (positifs et négatifs) d'une solution et qui peut être utilisé avec n'importe quelle solution contenant des ions. La solution entre dans la cellule d'électrodialyse et y est séparée en une solution diluée et une concentrée. Les anions (ions chargés négativement) contenus dans la solution sont attirés vers l'anode (électrode positive) et les cations vers la cathode (électrode négative). En se déplaçant, les anions traversent une membrane perméable aux anions, mais qui bloque les cations et inversement pour les cations. En plaçant parallèlement et par alternance des membranes laissant passer des anions et des membranes laissant passer des cations, on arrive à extraire et à bloquer les ions entre deux membranes et ainsi à récupérer une eau diluée d'un côté et un concentré d'ions de l'autre.



Chapitre III
modélisation et simulation
de générateur photovoltaïque

Chapitre III. Modélisation et simulation de générateur photovoltaïque

Introduction

Dans cette partie on va voir la description de la partie photovoltaïque qui assure l'alimentation en électricité de notre montage. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle donnent lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale [26].

Cette figure représente le principe de fonctionnement:

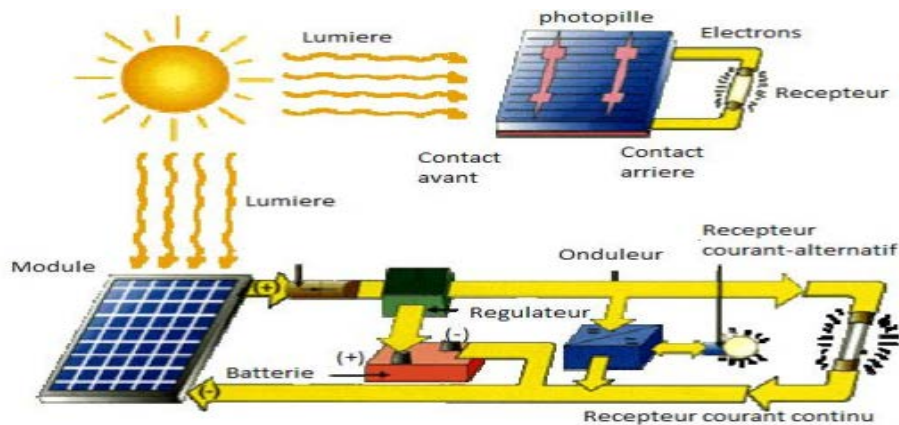


Figure (III.1) : Schéma de principe d'un générateur photovoltaïque [27].

III.1. L'énergie solaire

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation Énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m^2) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge.

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs procédés :

L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

Chapitre III. Modélisation et simulation de générateur photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon[28].

III.2. Notions préliminaires sur le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet(0.2 μ m) à l'infrarouge lointain(2.5 μ m). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales [28]

- Rayonnement direct.
- Rayonnement diffuse.
- Rayonnement réfléchi.

III.3. La Cellule photovoltaïque

La cellule PV ou encore photopile est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs et transforme directement l'énergie lumineuse en énergie électrique. Les cellules photovoltaïques sont constituées .

D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une excitation extérieure, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

D'une couche anti-reflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.

D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.

Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement.

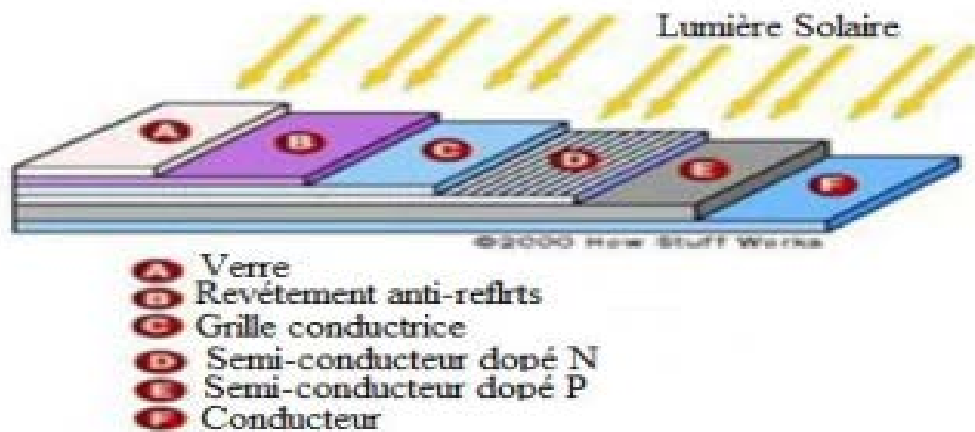


Figure (III.2) : Structure basique d'une cellule solaire.

III.4. Principe de fonctionnement

Il existe différentes techniques permettant la conversion directe de la lumière solaire en électricité, la plus connue est la conversion photovoltaïque effectuée à l'aide de matériaux semi-conducteurs tels que le silicium (Si), le germanium (Ge), le sélénium (Se) ou les composés semi-conducteurs tel que l'arséniure de gallium (*GaAs*), le tellure de cadmium (*CdTe*). Les cellules solaires de type *GaAs* sont très coûteuses dans leur fabrication, leur utilisation est aujourd'hui essentiellement limitée aux applications spatiales. La majorité des cellules photovoltaïques sont fabriquées à partir du silicium cristallin, car il possède la caractéristique d'être non toxique contrairement au cadmium ou au sélénium, en plus, il permet d'atteindre des efficacités de conversion remarquables, il constitue environ 28% de l'écorce terrestre sous forme de composés (silicates, silice), ce qui en fait une source quasi inépuisable.

La cellule solaire à semi-conducteur est un dispositif permettant de débiter un courant électrique dans une charge externe lorsque celui-ci est exposé à la lumière. Son principe de fonctionnement se résume comme suit :

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron-trou ».

Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel.

Chapitre III. Modélisation et simulation de générateur photovoltaïque

Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule. Figure (III -3) [30]

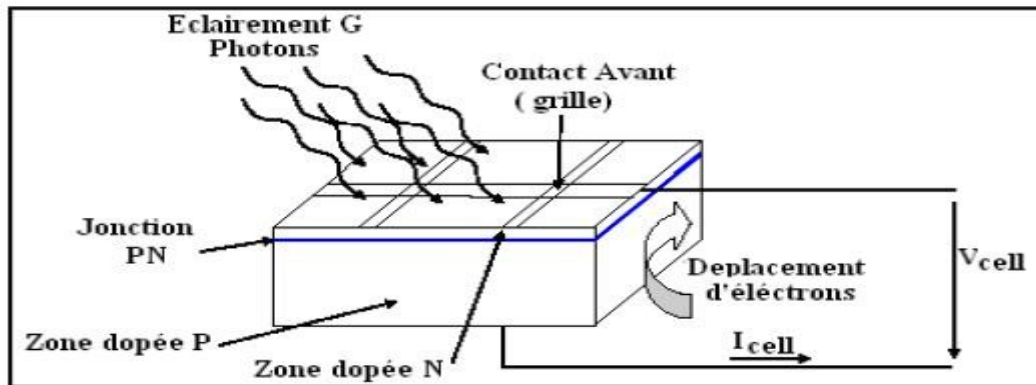


Figure (III.3) : Le principe de fonctionnement d'une cellule solaire.

Les cellules les plus répandus actuellement sont à base de silicium (différence de potentiel de 0.6 V) [32].

III.7. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques)

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quelque soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23% de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [29]:

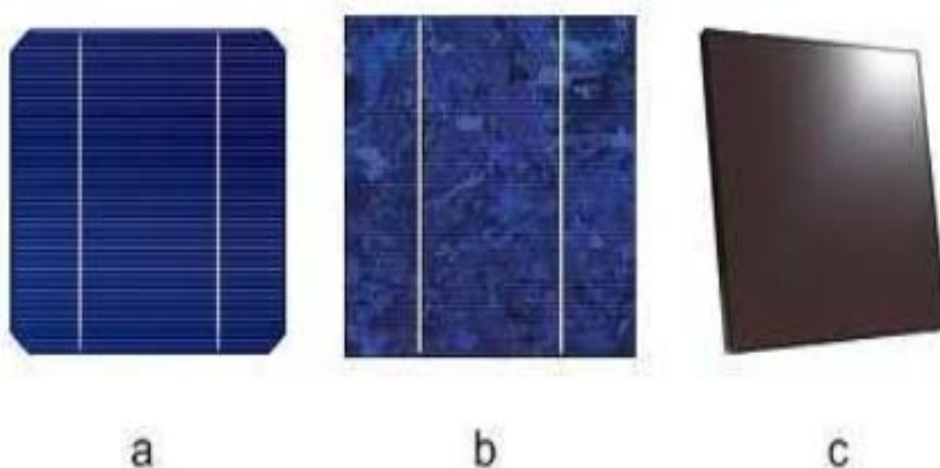


Figure (III.4) : Types de cellules photovoltaïques. (a) silicium monocristallin, (b) silicium polycristallin, (c) silicium amorphe.

III.8. Générateur photovoltaïque

Le terme générateur photovoltaïque GPV est utilisé pour désigner, selon l'application considérée, un module ou un panneau PV. Toutefois, il peut faire allusion au système PV tout entier. Pour la suite de ce document, on utilisera le terme GPV pour désigner un module ou un panneau PV [32].

III.9. paramètre photovoltaïque

Ces paramètres sont caractérisés par ceux des modules constituant le champ PV [31] :

III.9.1 Courant de court-circuit ICC

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (R_{ser} nulle et R_{shu} infinie), ce courant se confond avec le photocourant

I_{PH} Dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (I.1), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{cc} * R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{(I_{cc} * R_{ser})}{R_{shu}} \quad (\text{III.1})$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme

$I_{sat} \left[\exp\left(\frac{e(I_{pv} * R_{ser})}{nKT}\right) - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_{SER}}{R_{shu}}\right)} \quad (\text{III.2})$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{CC} = I_{PH}$).

III.8.2 Tension en circuit ouvert V_{CO}

C'est la tension V_{CO} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul.

(C'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{CC} - I_{sat} \left[\exp\left(\frac{eV_{pv}}{nKT}\right) - 1 \right] - \frac{V_{pv}}{R_{shu}} \quad (\text{III.3})$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{co} = V_T \ln\left[\frac{I_{ph}}{I_{sat}} + 1\right] \quad (\text{III.4})$$

Chapitre III. Modélisation et simulation de générateur photovoltaïque

III.8.3 Point de puissance maximale Pm

L'utilisation optimale d'une photopile consiste à faire fonctionner une charge sous la Tension maximale et à un courant maximal. En effet, suivant la formule $P=V.I$, pour que P soit maximal : il faut être dans les conditions où le produit $V.I$ est maximale, c'est le point de charge idéal de la photopile, ou point de puissance maximale Pm.

III.8.4 Rendement énergétique η

Le rendement de conversion d'énergie est le rapport de la puissance générée et de la puissance du rayonnement solaire incident P_o . On appelle rendement rapport de la puissance maximale fournie (P_{max}) sur la puissance du rayonnement solaire incident (P_i) :

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{\phi \cdot S} \quad (III.5)$$

S : Surface de la cellule solaire.

ϕ : Flux incident.

III.9. Les zones de caractéristique I(V) d'un générateur photovoltaïque

La caractéristique fondamentale du générateur photovoltaïque donnée pour un éclairage et une température donnée, n'impose ni le courant ni la tension de fonctionnement, seule la courbe $I = f(V)$ est fixée. C'est la valeur de la charge aux bornes du générateur qui va déterminer le point de fonctionnement du système photovoltaïque.

La figure (III.5) représente trois zones essentielles [30] :

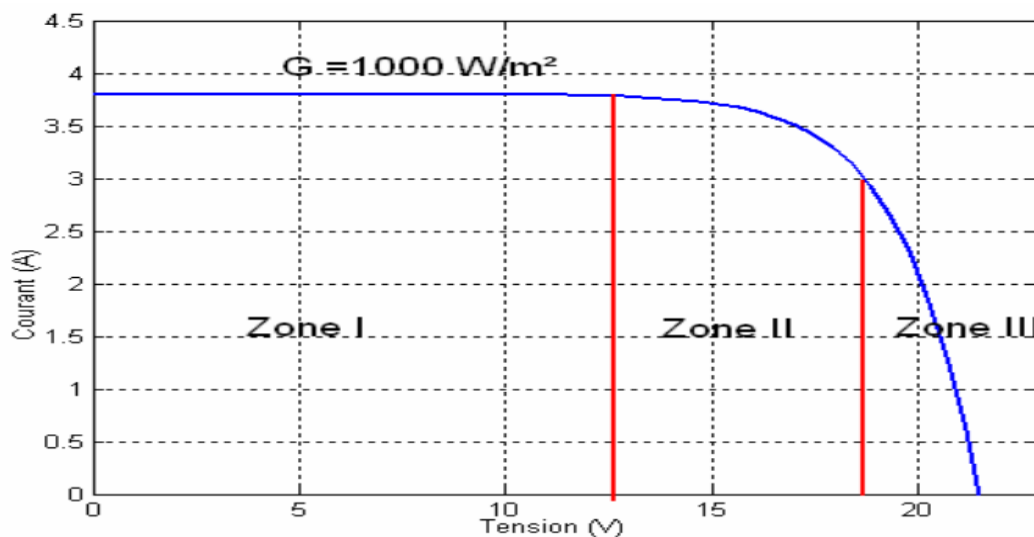


Figure (III.5) : Les différentes zones de Caractéristique I(V) entre générateur et module Photovoltaïque.

La zone (1) : où le courant reste constant quelle que soit la tension, pour cette région, Le générateur photovoltaïque fonctionne comme un générateur decourant.

La zone (2) : correspondant au code de la caractéristique, la région intermédiaire Entre les deux zones précédentes, représente la région préférée pour le fonctionnement du Générateur, où le point optimal (caractérisé par une puissance maximale) peut être déterminé.

La zone (3) : qui se distingue par une variation de courant correspondant à une Tension presque constante, dans ce cas le générateur est assimilable à un générateur de tension.

III.10 Caractéristique courant-tension d'un module

Le courant produit par un module varie conformément aux diagrammes courant/tension. Il dépend de l'éclairement solaire et de la température des cellules [33].

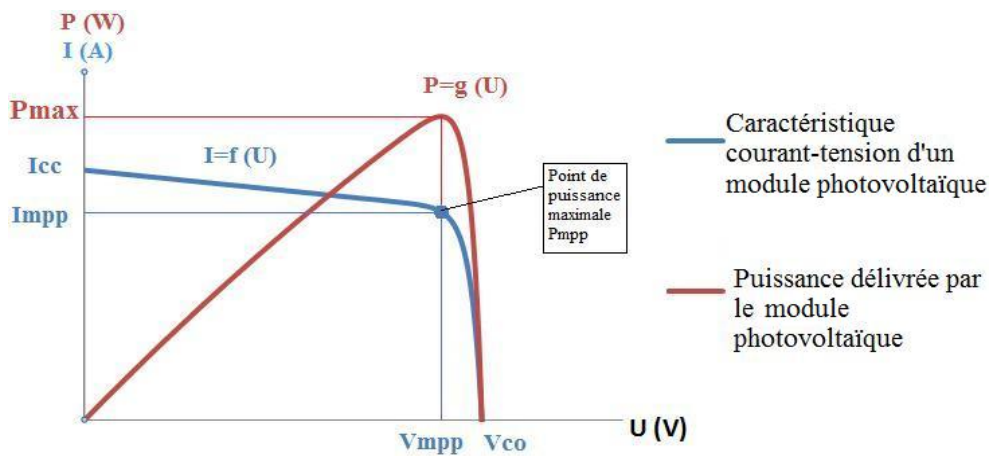


Figure (III.6) : Exemple de caractéristique courant-tension d'un module.

III.10 Panneau photovoltaïque

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui permet de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique [28].



Figure (III.7) : Panneau photovoltaïque.

Chapitre III. Modélisation et simulation de générateur photovoltaïque

Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boîte de dérivation qui les regroupe, Alors cette boîte de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connexions entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [28].

III.11 Avantages et inconvénients d'une installation PV

III.11.1 Avantages

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ensuite le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage Simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au MégaWatt.

Le coût de fonctionnement est très faible vu les entretiens réduits et il ne nécessite ni combustible, ni son transport, ni personnel hautement spécialisé.

La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions [30].

III.11.2. Inconvénient

La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit Entre 10 et 15 MW/km² pour le BENELUX) avec une limite théorique Pour une cellule de 28%. Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en régions isolées.

Tributaries des conditions météorologiques.

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est Nécessaire, le coût du générateur est accru. Le stockage de l'énergie électrique pose encore de nombreux Problèmes.

Le faible Rendement des panneaux photovoltaïques s'explique par le Fonctionnement même des cellules. Pour arriver à déplacer un électron, il faut que l'énergie du rayonnement soit au moins égale à 1 eV. Tous les rayons incidents ayant une énergie plus faible ne seront donc pas transformés en électricité. De même, les rayons lumineux dont l'énergie est supérieure à le perdront cette énergie, le reste sera dissipé sous forme de chaleur [30]

III.2. Les convertisseurs statiques

Dans un système de conversion des énergies renouvelables, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu en courant alternatif et inversement. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les énergies renouvelables : les redresseurs, les onduleurs, les hacheurs.

L'étude du convertisseur est intéressante dans la mesure où il est utilisé dans la plupart des nouveaux types de sources de production d'énergie dispersée connectée au réseau (éolienne, photovoltaïque, pile à combustible...) [35].

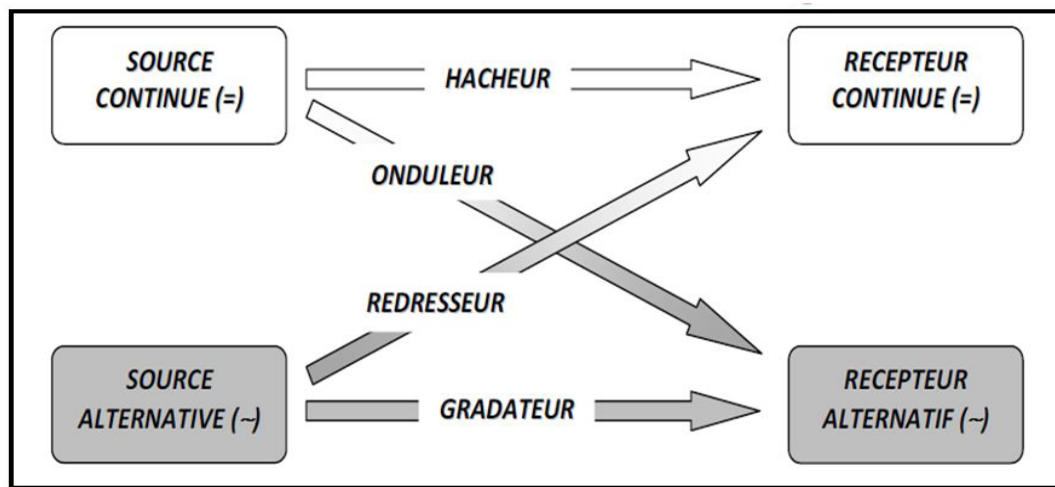


Figure (III.8) : les différents types de convertisseurs statiques.

III.2.1 Les Hacheurs

Le hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant). Son utilisation s'avère nécessaire pour stocker l'énergie photovoltaïque dans des batteries, ou pour alimenter une charge continue [36].

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs[37].

Les hacheurs sont des convertisseurs continus qui procèdent par découpage d'une grandeur d'entrée continue, tension ou courant et dont la grandeur de sortie est également continue ou à faible ondulation [26].

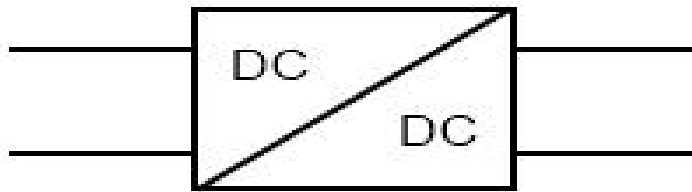


Figure (III.9) : Symbole d'un convertisseur DC-DC.

III.2.2 Les onduleurs

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [38].

III.2.3 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion [34].

- Onduleur Monophasic.
- Onduleur Triphasic.

III.2.4. La commande de la tension de convertisseur DC/DC

Dans ce cas on se repose sur la commande de la tension de fonctionnement des panneaux, par la comparaison de cette tension avec une tension de référence. Cela génère une tension d'erreur qui fait varier le rapport cyclique de la commande PWM afin d'annuler cette erreur [39].

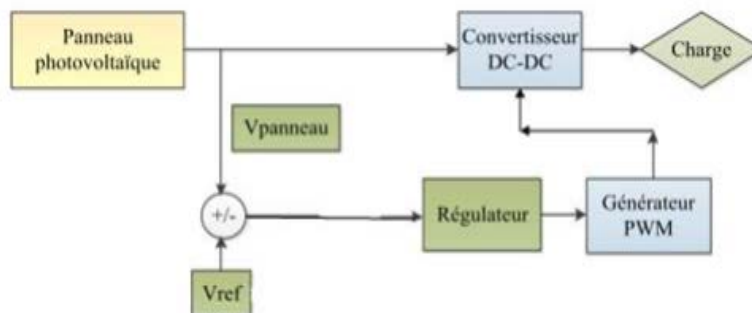


Figure (III.10) : Principe de la méthode à contre réaction de tension avec tension de référence.

On a trois types de cette méthode selon la nature de la tension de référence (fixe ou variable, interne ou externe).

Referencefixe.

Référence en fonction de R_{oc} .

Tension de référence externe (Cellulepilote).

III.2.5. Méthodes à contre réaction de courant

Par analogie avec les méthodes de contre réaction de tension on a le schéma décrit par la figure (IV.11) [39].

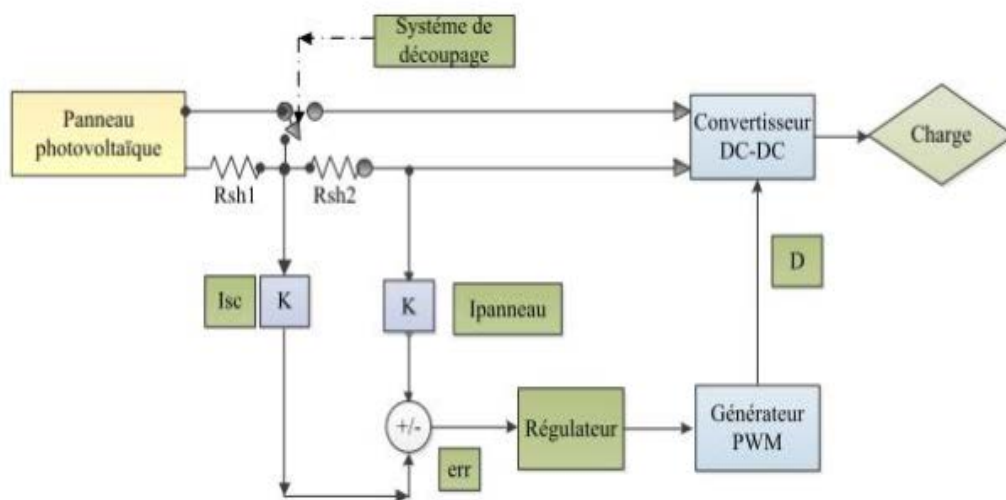


Figure (IV.11): Principe de la méthode MPPT à courant de référence en fonction de I_{sc} .

III.2.6. Méthodes à contre réaction de puissance

Les méthodes à contre réaction de puissance se basent sur des algorithmes de recherche itérative pour trouver le point de fonctionnement du panneau afin que la puissance générée soit maximale sans interruption de fonctionnement du système.

La puissance extraite du panneau est calculée à partir des mesures de courant I et de tension V du panneau et la multiplication de ces deux grandeurs $P = V * I$.

III.3 Modélisation d'un système photovoltaïque

La modélisation est une étape fondamentale qui permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constitutifs. Dans un système énergétique photovoltaïque.

III.3.1 Le générateur photovoltaïque « GPV »

Le système photovoltaïque est contrôlé par la commande MPPT, il est présenté à la Figure (IV.12).

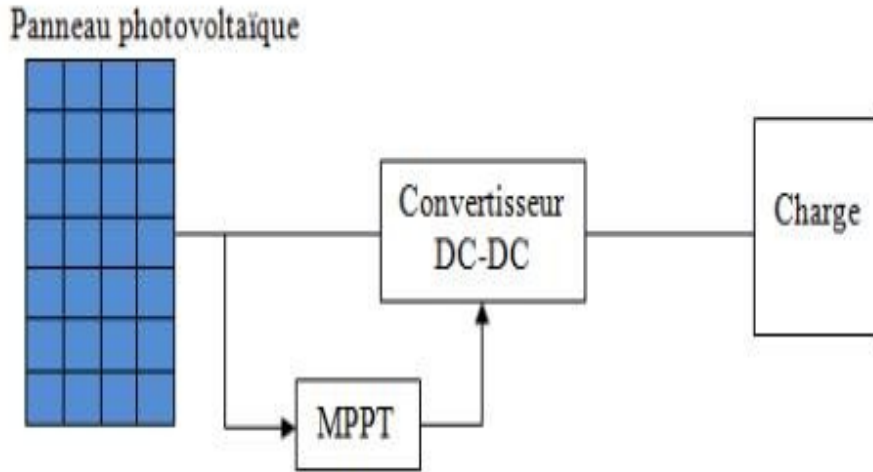


Figure (III.12) : System photovoltaïque.

III.3.2. Modélisation du système photovoltaïque

Le module fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation d'une diode pour les phénomènes de polarisation de la cellule, une résistance série R_s représentant les diverses résistances de contacts et de connexions et une résistance parallèle R_p caractérisant les divers courants de fuites dus à la diode et aux effets de bords de la jonction.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle standard à une seule diode, établit par shockley pour une seule cellule **PV**, et généralisé à un module **PV** en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle.

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (III.13) :

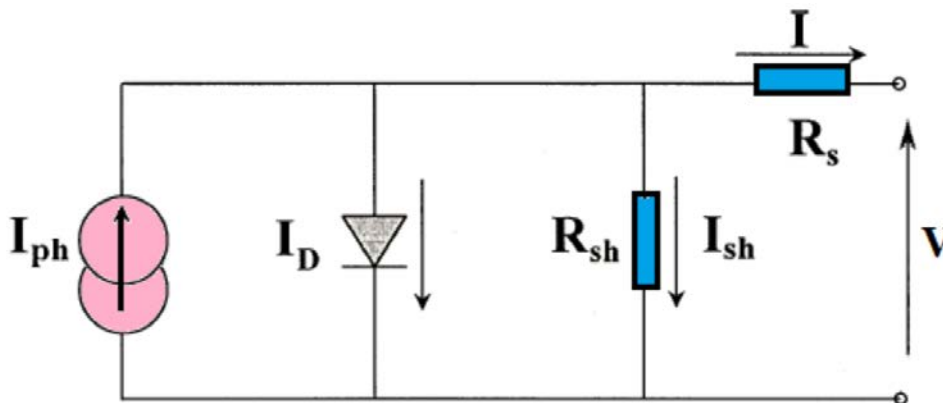


Figure (III.13) : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par (chapitre III -équation (III.1))

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q (V_{pv} + (I_{pv} * R_s))}{nKT} \right) - \frac{V_{pv} + (I_{pv} * R_s)}{R_p} \right] \quad (III. 6)$$

Où V_{pv} , I_{pv} sont la tension (V) et le courant (A) de sortie du panneau, I_{ph} est la photo courant en ampère, I_{sat} Courant dans la diode en ampère, R_s est la résistance série en ohm, R_p est la résistance shunt en ohm, q est la charge de l'électron $q=1.602.10^{-19}$ coulomb, k est la constante de Boltzmann $k=1.381.10^{-23}$ J/K, n est le facteur de qualité de la diode, normalement compris entre 1 et 2.

Si l'on suppose que la résistance parallèle (shunte) est infinie ($R = \infty$), l'équation (III.6) devienne :

$$dI_{pv} = 0 - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{(V_{pv} + R_s \cdot I_{pv})}{nKT} \right) \right) \left(\frac{dV_{pv} + R_s \cdot dI_{pv}}{nKT} \right) \quad (III. 7)$$

La résistance série influe largement sur la pente de la courbe des caractéristique (I-V) au Voisinage de V_{co} .

Elle peut être calculée par la formule suivante :

$$R_s = - \frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} - \frac{nVT}{I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + R_s \cdot I_{pv}}{nVT} \right) \right)} \quad (III. 8)$$

L'équation de la caractéristique $I=f(V)$ non linéaire est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de Newton-Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse. La méthode de Newton-Raphson est décrite comme suit :

$$X_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (III. 9)$$

Où $f'(x_n)$ est la dérivée de la fonction $f(x_n)$, x_n est la présente itération et X_{n+1} est l'itération suivante.

La réécriture de l'équation donne la fonction suivante :

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{V_{pv} + R_{ser} \cdot I_{pv}}{nVT} \right) - 1 \right) = 0 \quad (III. 10)$$

En remplaçant dans l'équation (IV.5), on calcule le courant (I) par les itérations :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{(V_{pv} + R_{ser} \cdot I_n) - 1}{nVT} \right) - I_n \right)}{-1 - I_{sat} \left(\frac{R_{ser}}{nVT} \exp \left(\frac{V_{pv} + R_{ser} \cdot I_n}{nVT} \right) \right)} \quad (III.11)$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclaircissements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements [31].

$$I_{cc}(T) = I_{cc}(T_{ref}) \cdot [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (III.12)$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (III.13)$$

$$I_{sat}(T) = I_{sat}(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \cdot \left[\exp(q \cdot E_g) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (III.14)$$

Où α est le coefficient de variation du courant en fonction de la température, T_{ref} est la température de référence, 298k (25°C) et G est l'irradiation solaire.

III.4. Simulation étudié

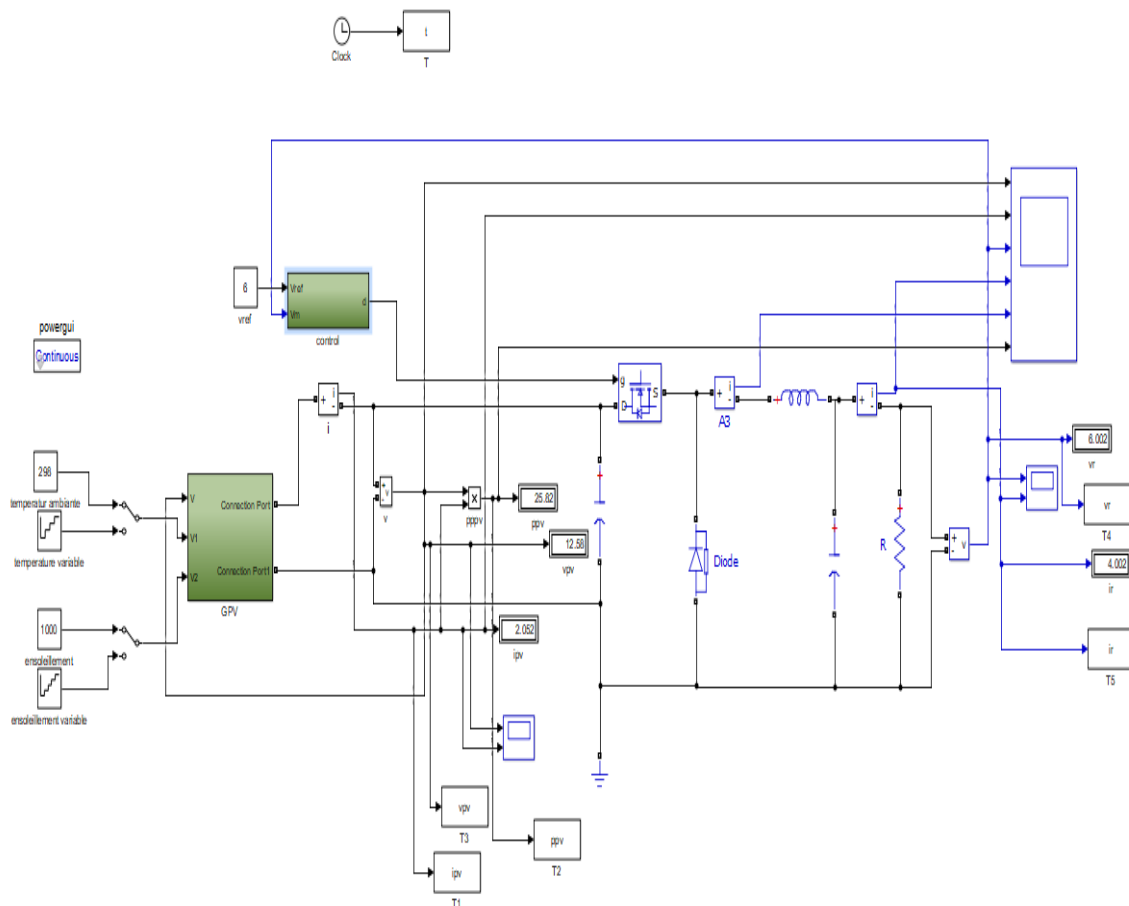


Figure (III.14) : Modèle SIMULINK de la système PV étudié.

III.4.1. Résultat de simulation

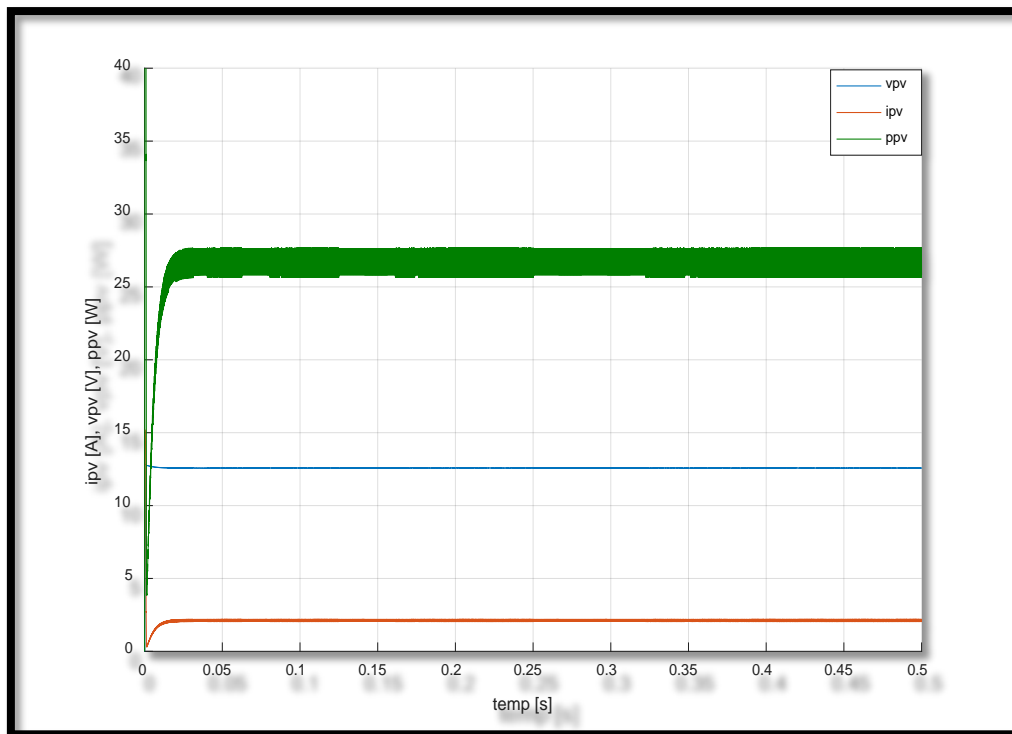


Figure (III.15) : Evolution de tension, courant et puissance du GPV.

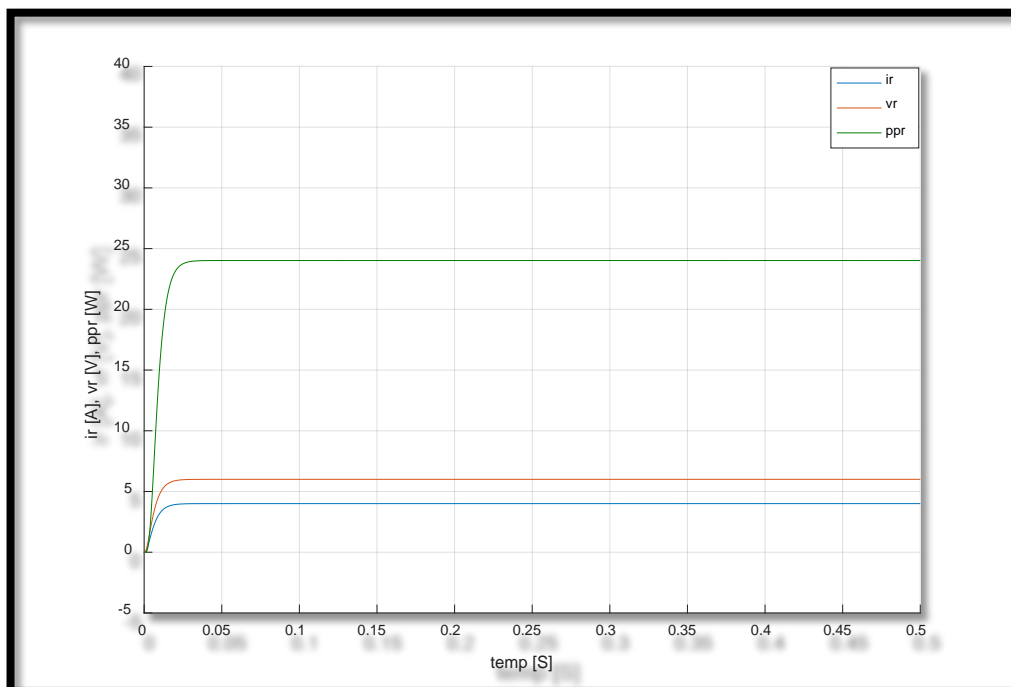


Figure (III.16) : Evolution de tension, courant et puissance de la charge.

Conclusion

L'objectif de ce chapitre est d'améliorer les performances et le rendement d'un système photovoltaïque en faisant appel à un algorithme spécifique. La modélisation de tout le système photovoltaïque étudié est établie facilitant son analyse. L'interface de puissance représentée par un convertisseur à commutation est profondément étudiée.

L'algorithme de poursuite du point de puissance maximale utilisé, appelé "Perturbation et Observation" est amélioré pour passer outre ses défauts et minimiser toute éventuelle perte de puissance. L'efficacité de l'algorithme amélioré est démontrée à travers les résultats de la simulation faite sous Simulink. La simulation fait appel à une bibliothèque de composants représentant chaque élément du système photovoltaïque. Aussi, le problème de la non-homogénéité de l'éclairement est traité aboutissant à une solution efficace qui est validée par la simulation. Cette étude présente également l'application de deux approches de commande distinctes pour la régulation de la tension photovoltaïque. Cette régulation permet de minimiser la perte de puissance à travers le convertisseur améliorant ainsi.

Chapitre IV

Résultat et discussions

Introduction

Dans ce chapitre on essayera d'établir un modèle théorique de dessalement par électrodialyse. La modélisation complète de ce phénomène est extrêmement compliquée puisqu'elle fait intervenir des phénomènes chimiques, électrique et mécanique de fluide au même temps. On a essayé de chercher un modèle simple mais réaliste le maximum possible. Après des recherches bibliographiques, on a opté pour le modèle donné par [41]. Le modèle est monodimensionnel et le régime est permanent. Il comprend des paramètres compliqués à établir expérimentalement, c'est pour ça qu'on s'est servi des données livrées dans l'article [42]. Une comparaison des résultats théoriques et expérimentaux a été donnée à la fin du chapitre. Une bonne partie de ce chapitre est une adaptation et reproduction de travail de [42] à notre cas d'étude.

Les bases des principes de l'ED ont été examinés dans la littérature [42].

Dans une cellule ED typique, une série de membranes échangeuses d'anions et de cations sont disposées alternativement entre une anode et une cathode pour former des cellules individuelles. Lorsque le potentiel de courant continu est appliqué entre deux électrodes, les cations chargés positivement se déplacent vers la cathode, traversent la membrane d'échange de cations chargée négativement et retenu par la membrane d'échange d'anions chargée positivement. D'autre part, les anions chargés négativement se déplacent vers l'anode, traversent les charges positives membrane échangeuse d'anions et retenue par la membrane d'échange de cations à charge négative. À la fin, la concentration ionique augmente dans des compartiments alternatifs avec une diminution simultanée de la concentration ionique dans d'autres compartiments. Une vue schématique d'une cellule ED est présentée à la (figure IV.1).

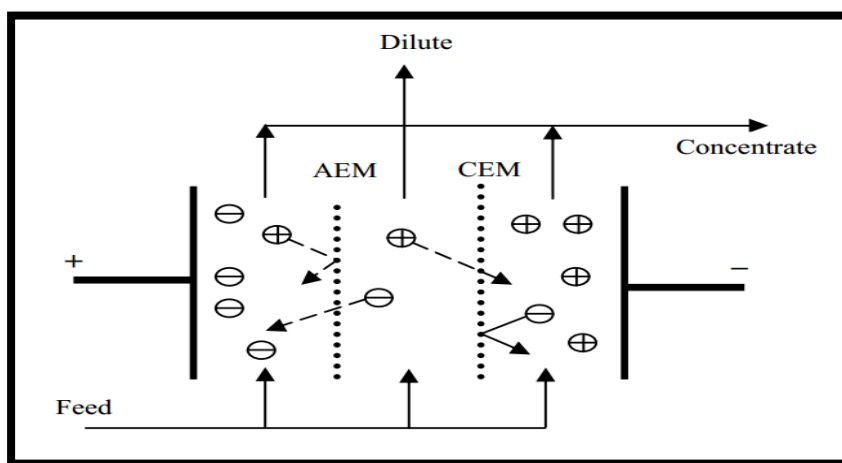


Figure IV.1- Une vue schématique d'une cellule ED.

Dans cette recherche, l'effet des différentes conditions de fonctionnement dans le traitement de l'eau de mer par une cellule ED expérimentale a été étudiée et un modèle mathématique a été dérivé pour prédire le comportement de la cellule.

IV.1. Modélisation Mathématique

Un élément différentiel du compartiment dilué est illustré à la (figure IV.2).

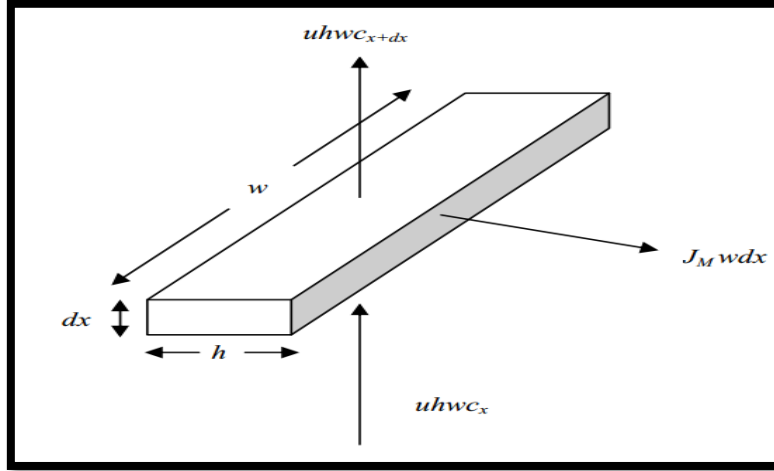


Figure IV.2- Élément différentiel du compartiment dilué.

Le bilan massique des ions sodium dans le compartiment est le suivant:

$$(uC_x - uC_{x+dx})h = J_M dx \quad (IV.1)$$

Où:

$$uhdC = J_M dx \quad (IV.2)$$

Où, J_M est le flux molaire dans le compartiment dilué, u est la vitesse d'écoulement, h est l'épaisseur du compartiment dilué et C est la concentration ionique. Aussi, la molaire le flux dans le compartiment dilué en terme de densité de courant est le suivant:

$$J_M = \frac{\eta}{F} \frac{dI}{dA_M} \quad (IV.3)$$

Où, η est l'efficacité actuelle, F est la constante de Faraday, I est l'intensité actuelle et A_m est la zone efficace de chaque membrane échangeuse d'ions. L'hypothèse de constante η et J_M dans le compartiment dilué donne [46]:

$$\frac{dI}{dA_M} = \frac{I}{A_M} \quad (IV.4)$$

Par conséquent, l'équation 2 peut être écrite comme suit:

$$\mathbf{uhdC} = \frac{\eta}{F A_M} \mathbf{dx} \quad (\text{IV.5})$$

Pour utiliser la forme intégrée de cette équation avec les variables opérationnelles, η doit être indiqué en fonction de la vitesse. À tout moment, le flux molaire peut être écrit comme suit:

$$J_M = k(C_{bulk} - C_i) = k\Delta C \quad (\text{IV.6})$$

Où, C_{bulk} et C_i sont des concentrations à la masse du courant dilué et à la surface de la membrane, respectivement. En raison d'un temps de séjour très court en diluant compartiment et constance de la densité de courant (dI / dA_m), ΔC peut être supposé être constante le long de la surface de la membrane [46]. En utilisant les équations 3, 4 et 6, η peut être écrit comme suit:

$$\eta = \frac{\Delta C F A_M}{I} k = \delta k \quad (\text{IV.7})$$

La relation entre k et u peut être dérivée en utilisant la corrélation suivante [47].

$$Sh = 3.30 \left(\frac{y}{l} Re Sc \right)^{1/3} \quad Re < 1000 \quad (\text{IV.8})$$

Où l est la longueur du canal, Sh est le numéro Sherwood, défini par kh / D_{AB} , Re est le numéro de Reynolds, défini par $Re = \rho u h / \mu$ et Sc , est le numéro Schmidt, défini par $Sc = \mu / \rho D_{AB}$. Toutes les expériences ont été effectuées à des débits en utilisant le même système géométrique. Le coefficient k peut être représenté comme suit:

$$k = \alpha u^{1/3} \quad (\text{IV.9})$$

Dans ED, la relation de base entre le courant (I), la force électrique efficace (E) et la résistance du système (R) peut être décrite par la loi d'Ohm:

$$I = \frac{E}{NR} \quad (\text{IV.10})$$

Maintenant, les résistances de transfert de masse dans la cellule devraient être considérées. Quatre résistances peuvent être pris en compte dans une seule cellule: R_{cm} , la résistance de l'échange de cations membrane, R_{am} , la résistance de la membrane d'échange d'anions, R_d , la résistance de solution diluée et R_c , la résistance de la solution de concentré [48].

$$R = R_{cm} + R_{am} + R_d + R_c \quad (\text{IV.11})$$

Comme les solutions sont relativement diluées, $R_{cm}, R_{am} \ll R_d, R_c$, donc,

$$R = R_d + R_c \quad (IV.12)$$

En négligeant les résistances des membranes, comme discuté ci-dessus, la résistance à la solution peut être exprimé en fonction de la concentration. La résistance d'un matériau augmente avec son longueur et diminution avec sa section transversale [49, 50]:

$$R = \frac{h}{kA_m} \quad (IV.13)$$

Où, k est la conductivité du matériau et est proportionnelle à sa concentration.

$$k = A_M C \quad (IV.14)$$

Où, A_M est la conductivité molaire du matériau. À de faibles concentrations, la molaire La conductivité des électrolytes forts est calculée en utilisant l'équation suivante [50]:

$$A_M = A_M^0 - AC^{0.5} + BC \quad (IV.15)$$

Où, A et B sont des constantes (respectivement 89,21 et 82,07 pour la solution de NaCl) et A_M^0 est la conductivité molaire limite (lorsque les ions n'interagissent pas entre eux). Kohlrausch a indiqué A_M^0 peut être exprimé comme la somme des contributions des ions individuels. Si la conductivité molaire limite des cations est notée λ^+ et celle des anions est désignée λ^- , sa loi sur la migration indépendante des ions est [49]:

$$A_M^0 = \nu_+ \lambda_+ + \nu_- \lambda_- \quad (IV.16)$$

Où ν_+ et ν_- sont le nombre de cations et d'anions par une molécule d'électrolyte (Par exemple, $\nu_+ = \nu_- = 1$ pour (NaCl), (ZnSO₄), (PbSO₄, CuSO₄, etc.). λ_+ et λ_- sont molaires conductivité de chaque ion (5,01 et 7,63 m²Skmol⁻¹ pour Na⁺ et Cl⁻, respectivement).

Par conséquent, en substituant les équations 7, 9, 10 et 13 à l'équation 5 et après réarrangement, l'équation suivante peut être dérivée:

$$\frac{uh^2FN}{\delta\alpha u^3 EV(12.64 - 8.92C^{0.5} + 8.21C)} dc = dx \quad (IV.17)$$

Par substitution de $1 / \delta\alpha = \beta$, $u = Q / A_m$ et $N = 1$ et en utilisant l'état limite, à $x = 0 \rightarrow C = C_0$, l'intégrale est prête à être calculée numériquement ou analytiquement:

$$\frac{\beta Q^2 h^2 F}{EA_m^3} f(C_0, C) = \int_0^1 dx \quad (IV.18)$$

Où :

$$f(C_0, C) = \int_{C_0}^C \frac{uh^2FN}{c(12.64-8.92c^{0.5}+8.21c)} dC \quad (IV.19)$$

Afin de simplifier l'équation $f(C_0, C)$ on trouve :

$$f(c, c_0) = \int_{c_0}^c \frac{1}{c(12.64 - 8.92c^{0.5} + 8.21c)} dc$$

D'abord on fait le changement de variable suivant :

$$\sqrt{c} = x \Rightarrow \frac{dc}{2\sqrt{c}} = dx \Rightarrow dc = 2x dx$$

L'intégrale devient :

$$\begin{aligned} f(x, x_0) &= \int_{\sqrt{c_0}}^{\sqrt{c}} \frac{2x dx}{x^2(12.64-8.92x+8.21x^2)} \\ &= \int_{\sqrt{c_0}}^{\sqrt{c}} \frac{2dx}{x(12.64 - 8.92x + 8.21x^2)} \end{aligned}$$

On pose :

$$P(x) = \frac{1}{x(12.64-8.92x+8.21x^2)} = \frac{1}{8.21} \frac{1}{x(x^2+ax+b)}$$

Avec :

$$a=-8.92/8.21=-1.086 \text{ et } b=12.64/8.21=1.540.$$

La fonction P(x) peut se décomposer comme suit :

$$\begin{aligned} P(x) &= \frac{1}{8.21} \frac{1}{x(x^2+ax+b)} \\ &= \frac{1}{8.21} \left(\frac{1/b}{x} - \frac{1}{b} \frac{a+x}{x^2+ax+b} \right) \\ &= \frac{1}{8.21} \left(\frac{1/b}{x} - \frac{1}{b} \frac{\frac{a}{2}+x}{x^2+ax+b} - \frac{1}{b} \frac{\frac{a}{2}}{x^2+ax+b} \right) \\ &= \frac{1}{8.21} \left(\frac{1/b}{x} - \frac{1}{b} \frac{\frac{a}{2}+x}{(x+a/2)^2+\delta^2} - \frac{1}{b} \frac{\frac{a}{2}}{(x+a/2)^2+\delta^2} \right) \end{aligned}$$

Avec :

$$\delta = b - \frac{a^2}{4} = 0.359$$

La primitive de :

$$\int \frac{1}{x} dx = \ln(x) + C_1$$

La primitive de :

$$\begin{aligned} & \int \frac{1}{b} \frac{\frac{a}{2} + x}{(x + a/2)^2 + \delta^2} dx \\ &= \frac{1}{2b} \ln((x + a/2)^2 + \delta^2) + C_2 \end{aligned}$$

La primitive de :

$$\begin{aligned} & \int \frac{1}{b} \frac{\frac{a}{2}}{(x + a/2)^2 + \delta^2} dx \\ &= \frac{a}{2b} \left(\frac{1}{\delta} \arctan \frac{x + \frac{a}{2}}{\delta} \right) + C_3 \end{aligned}$$

On obtient donc :

$$\begin{aligned} f(x, x_0) &= \int_{\sqrt{c_0}}^{\sqrt{c}} \frac{2dx}{x(12.64 - 8.92x + 8.21x^2)} \\ &= \int_{\sqrt{c_0}}^{\sqrt{c}} \frac{2}{8.21} \left(\frac{1/b}{x} - \frac{1}{b} \frac{\frac{a}{2} + x}{(x + a/2)^2 + \delta^2} - \frac{1}{b} \frac{\frac{a}{2}}{(x + a/2)^2 + \delta^2} \right) dx \\ &= \frac{2}{8.21} \left(\frac{1}{b} \ln(x) - \frac{1}{2b} \ln \left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + \delta^2 \right) - \frac{a}{2b\delta} \arctan \frac{x + \frac{a}{2}}{\delta} \right) \\ f(x, x_0) &= \frac{2}{8.21} \left(\frac{1}{b} \ln \left(\frac{x}{\sqrt{\left(\left(x + \frac{a}{2} \right)^2 + \delta^2 \right)}} \right) - \frac{a}{2b\delta} \arctan \frac{x + \frac{a}{2}}{\delta} \right) \Bigg|_{x_0}^x = \\ f(c, c_0) &= \frac{2}{8.21} \left(\frac{1}{b} \ln \left(\frac{\sqrt{c}}{\sqrt{\left(\left(\sqrt{c} + \frac{a}{2} \right)^2 + \delta^2 \right)}} \right) - \frac{a}{2b\delta} \arctan \frac{\sqrt{c} + \frac{a}{2}}{\delta} \right) \Bigg|_{c_0}^c \end{aligned}$$

$$f(c, c_0) = \frac{2}{8.21b} \left(\ln \left(\frac{\frac{\sqrt{c}}{\sqrt{\left(\left(\sqrt{c} + \frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2\right)}}}{\frac{\sqrt{c_0}}{\sqrt{\left(\left(\sqrt{c_0} + \frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2\right)}}} \right) - \frac{a}{2\delta} \left(\arctan \frac{\sqrt{c} + \frac{a}{2}}{\delta} - \arctan \frac{\sqrt{c_0} + \frac{a}{2}}{\delta} \right) \right)$$

$$f(c, c_0) = \frac{1}{8.21b} \left(\ln \left(\frac{c}{\left(\left(\sqrt{c} + \frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2\right)} \frac{\left(\left(\sqrt{c_0} + \frac{a}{2}\right)^2 + \delta^2\right)}{c_0} \right) - \frac{a}{\delta} \left(\arctan \frac{\delta(\sqrt{c} - \sqrt{c_0})}{\delta^2 + \left(\sqrt{c} + \frac{a}{2}\right)\left(\sqrt{c_0} + \frac{a}{2}\right)} \right) \right)$$

$$f(c, c_0) = 0.079 \ln \left(\frac{\left(\left(\sqrt{c_0} - 0.543\right)^2 + 0.129\right)}{c_0} \frac{c}{\left(\left(\sqrt{c} - 0.543\right)^2 + 0.129\right)} \right) + 0.239 \arctan \left(\frac{0.359(\sqrt{c} - \sqrt{c_0})}{0.129 + (\sqrt{c} - 0.543)(\sqrt{c_0} - 0.543)} \right)$$

La solution finale pour le paramètre de modèle (β) est la suivante:

$$\beta = \frac{EA_m^{2/3} l}{Q^{2/3} h^2 F} f(C_0, C) \quad (IV.20)$$

En utilisant des données expérimentales, l'équation suivante a été ajustée pour β en fonction du débit taux, tension et concentration de l'alimentation:

$$\beta = \frac{[\alpha + b \ln Q + c (\ln Q)^2 + d (\ln Q)^3 + e E]}{(1 + f \ln Q + h E^2)} \quad (IV.21)$$

Où, a, b, c, d, e, f, g et h sont les fonctions polynomiales de troisième degré de l'alimentation concentration :

$$a, b, c, d, e, f, g, h = pC_0^3 + qC_0^2 + rC_0 + s \quad (IV.22)$$

Les valeurs de p, q, r et s sont listées dans le tableau 1.

Tableau 1- Les valeurs de p, q, r et s dans les fonctions polynomiales de 3e degré

De concentration d'aliments.

Coeff. Cons.	P	q	R	s
A	1.8712	-1.4305	0.2721	-0.0142
B	0.4207	-0.3228	0.0623	-0.0035
C	0.0315	-0.0243	0.0048	-0.0003
D	0.0008	-0.0006	0.0001	-8×10^{-6}
E	-0.0001	0.0001	-3×10^{-5}	3×10^{-6}
F	1.3871	-0.7093	0.0658	-0.0068
G	-6.6452	9.9892	-3.6798	-0.0267
H	1.4544	-1.7639	0.5964	-0.0221

En regardant les données expérimentales, β est supposé être zéro aux conditions présentés dans le tableau 2.

Tableau 2- Conditions auxquelles la valeur de β est nulle.

Débit (cc/s)	Concentration (ppm)		
	E=6 V	E=4 V	E=2 V
2500 < C₀ < 7500	Q > 1.5	Q > 0.75	Q > 0.5
7500 < C₀ < 15000	Q > 1.5	Q > 1.0	Q > 0.75
15000 < C₀ < 25000	Q > 2.0	Q > 1.5	Q > 1.0
25000 < C₀ < 35000	Q > 4.0	Q > 3.0	Q > 2.0

À l'aide des équations 19, 20 et 21 et utilisant MATLAB, le modèle donne des valeurs de concentration dans le compartiment dilué pour différentes concentrations initiales, débits et tensions

IV.2. Résultats Et Discussion

Les expériences ont été effectuées à différentes concentrations d'aliments (5000, 10000, 20000 et 30000 ppm), des débits (0,1, 0,3, 0,5, 0,75, 1, 1,5, 2, 3, 4 et 5 mL/s) et des tensions (2, 4 et 6 V). La concentration des cations (Na^+) uniquement dans le compartiment dilué était Mesuré dans diverses conditions de fonctionnement. Dans toutes les expériences, un conductimètre (HANNA, modèle HI 8633, fabriqué au Portugal) a été utilisé pour mesurer la quantité de sel dans l'eau. La conductivité de l'eau dépend directement de sa teneur en sel. Cette dépendance (Courbe d'étalonnage du conductimètre) est illustrée à la (figure IV.3).

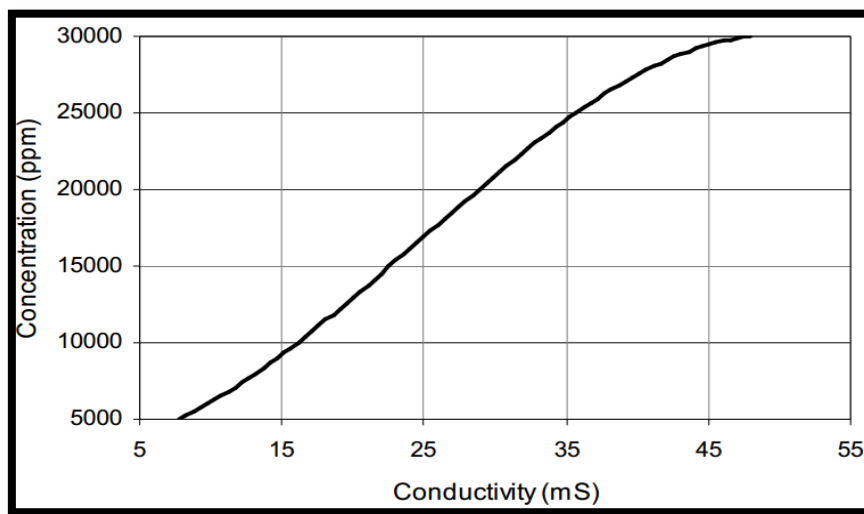


Figure IV.3- Courbe d'étalonnage du conductimètre.

Effet du débit sur la performance de la cellule à différentes tensions et concentrations a été étudié. Afin de vérifier si le modèle développé représente le réel comportement du système ED, les données du modèle ont ensuite été comparées aux données expérimentales. Les résultats calculés ainsi que les résultats expérimentaux sont tracés à la (figure IV.3).

Comme on peut le voir, à des débits plus élevés, la quantité de sel séparé tombe et se sépare

La performance diminue. Étant donné qu'un débit plus élevé signifie un temps de séjour inférieur, cela signifie que les ions entre les membranes n'ont pas assez de temps pour transférer à travers les membranes. Évidemment, à une concentration constante, la performance de la cellule augmente en augmentant la tension et, par conséquent, la quantité de sel dans l'eau du produit diminue.

Comme on l'a vu à la (figure IV.3), il existe un bon accord entre les facteurs expérimentaux et résultats calculés. Erreur maximale observée entre le modèle et l'expérimentation.

Les résultats du modèle sont calculés on utilise l'algorithme suivant :

```

E=2;%electrical potential (V)

for E=2:2:6

h1 = figure; hold on; grid on; xlabel('longueur'); ylabel(sprintf('Concentration pour
E=%dv',+E));

h2 = figure; hold on; grid on; xlabel('longueur'); ylabel(sprintf('Concentration Res (C0-C)
pour E=%dv',+E));

c0_i(1)=0.2;c0_i(2)=0.3;c0_i(3)=0.4;c0_i(4)=0.5;

%c0=0.5172;%kmol/m3 = mg/l

for j=1:4

c0=c0_i(j);

%Q(i)=0.0025;%l'unité du débit m^3*s^-1

a=1.8712*c0^3-1.4305*c0^2+0.2721*c0-0.0142;

b=0.4207*c0^3-0.3228*c0^2+0.0623*c0-0.0035;

c=0.0315*c0^3-0.0243*c0^2+0.0048*c0-0.0003;

d=0.0008*c0^3-0.0006*c0^2+0.0001*c0-8*10^(-6);

e=-0.0001*c0^3+0.0001*c0^2-3*10^-5*c0+3*10^(-6);

f=1.3871*c0^3-0.7093*c0^2+0.0658*c0-0.0068;

g=-6.6452*c0^3+9.9892*c0^2-3.6798*c0-0.0267;

h=1.4544*c0^3-1.7639*c0^2+0.5964*c0-0.0221;

F=9.648*10^4;%faraday constant (c*kmol^-1) F=Na*e /Na=6.022*10^23 mol^-1
/e=1.6021766*10^-19 c

Am=0.1*0.6;%effective area of ion exchange membrane (m^2)

%Q=2.*10^(-6);%flow rate (m^3/s)
    
```

```

H=0.25;%thickness of dilute compartment (m)

% L=0.5;%flow length in channel (m)

for i=1:100;

Q(i)=2.*10^(-6);

L(i)=i/100;% Q(i)=i*5*10^(-6)/100;

beta=(a+b*log(Q(i))+c*log(Q(i))^2+d*log(Q(i))^3+e*E)/(1+f*log(Q(i))+g*E+h*E^2);

A=(E*Am^(2/3)*L(i))/(Q(i)^(2/3)*H^2*F);

fonc=@(C)0.079*log((((sqrt(c0)-0.543)^2+0.129)/c0)*(C/((sqrt(C)-
0.543)^2+0.129))))+0.239*atan(0.359*(sqrt(C)-sqrt(c0))/(0.129+(sqrt(C)-0.543)*(sqrt(c0)-
0.543)))-(beta/A);

%solve(fonc(C)-(beta/A),C);

z=fzero(fonc,2.0);

conc(i)=z*0.018;%0.018 coef de conversion du kmol/m3 à mg/l

conc_res(i)=(c0_i(j)-conc(i));

end;

figure(h1); plot(L,conc);

figure(h2); plot(L,conc_res);

%hold off;

end;

figure(h1); legend('C0=0.2','C0=0.3','C0=0.4','C0=0.5');

figure(h2); legend('C0-C=0.2','C0-C=0.3','C0-C=0.4','C0-C=0.5');

end;

```

Le figure IV.4, IV.5 et IV.6 représente les différentes concentrations C_0 dans le cas d'utilisation de la tension 6V 4V 2V respectivement.

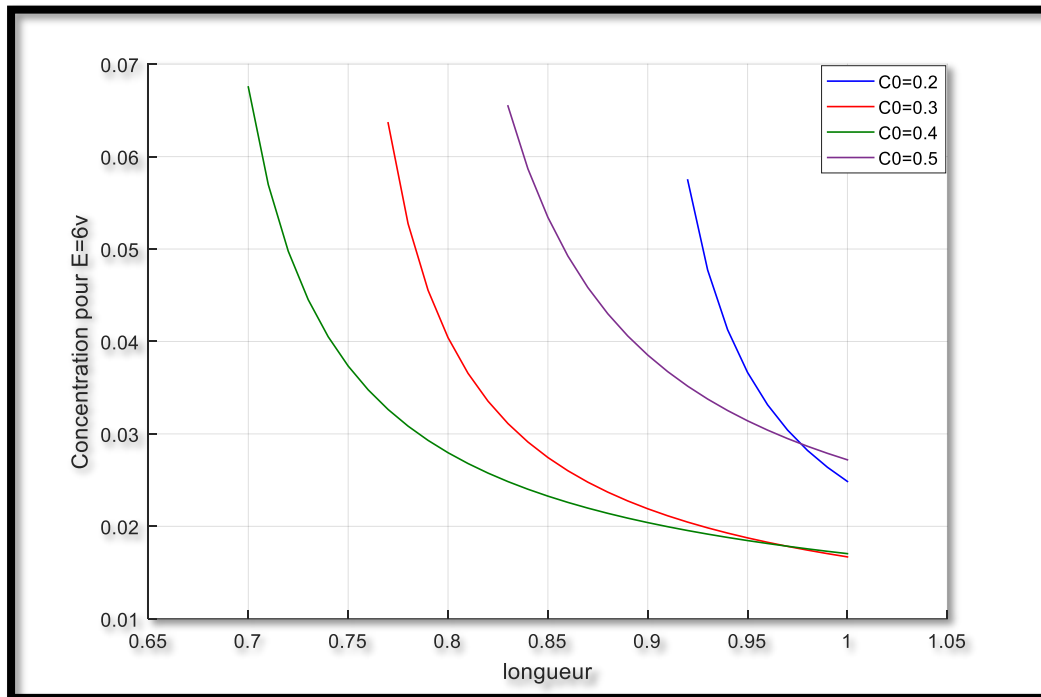


Figure IV.4- Différentes concentrations C_0 dans le cas d'utilisation de la tension 6V.

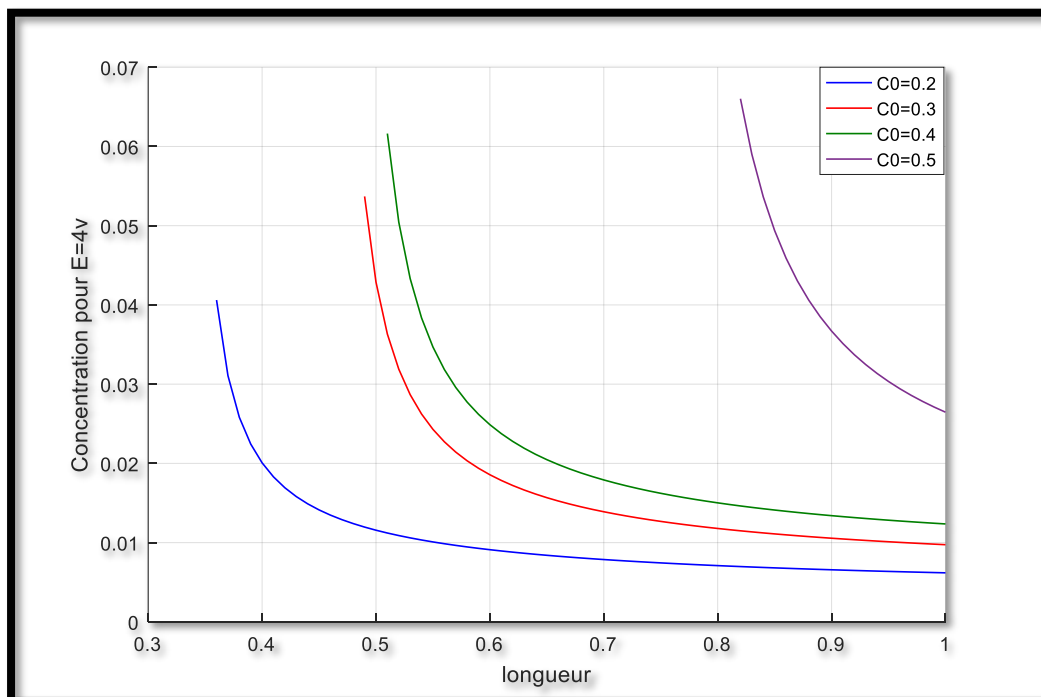


Figure IV.5- Différentes concentrations C_0 dans le cas d'utilisation de la tension 4V.

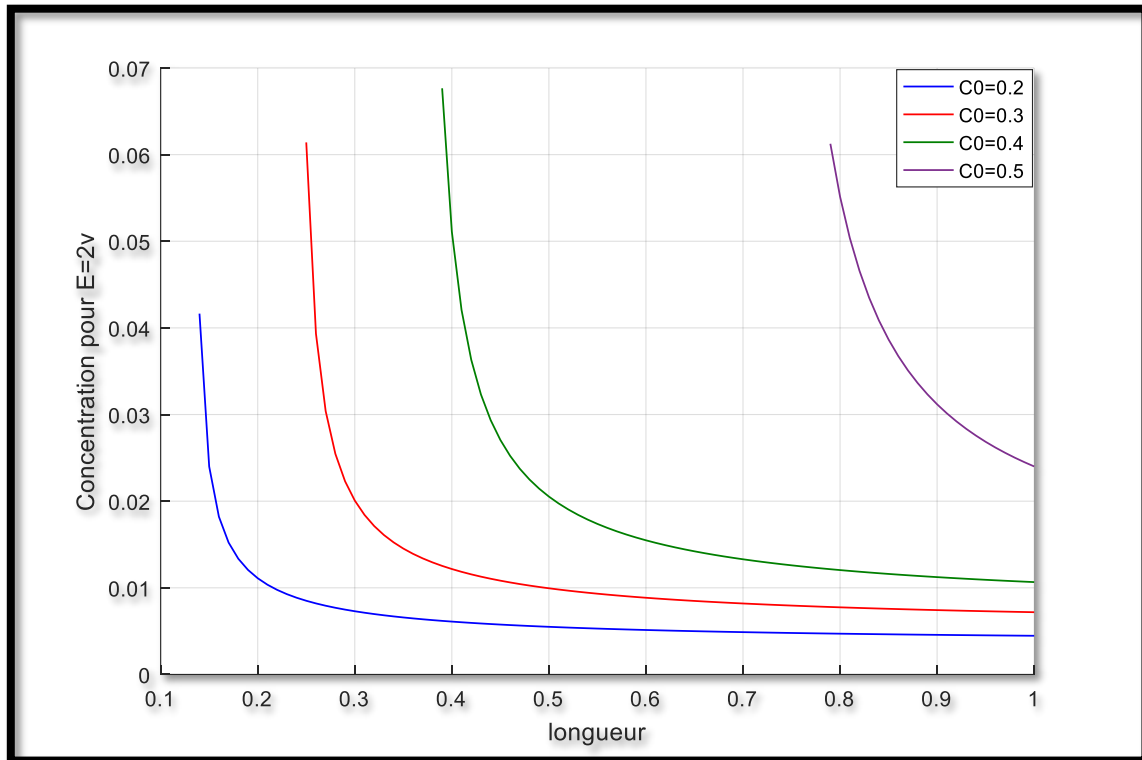


Figure IV.6- Différentes concentrations C_0 dans le cas d'utilisation de la tension 2V.

Le figure IV.7, IV.8 et IV.9 représente les différentes concentrations res (C_0-C) dans le cas d'utilisation de la tension 6V 4V 2V respectivement.

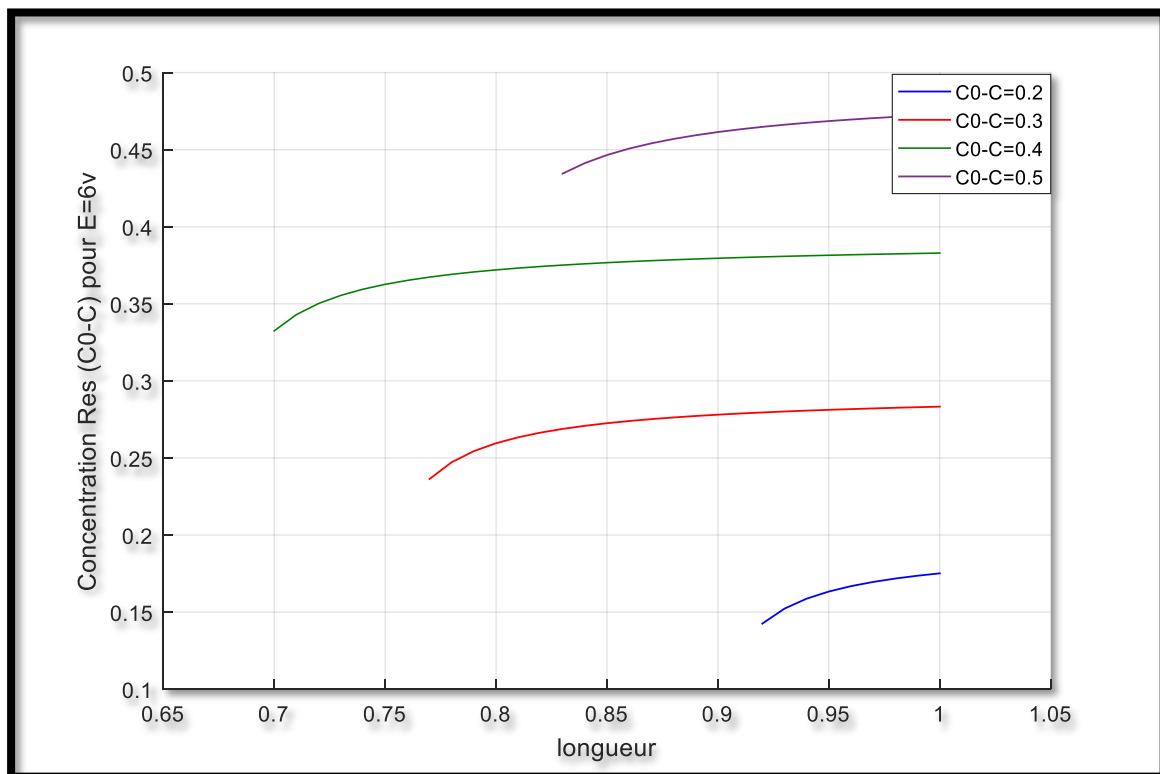


Figure IV.7- Différentes concentrations C_0-C dans le cas d'utilisation de la tension 6V.

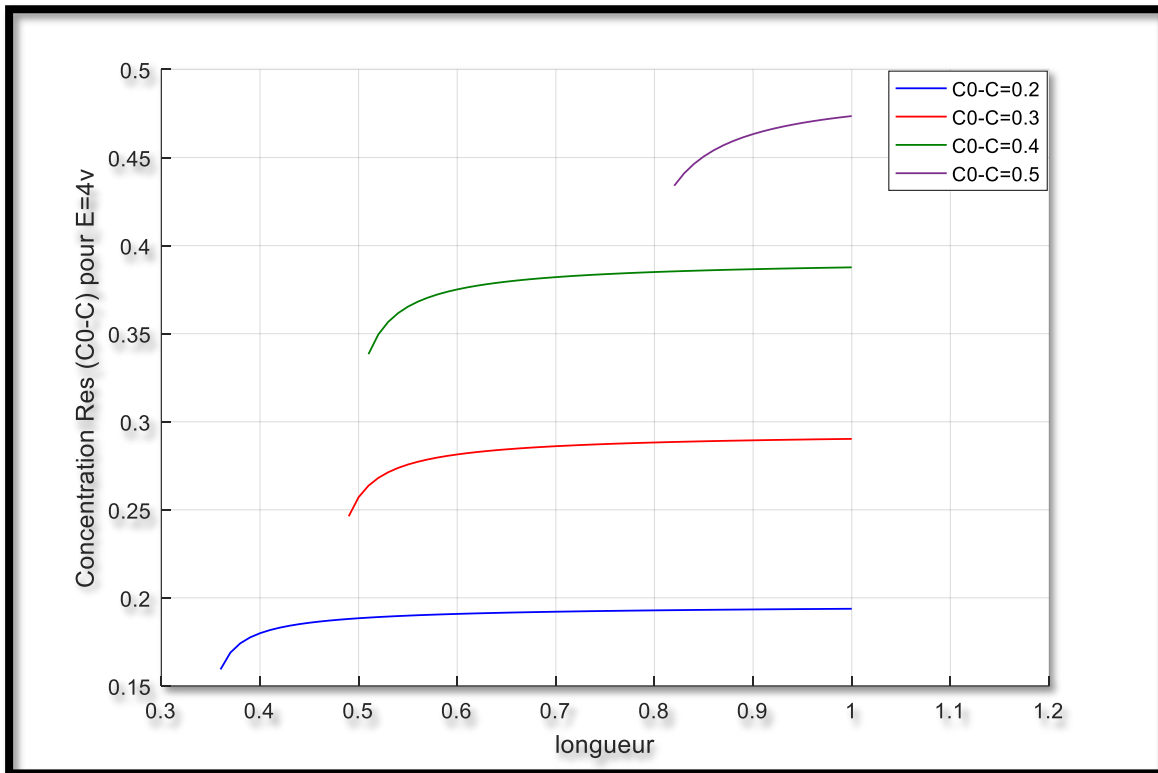


Figure IV.8- Différentes concentrations C0-C dans le cas d'utilisation de la tension 4V.

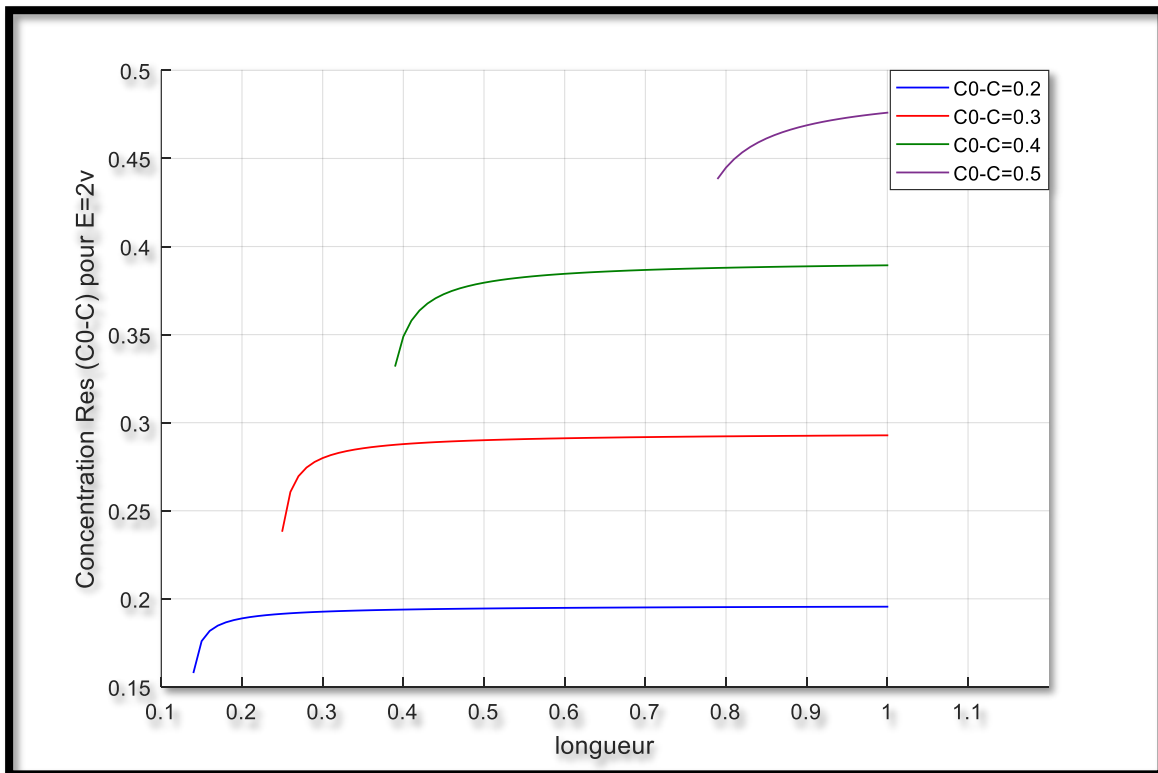


Figure IV.9- Différentes concentrations C0-C dans le cas d'utilisation de la tension 2V.

IV.3. Résultats Expérimentaux

Cette figure représente le montage de système.

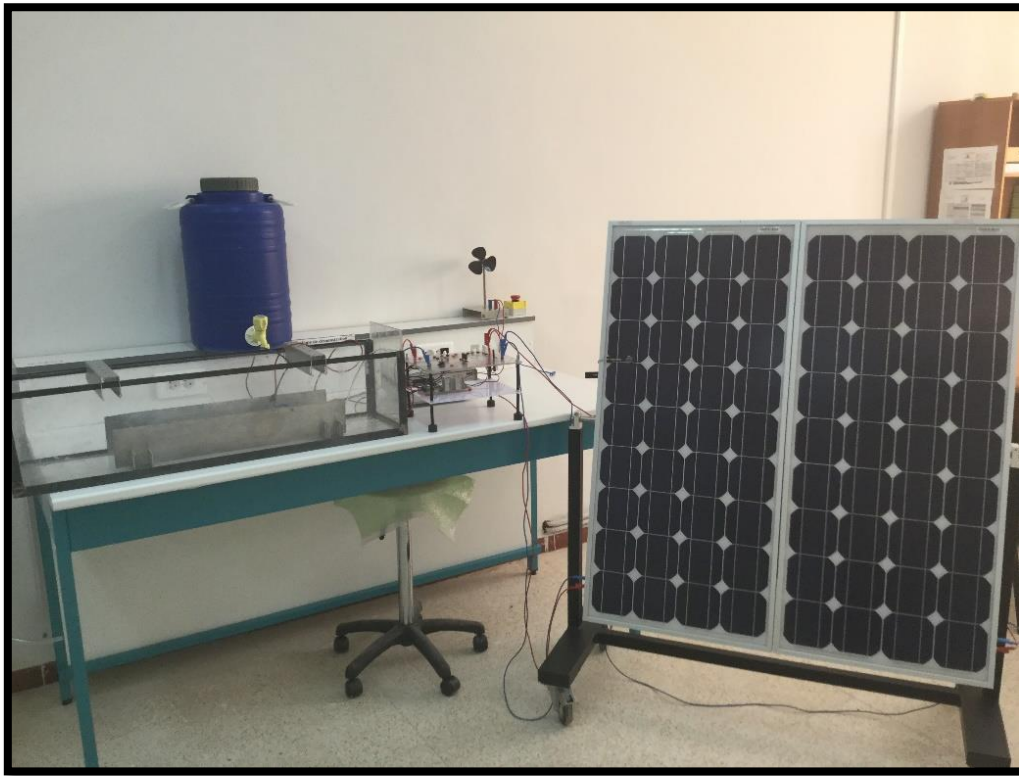


Figure IV.10- Un image montre le montage de système .

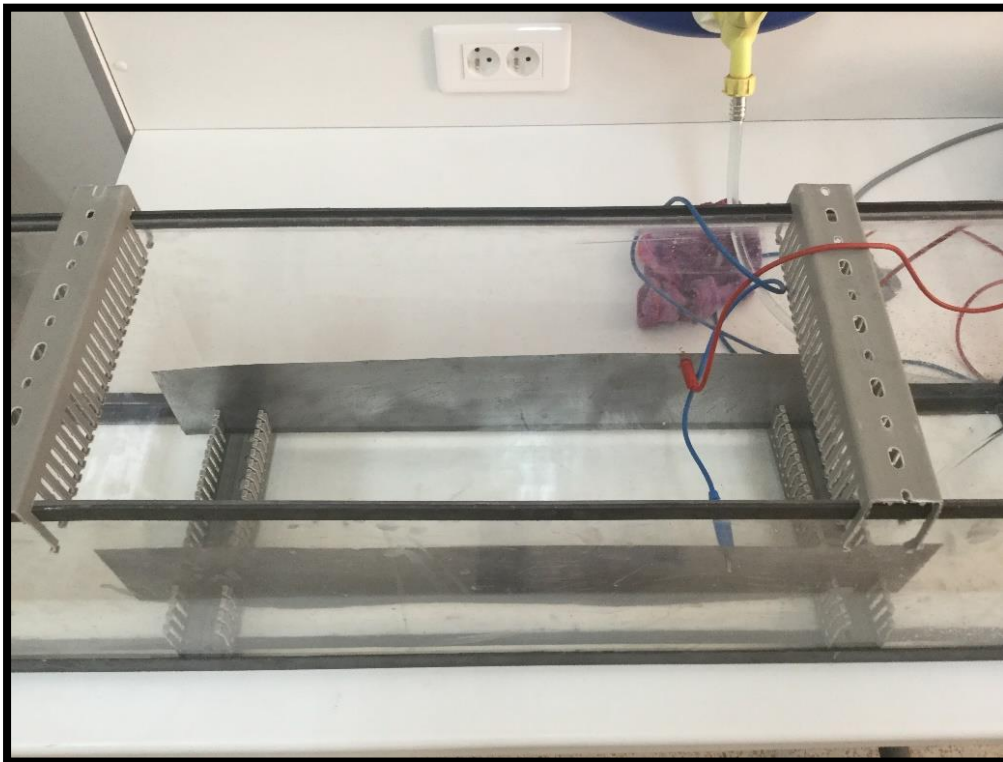


Figure IV.11- Un image montre le bassin.

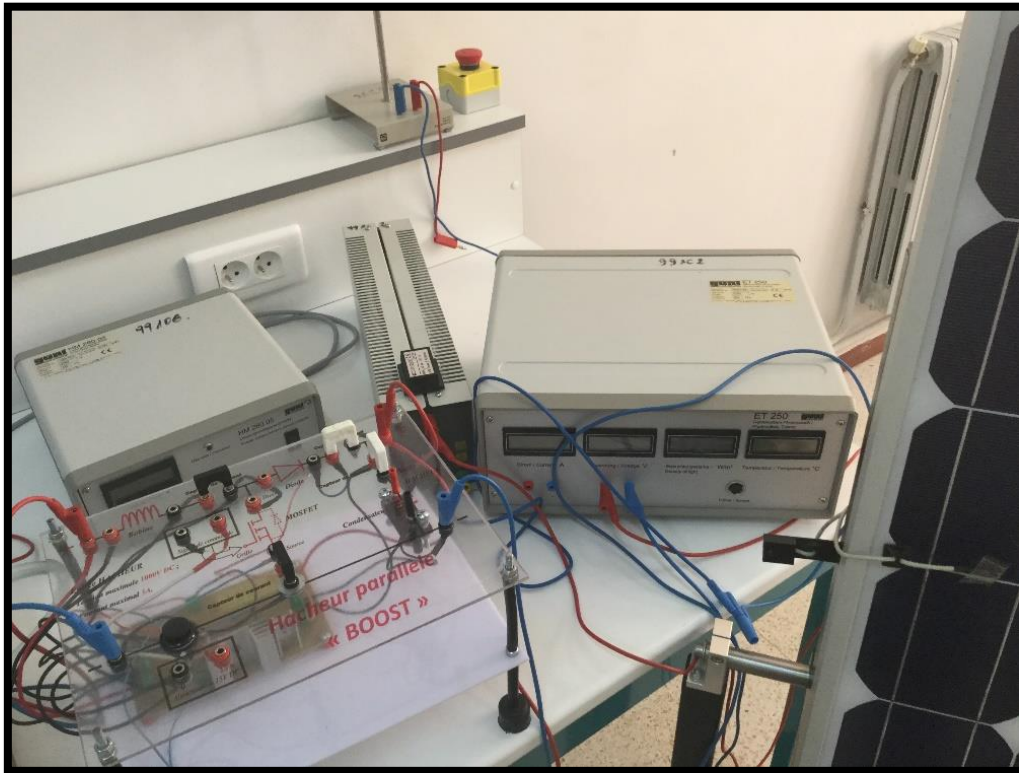


Figure IV.12- Un image montre l'installation électrique.

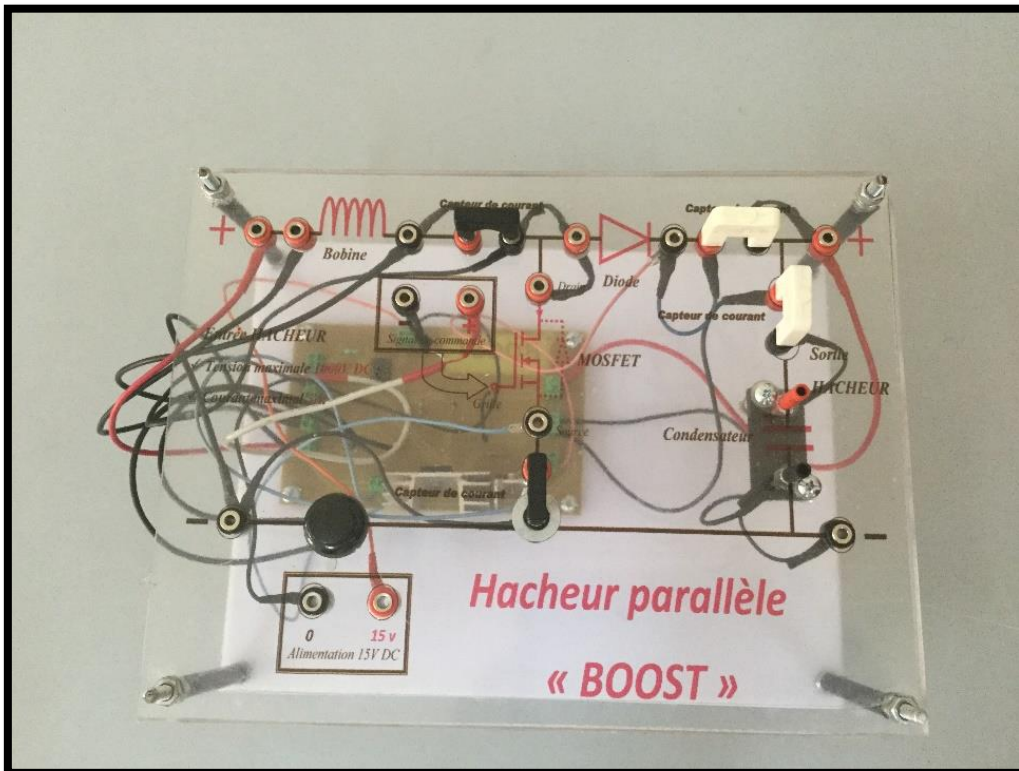


Figure IV.13- Un image montre le convertisseur DC/DC.

Après l'expérience, nous obtenus les résultats suivants :

Le concentration C_0 de l'eau de mer est égale 35g/L, et le PH=7.9. Après l'électrodialyse le Concentration devient 29g/L, et le PH=7.6.

Le concentration C_0 de l'eau de sebkha est égale 41g/L, et le PH=8.3. Après l'électrodialyse le Concentration devient 37g/L, et le PH=7.9.

Conclusion

Dans le présent travail, un modèle mathématique a été développé. Des expériences ont été menées pour étudier l'effet des tensions, des débits et des concentrations d'alimentation sur une cellule ED. Le modèle développé permet de prédire la concentration des sels dans le canal. Les données expérimentales ont finalement été comparées aux valeurs prédites par les maquette. Il a été constaté qu'il existe une bonne cohérence entre les prédictions du modèle et les données expérimentales. Cela signifie que ce modèle peut être utilisé pour prédire l'ED du processus de dessalement.



Conclusion générale

Conclusion générale

L'eau potable douce n'est plus un produit cher que nous pouvons l'obtenir gratuitement de la nature. Avec une aggravation de la pénurie d'eau et les problèmes de pollution du milieu aquatique dans le monde, que ce soit les eaux souterraines ou de surface et la propagation de phénomène de la salinisation et même dans les zones qui ont de grandes ressources en eau, il est devenu nécessaire de dépenser beaucoup d'argent pour fournir une eau saine et potable.

Dans notre projet, nous avons procédé à réaliser un montage qui réduit la concentration des sels dans l'eau par le phénomène d'électrodialyse. La fourniture d'énergie électrique est faite par l'énergie solaire. Le but final était de réaliser un kit-portatif complètement autonome vis-vis de l'énergie destiné à l'utilisation agricole. Ce but est motivé par la nature de notre région qui s'inscrit dans les zones semi-arides et dont les eaux disponibles sont en grande partie au-dessus des normes d'irrigations, et d'autre part, la disponibilité de l'énergie solaire où la région jouit par des taux d'ensoleillement parmi les plus importants au monde.

On considère ce sujet que on a traité comme un sujet important pour le dessalement ou plutôt réduction de la proportion de la salinisation dans l'eau par électrolyse pour l'utiliser dans l'irrigation ou la consommation humaine. A la fin, nous espérons, que ce travail modeste, sera une base théorique et expérimentale pour ceux qui viennent après nous.



Référence

Référence

[1] wikipedia

[2] *Mémento de l'irrigation*

[3] MERMOUD A., 2006 - Cours de physique du sol : Maîtrise de la salinité des sols. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

[4] PARIDA A.K. et DAS A.B., 2005 - Salt tolerance and salinity effects on plants: a review. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 60,324-349.

[5] IPTRID., 2006 - *conférence électronique sur la salinisation*. Extension de la salinisation et stratégie de prévention et réhabilitation.

[6] DIEDHIOU G.J., 2006 - Mechanisms of salts tolerance: Sodium, Chloride, and potassium Homeostasis in two rice lines with different tolerance to salinity stress. Dr. Rer.nat theses. Faculty of biology University of Bielefeld, Germany.

[7] MASHALI A.; SUAREZ D.L.; NABHAN H.; RABINDRA R., 2005 - Integrated management for sustainable use of salt- affected soils. Rome: FAO Soils Bulletin, now printing.

[6] KESSIRAN M.M., 2003 - Gestion de l'irrigation dans le milieu salin. Recueil des communications des journées techniques et scientifiques sur la qualité des eaux du Sud. Volume III, El-Oued les 19 et 20 mai 2003.

[7] DOUAOUI A. et HARTANI T., 2008 - Impact de l'irrigation par les eaux souterraines sur la dégradation des sols de la plaine du Bas-Chellif. Scientific commons.

[8] MENNASSER AS, 2009. Essais d'optimisation de fertilisation organique dans les conditions salines cas de Ouargla. Mémoire ing. Univ Ouargla.

[9] IPTRID. (2006): conférence électronique sur la salinisation. Extension de la salinisation et stratégie de prévention et réhabilitation.

[10] ANTIPOLIS., 2003 - Les cahiers du plan bleu 2. Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens. Etude bibliographique.

[11] BIDAI Y., 2001 - Le métabolisme de la proline chez l'*Atriplex halimus* L. stressée à la salinité. Mémoire de Magister en physiologie végétale, Université d'Oran.

[12] ASLOUM H., 1990 - Elaboration d'un système de production maraîchère (Tomate, *Lycopersicon esculentum* L.) en culture hors sol pour les régions sahariennes. Utilisation de substrats sableux et d'eaux saumâtres. Thèse de doctorat, développement et amélioration des végétaux, Université de Nice Sophia-Antipolis.

[13] GIRARD P.; PROST J.; BASSEREAU P., 2005 - Passive or Active Fluctuations in Membranes Containing Proteins *Phys. Rev. Lett.* 94, 088102: 60-64.

[14] ROBERT M., 1996 - Le sol : interface dans l'environnement ressource pour le développement. Ed. MASSON, Paris.

[15] BOUTEYRE G. et LOYER Y., 2003 - Sols salés eaux saumâtre des régions arides tropicales et méditerranéennes in l'aridité, une contrainte au développement. ORSTOM, Paris.

- [17] FLOWERSI T.J.; TRKE P.F. and YEO A.R., 1977 - The mechanism of salt tolerance in halophytes *Annual Review of Plant Physiology* 28:89-21.
- [18] CRAMER G.R., 2002 - Sodium-calcium interactions under salinity stress. In: "Salinity. Environment-Plants-Molecules". Eds. A. Läuchli and U. Lüttge. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp.205-227.
- [19] RAJU K.P.; DESAI J.N.; CHANDRASEKHAR T.; ASHOK N.M., 1993 - Precursors, arginine, ornithine, or methionine in ameliorating the inhibitory effect of NaCl on wheat plant. *Egyptian J. Biotechnol.* 9:328-340.
- [20] MAILLARD J., 2001 - Le point sur l'Irrigation et la salinité des sols en zone sahélienne. Risques et recommandations. Handicap International. Novembre 2001, 34 p.
- [21] CHERBUY B., 1991 - Les sols salés et leur réhabilitation étude bibliographique. Cemagraf, école. Nat. Renne, 170p.
- [22] SHAPOSHNIK (V.A.) et KESORE (K.). – A nearly history of electro dialysis with permselective membranes. *Journal of Membrane Science*, 136, p. 35-39 (1997).
- [23] De DARDEL (F.). – Échange d'ions. Principes de base. Techniques de l'Ingénieur. (F).J 2 783 Génie des procédés (1998).
- [24] AUDINOS (R.). – Membranes semi-perméables. Membranes échangeuses d'ions K 361. Constantes physico-chimiques (1999).
- [25] A. Maurel. Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres et autres procédés non conventionnels d'approvisionnement en eau douce. Lavoisier Tec&Doc. 2001.
- [26] Alain Bilbao Ibarreta " Réalisation de commandes MPPT Numériques " Rapport de stage Projet Fin d'Etudes Universtat Rovira Virgili 2006.
- [27] Dossier technique «Eolienne et photovoltaïque».
- [28] M.N.Mchalikh et CH.Hmada "Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau " Mémoire de Master Université Kasdi Merbah–Ouargla 2013.
- [29] M.L.Louazane "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla "Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008.
- [30] I.Bendjamaa "Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque " Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2011/2012.
- [31] W.Bensaci " Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT " Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 2011/2012.
- [32] H. Boukli " Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Muni D'un Convertisseur MPPT pour une Meilleure Gestion Energétique " Mémoire de Magister Université Abou-Baker Blkaid-Tlemcen 2010/2011.
- [33] M.Amaud Deves " énergie photovoltaïque (Application au traitement de l'eau potable

- et des eaux usées en rurales)'' document technique Rédition 2003 FNDAE n 12.
- [34] O.BENSEDDIK et F.DJALOU D '' Etude et optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque ''Mémoire de Master Université Kasdi Merbah-Ouargla 27/06/2012.
- [35] S.Lhlah '' Etude comparative des techniques MPPT Perturbation and Observation (P&O), Incrémental Conductance (Inc.CoN) et Hill climbing (H.C)'' Mémoire Magister université El hadj Lakhdar Batna 2007.
- [36]CH.Maher ''Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque'' Mémoire Master Université Sfax 2007-2008.
- Références bibliographiques
- [37] K.Sobaihi '' étude et réalisation d'un hacheur de Tracking du point de puissance Maximale (MPPT) a contre réaction '' Mémoire de Magister Ecole Nationale polytechnique 10, Avenue Hassen Badi El –Harrach Alger.
- [38] BOUKAROURA Abdelkader'' Modélisation et Diagnostic d'un Onduleur Triphasé Par l'Approche Bond Graph ''Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS DE SETIF 02/12/2009.
- [39] F.Slama '' Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques interconnectés au réseau électrique '' Mémoire de Magister UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF- 01/04/2011.
- [41] A.D. Ryabstev, N.P. Kotsupalo and V.I. Titarenko, "Development of a two-stage electro dialysis set-up for economical desalination of sea-type artesian and surface waters", *Desalination*, 137 (2001) 207-214.
- [42] W.S. Winston Ho and K.K. Sirkar, "Membrane Handbook", Chapman & Hall, 1992.
- [43] T. Mohammadi & A. Kaviani, "Water shortage and seawater desalination by electro dialysis", *Desalination*, 158 (2003) 267-270.
- [44] T. Mohammadi, A. Moheb, M. Sadrzadeh, A. Razmi, "Separation of copper ions by electro dialysis using Taguchi experimental design", *Desalination*, 169 (2004) 21-31.
- [45] T. Mohammadi, A. Razmi, M. Sadrzadeh, "Effect of operating parameters on Pb^{2+} separation from wastewater using electro dialysis", *Desalination*, 167 (2004) 379- 385.
- [46] M. Demircioglu and N. Kabay, "Cost Comparison and Efficiency Modeling in the Electro dialysis of Brine", *Desalination*, 136 (2001) 317-323.
- [47] A.A. Sonin and M.S. Isaacson, "Optimization of flow design in forced flow electrochemical systems, with special application to electro dialysis", *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 13(3):241-248, 1974.

- [48] M. Mulder, “Basic principles of membrane technology”, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, Dordrecht, 1996.

- [49] P.W. Atkins, "Physical Chemistry", Oxford university press, 4th Ed., U.K., Oxford, 1990.
- [50] G.M. Barrow, "Physical Chemistry", McGraw-Hill Kogakusha, International Student Ed., 3rd Ed. Tokyo, Japan, 1973.

Résumé:

Dans ce mémoire, nous avons étudié la modélisation et le montage d'un prototype du traitement d'eau par électrodialyse avec énergie solaire. La modélisation et la simulation de l'électrodialyse est faite à l'aide d'un modèle 1D qui regroupe les paramètres fluído-physico-chimiques du phénomène, le code écrit est fait par MATLAB. La modélisation et la simulation de la partie solaire a été réalisé par MATLAB/SIMULINK. Un montage prototype est réalisé au laboratoire afin de confronter les résultats théoriques à ceux de l'expérience. Le but ultime était de réaliser un kit-expérimentale portatif complètement autonome destiné aux agriculteurs.

Mots clefs : électrodialyse, photovoltaïque, convertisseur dc-dc, membrane, agriculteurs.

Summary:

In this paper, we studied the modeling and the assembly of a prototype of water treatment by electro dialysis with solar energy. The modeling and the simulation of the electro dialysis is done using a 1D model, which combines the fluído-physico-chemical parameters of the phenomenon, the written code, is made by MATLAB. The modeling and simulation of the solar part was carried out by MATLAB / SIMULINK. A prototype assembly is carried out in the laboratory to compare the theoretical results with those of the experiment. The ultimate goal was to produce a completely self-contained portable experimental kit for farmers.

Keywords: électrodialysis, photovoltaïque, converter dc-dc, membrane, farmers

خلاصة:

في هذه المذكرة قمنا بدراسة نمذجة و إعداد نموذج مصغر في المخبر لمعالجة المياه عن طريق التحليل الكهربائي ممون عن طريق الطاقة الشمسية. النمذجة و المحاكات تمت عن طريق نموذج ذو بعد واحد يحوي معظم العوامل المتعلقة بالظاهرة (سائلية، كيميائية، فيزيائية). المحاكات تمت عن طريق الماتلاب و سيمولينك. نموذج مصغر قمنا بإعداده في المخبر كي نقوم بمواجهة النتائج النظرية بنظيرتها العملية. الهدف النهائي من العمل هو إعداد حزمة عملية لمعالجة ملوحة المياه مستقلة كليا موجهة للاستعمال الفلاحي