



Université de Batna 2 – Mostefa Ben Boulaïd
Faculté de Technologie
Département d'Electrotechnique



Thèse

Préparée au sein du Laboratoire d'Électrotechnique de Batna (LEB)

Présentée pour l'obtention du diplôme de :
Doctorat en Sciences en électrotechnique
Option : Machines électriques et commande des systèmes

Sous le Thème :

Contribution à l'Etude, Modélisation et Simulation
Multiphysique en MHD

Présentée par :

BENSEDIRA Nouredine

Devant le jury composé de :

ABDESSEMED Rachid	Prof	Université de Batna 2	Président
CHABANE Mabrouk	Prof	Université de Batna 2	Rapporteur
AGGOUNE Mohammed-Salah	MCA	Université de Batna 2	Co-Rapporteur
BENAKCHA Abdelhamid	Prof	Université de Biskra	Examineur
RAHEM Djamel	Prof	Université d'Oum El Bouaghi	Examineur
BAHLOUL Derradji	Prof	ENSER - Batna	Examineur
DRID Said	Prof	Université de Batna 2	Invité

Décembre 2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

« وَفِي الْأَرْضِ فِطْعٌ

مُتَّجَوِرَاتٌ وَجَنَّاتٌ مِّنْ أَعْنَابٍ وَزُرْعٌ وَنَخِيلٌ صِنَوَاتٍ وَغَيْرِ صِنَوَاتٍ
تُسْفَى بِمَاءٍ وَاحِدٍ وَتُبْضِلُ بَعْضَهَا عَلَى بَعْضٍ فِي الْأَكْلِ إِنَّ فِي
ذَلِكَ لَآيَاتٍ لِّقَوْمٍ يَعْقِلُونَ »

الآية 04 من سورة الرعد



Remerciements

Je présente tous mes remerciements tout d'abord à mon dieu "Allah" qui m'a aidé à réaliser mon objectif et à compléter ce travail de recherche.

Cette recherche n'aurait pas vu le jour sans la précieuse collaboration de certaines personnes qui ont su me guider dans les différentes étapes du travail et qui m'ont appuyé depuis le début.

Je remercie mes directeurs de thèse qui ont accepté de me diriger pour cette recherche. Grâce à leur disponibilité, leurs conseils et leurs remarques, la réalisation de cette thèse a abouti à sa fin.

- *Monsieur **CHABANE Mabrouk**, Professeur à l'université Mostefa Ben Boulaïd - Batna2.*
- *Monsieur **AGGOUNE Mohammed-Salah**, Maître de Conférences à l'université Mostefa Ben Boulaïd - Batna2.*

*Je voudrais remercier tout particulièrement Monsieur **DRID Said**, Professeur à l'université Mostefa Ben Boulaïd - Batna2, qui a un rôle important dans le déroulement de cette étude. Il a toujours été disponible, à l'écoute de mes nombreuses questions, et s'est toujours intéressé à l'avancée de mes travaux.*

Je tiens à remercier vivement les membres du jury :

- *Monsieur **ABDESSEMED Rachid**, Professeur à l'université Mostefa Ben Boulaïd - Batna2, pour avoir accepté de présider le jury de cette thèse.*
- *Monsieur **BAHLOUL Derradji**, Professeur à l'école Nationale Supérieure en Energies Renouvelables, Environnement et Développement Durable, Monsieur **RAHEM Djamel**, Professeur à l'université d'Oum El Bouaghi et Monsieur **BENAKCHA Abdelhamid**, Professeur à l'université de Biskra,*

d'avoir accepté de juger ce travail et pour leurs commentaires scientifiques et leurs recommandations qui ont renforcé ce travail.

- *Que tous les enseignants qui ont contribué à ma formation reçoivent ma gratitude et mes remerciements en particulier ceux du département d'électrotechnique de l'université de Batna.*
- *Enfin, J'aimerais exprimer ma gratitude à mon épouse qui a su m'aider et me supporter moralement pendant la réalisation de ce travail. J'aimerais également remercier mes proches et en premier lieu mes parents de m'avoir soutenu. Je remercie aussi mes frères, mes sœurs. Sans oublier d'exprimer mes remerciements à tous mes amis et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin. À tous ceux qui m'ont aidé, je vous remercie profondément.*

BENSEDIRA Noureddine

Dédicace

إهداء

إلى اللذين ضحيا من أجلي و شجعاني على المثابرة طوال
مشوار الدراسة... أمي و أبي المُبجلين أمدهما الله بالصحة
والعافية.

إلى زوجتي ... رفيقة الكفاح و المكابدة التي لم تدخر وقتاً أو
جهداً بغية تمكيني من إتمام هذا البحث.

إلى إخوتي و أخواتي الذين صبروا علي و كانوا خير سندٍ لي و
لولا هم لما تيسرت لي سبل الدراسة و البحث.

إلى كافة أصدقاء الدرب و إلى كل من تربطني به أواصر العلم
و المعرفة و العمل.

أهدي هذا العمل

بن سديرة نورالدين

Liste des symboles et
abréviations

\vec{A}	$T.m$	Potentiel vecteur magnétique
\vec{B}	T	Induction magnétique
\vec{B}_r	T	Induction rémanente
c_i	mol / m^3	Concentration molaire
\vec{D}	C / m^2	Induction électrique
D_i	m^2 / s	Coefficient de diffusion d'espèce (i)
\vec{E}	V / m	Champ électrique
\vec{F}	N / m^3	Force volumiques de convection
F_f	C / mol	Constant de Faraday
\vec{H}	A / m	Champ magnétique
I	A	Courant électrique
\vec{J}	A / m^2	Densité de courant total
\vec{J}_{ex}	A / m^2	Densité de courant d'excitation
\vec{J}_{in}	A / m^2	Densité de courant induit
\vec{J}_s	A / m	Densité de courant de surface
Ma	—	Nombre de Mach
M_i	g / mol	Masse molaire d'espèce (i)
N_{cb}	—	Nombre de cellules bi-compartiments
\vec{N}_i	$Kg / m^2 .s$	Flux molaire d'espèce (i)
\vec{N}_i^{conv}	$Kg / m^2 .s$	Flux généré de convection
\vec{N}_i^{diff}	$Kg / m^2 .s$	Flux de diffusion
\vec{N}_i^{mig}	$Kg / m^2 .s$	Flux de migration
P	Pa	Pression
Q	Litres/heure	Débit volumétrique de solution diluée
R_{am}	Ω	Résistance de la membrane échangeuse d'anions
R_c	Ω	Résistance du compartiment concentré
R_{cb}	Ω	Résistance d'une cellule bi-compartiments
R_{cm}	Ω	Résistance de la membrane échangeuse de cations

R_d	Ω	Résistance du compartiment dilué
\vec{u}	m/s	Vitesse d'écoulement
u_{mi}	$s.mol/Kg$	Mobilité ionique d'espèce (i)
V	V	Potentiel électrique
V_{cb}	V	Chute de tension dans chaque cellule bi-compartiments
V_d	V	Tension aux bornes du compartiment dilué
V_c	V	Tension aux bornes du compartiment concentré
V_{cm}	V	Tension aux bornes de la membrane échangeuse de cation
V_{am}	V	Tension aux bornes de la membrane échangeuse d'anion
V_{tot}	V	Tension d'alimentation totale
ΔV	V	Chute de tension aux électrodes
\vec{v}_D	m/s	Vitesse de déplacement des charges
z_i	—	Charge d'espèce (i)
ε	F/m	Permittivité électrique
ε_0	F/m	Permittivité électrique du vide
ε_r	—	Permittivité relative
μ	H/m	Perméabilité magnétique
μ_0	H/m	Perméabilité magnétique du vide
μ_r	—	Perméabilité relative
σ	S/m	Conductivité électrique
ρ	$\Omega.m$	Résistivité électrique
ρ_o	Kg/m^3	Densité volumique de l'eau pure
ρ_L	C/m^3	Densité de charges libres
ρ_m	Kg/m^3	Masse volumique d'électrolyte
ρ_s	C/m^2	Densité surfacique de charge
\mathcal{G}	m^2/s	Viscosité cinématique
λ_i	$S.m^2/mol$	Conductivité molaire d'espèce (i)
MCD	—	Mode de couplage direct
MCA	—	Mode couplage alterné
EDP	—	Equation aux dérivées partielles
MDF	—	Méthode des différences finies
MVF	—	Méthode des volumes finis

MEF	—	Méthode des éléments finis
MIF	—	Méthode des intégrales de frontières
MSM	—	Méthodes sans maillage

Sommaire

CHAPITRE I : Etude bibliographique

I.1. Introduction.....	03
I.2. Propriétés, classification des eaux et technologies de dessalement.....	03
I.2.1. Contexte général	03
I.2.2. Propriétés et classification des eaux	04
I.2.2.1. Eau douce	05
I.2.2.2. Eau saumâtre	05
I.2.2.3 Eau salée	05
I.2.3. Technologies de dessalement de l'eau	06
I.2.4. Dessalement de l'eau à petite échelle	07
I.3. Electrodialyse : Description et application au dessalement à petite échelle	09
I.3.1. Contexte générale	09
I.3.2. Description des procédés d'électrodialyse	09
I.3.2.1. Principe de fonctionnement	09
I.3.2.2. Membranes échangeuses d'ions	10
I.3.2.3. Dimensionnement et modes de fonctionnement	11
I.3.3. Procédé d'électrodialyse à petite échelle	12
I.4. Pompes magnétohydrodynamiques (MHD)	13
I.4.1. Contexte générale	13
I.4.2. Principe physique des pompes MHD	15
I.4.3. Classification des pompes MHD	16
I.4.3.1. Pompes MHD à conduction	16
I.4.3.2. Pompes MHD à induction	18
I.4.4. Avantages et inconvénients des pompes MHD	19
I.4.4.1. Avantages	20
I.4.4.2. Inconvénients	20
I.5. Orientation de travail et prototype proposé	20
I.6. Conclusion	22
Bibliographie	23

CHAPITRE II: Modèles mathématiques des phénomènes physiques

I.1 Introduction	25
II.2 Phénomène électromagnétique	25

I.2.1	Equations de maxwell et relations constitutives du milieu	25
I.2.1.1	Equations de maxwell	25
I.2.1.2	Relations constitutives du milieu	26
I.2.2	Conditions aux interfaces et conditions aux limites	27
I.2.2.1	Conditions aux interfaces	27
I.2.2.2	Conditions aux limites	28
I.2.3	Hypothèses simplificatrices	29
I.2.4	Formulation électromagnétique	30
II.3	Phénomène hydrodynamique	31
II.3.1	Fluide newtonien et écoulement incompressible	31
II.3.2	Formulation vectorielle du phénomène hydrodynamique	32
II.3.2.1	Conservation de la quantité de mouvement	32
II.3.2.2	Conservation de la masse	33
II.3.3	Terme de couplage	33
II.3.4	Hypothèses simplificatrices	33
II.4	Phénomène de transport ionique	34
II.4.1	Mécanismes de transport et densité de flux de matière	34
II.4.1.1	Diffusion	34
II.4.1.2	Migration	34
II.4.1.3	Convection forcée et/ou naturelle	34
II.4.2	Bilan de conservation des espèces	35
II.4.3	Terme de couplage	35
II.4.4	Hypothèses simplificatrices	36
II.5	Tension d'alimentation et débit volumétrique d'un procédé d'électrodialyse	36
II.5.1	Tension d'alimentation d'un procédé d'électrodialyse espèces	37
II.5.2	Débit volumétrique de solution diluée	38
II.6	Conclusion	39
	Bibliographie	40

CHAPITRE III: Méthodes numériques et outils de simulation

III.1	Introduction	42
III.2	Différentes méthodes de discrétisation	42
III.2.1	Méthode des différences finies (MDF)	42
III.2.2	Méthode des volumes finis (MVF)	43
III.2.3	Méthode des éléments finis (MEF)	44
III.2.4	Méthode des intégrales de frontières (MIF)	45

III.2.5 Méthodes sans maillage (MSM)	45
III.2.6 Synthèse	46
III.3 Algorithmes de couplage des phénomènes physiques	46
III.3.1. Rôle du couplage	46
III.3.2. Couplage Electromagnétique – Hydrodynamique	48
III.3.3. Couplage Electromagnétique – Transport ionique	48
III.3.4. Couplage Hydrodynamique – Transport ionique	49
III.4 Outil de simulation numérique	50
III.4.1 Contexte	50
III.4.2 Construction d'un couplage MHD –Transport ionique dans COMSOL	51
III.4.3 Maillages et Sélection des éléments	53
III.4.4 Solveurs et gestionnaire de résolution	54
III.4.4.1 Solveurs de résolution	54
III.4.4.2 Gestionnaire de résolution.....	55
III.4.5 Post-traitement et export des résultats.....	55
III.5 Conclusion	55
Bibliographie	56

CHAPITRE IV: Simulation numérique et discussion

IV.1 Introduction	58
IV.2 Description générale du prototype proposé	58
IV.3 Conditions aux limites et conditions d'interfaces	60
IV.4 Implémentation sous COMSOL Multiphysics	61
IV.5 Résultats de simulation et interprétation	62
IV.5.1 Représentation des grandeurs magnétiques	62
IV.5.2 Représentation des grandeurs électriques	63
IV.5.3 Profil et évolution de la vitesse d'écoulement	64
IV.5.4 Profil et évolution de la concentration des espèces	66
IV.5.5 Effet de l'induction et de la tension appliquée sur la performance de cellule.....	69
IV.5.6 Performance d'un procédé composé de N_{cb} cellules bi-compartiments.....	69
IV.6 Conclusion	75
Bibliographie	76
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	78
BIBLIOGRAPHIE GLOBALE.....	80

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

L'accès à l'eau potable reste un problème majeur pour la population mondiale; des millions de décès sont enregistrés chaque année dans le monde en raison de problèmes étroitement liés au manque d'eau potable. Alors que le monde a besoin de plus en plus d'eau douce, les systèmes de dessalement de l'eau salée ont fait des progrès impressionnants au cours des dernières décennies, mais il est incontestable que la pénurie d'eau continue d'être un défi mondial.

Le dessalement consiste à produire de l'eau douce à partir d'une eau salée ou saumâtre. Deux grandes familles de procédés sont utilisées désormais pour le dessalement de l'eau de mer : les procédés thermiques qui se sont fortement développés à partir de la fin des années 1940 et les procédés membranaires qui ont vu le jour à la fin des années 60. L'idée de produire des équipements de dessalement de l'eau petits et portables est l'un des sujets les plus prometteurs à développer. Dans un proche avenir, cela ouvrira la porte à une utilisation généralisée de ces équipements, en particulier dans les zones où la disponibilité en eau est abondante et le manque d'eau potable est alarmant. Cela signifie que cette technologie contribuera à améliorer les conditions de vie de millions de personnes dans le monde.

Le processus d'électrodialyse est l'un des procédés membranaires utilisés dans le dessalement de l'eau de mer. Dans cette méthode les ions du sel dissous dans l'eau, comme le chlorure de sodium par exemple, se déplacent sous l'action d'un champ électrique créé par des électrodes. Les ions positifs sont attirés par l'électrode négative tandis que les ions négatifs sont attirés par l'électrode positive. On ajoute alternativement des membranes filtrantes soit imperméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions, on obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration. Dans ces systèmes, le plus souvent, l'écoulement du fluide à traiter est assuré par des pompes externes faisant du système un dispositif encombrant et ces systèmes ne peuvent pas être facilement miniaturisés pour une utilisation pratique en laboratoire, à domicile ou à des fins mobiles. La solution proposée dans ce travail consiste à remplacer ces pompes par des systèmes magnétohydrodynamiques (MHD).

La magnétohydrodynamique (MHD) est l'étude de l'interaction des champs magnétiques et des écoulements de fluide conducteurs. Cette discipline s'attache à des phénomènes très variés de l'échelle du laboratoire (pour les métaux liquides et les gaz ionisés) à l'échelle planétaire (champ magnétique

terrestre). Les pompes magnétohydrodynamiques (MHD) sont conçues dans le but de n'avoir aucune partie mobile et sont ainsi débarrassées de problèmes d'usure et de fatigue provoqués par la basse pression à travers les pièces mécaniques. Comparées à d'autres types de pompes non mécaniques, les pompes magnétohydrodynamiques montrent plusieurs avantages ; à savoir la simplicité de fabrication et des forces continues de pompage.

Le présent travail est composé de quatre chapitres : Le premier chapitre est une revue bibliographique replaçant l'étude dans son contexte scientifique. Le second chapitre porte sur la présentation des lois fondamentales et les équations régissant les phénomènes apparaissant au sein de système à étudier. Le troisième chapitre se rapporte à l'exposition des différentes méthodes de discrétisation des équations aux dérivées partielles (EDP), des algorithmes de couplage et de l'outil numérique " COMSOL Multiphysics ". Le dernier chapitre est consacré à la présentation et la discussion des résultats de simulation du modèle élaboré. Finalement, on terminera ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus et par des recommandations sur les travaux futurs dans ce domaine de recherche.

Chapitre I

CHAPITRE I: Etude bibliographique

I.1. Introduction

L'accès à l'eau potable reste un problème majeur, des millions de décès sont enregistrés chaque année dans le monde en raison de problèmes étroitement liés au manque d'eau potable. Pour cette raison, les systèmes de purification de l'eau salée ont fait des progrès impressionnants au cours des dernières décennies, mais il est incontestable que la pénurie d'eau continue d'être un défi mondial. L'idée de produire des équipements de dessalement d'eau petits et portables est l'un des sujets les plus prometteurs à développer car ces technologies contribueront à améliorer les conditions de vie des populations, en particulier dans les zones désertiques et rurales. Cet aspect sera traité dans le présent travail.

Cette étude bibliographique est composée de trois parties. Nous commencerons dans un premier temps par un aperçu sur la technologie de dessalement de l'eau accompagné par une revue des travaux effectués et orientés vers la technologie portable et domestique. Dans un deuxième temps nous introduirons une revue des travaux portant sur les procédés d'électrodialyse notamment celles effectués à petite échelle. Le processus d'électrodialyse est une opération complexe où l'écoulement du fluide à traiter est généralement assuré par des pompes externes faisant du système un appareil encombrant et ces systèmes ne peuvent pas être facilement miniaturisés pour une utilisation pratique en laboratoire, à domicile ou à des fins mobiles. Le travail dans la troisième partie s'oriente vers le phénomène magnétohydrodynamique (MHD) afin de l'exploiter pour rendre le processus pratique et moins encombrant car il n'utilise aucune pompe externe et utilise uniquement une source de courant continu.

I.2. Propriétés, classification des eaux et technologies de dessalement

I.2.1. Contexte général

L'eau est abondante sur terre, elle représente 1,4 milliards de kilomètres cubes. L'essentiel toutefois est constitué d'eau de mer (97,2 %) et de glace (2,15 %) inutilisables directement. L'eau douce, facilement disponible (lacs, fleuves, certaines eaux souterraines), ne représente que 0,07 % de la ressource totale soit environ un million de kilomètres cubes [1-2].

De nombreux pays souffrent encore aujourd'hui de pénurie en eau potable. La croissance démographique et la dégradation de certaines ressources en eau douce en raison de l'activité humaine ou de changements climatiques ne favorisent pas la résolution de ce problème et tendent même à l'accroître. Beaucoup de régions dans le monde souffrent du manque en eau douce, à savoir les régions arides et désertiques où l'accessibilité à l'eau de rivière devient presque impossible. Malgré des progrès importants, le problème de l'eau potable se pose toujours et représente un enjeu technique, économique et politique majeur du XXIème siècle [3].

En effet, l'OMS (Organisation Mondiale de la Santé) considère qu'il y a stress hydrique lorsqu'un être humain dispose de moins de 1700 mètres cubes d'eau par an et pénurie lorsqu'il dispose de moins de 1000 mètres cubes par an. Malheureusement, de nos jours, plus de 1,4 milliards de personnes vivent avec moins de 1000 mètres cubes d'eau par an [1].

Pour faire face à cette pénurie annoncée d'eau, des nouvelles techniques de production d'eau potable sont déjà mises en place et devront être améliorées, pour satisfaire les besoins de la population croissante [1,3]. Le dessalement de l'eau de mer – ou les eaux saumâtres, moins salées que l'eau de mer mais impropres à la consommation – est une solution présentant un immense intérêt et attrait. Cette solution est également justifiée par le fait que près de 40% de la population vit à moins de 100 km des côtes [4-5].

Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années, mais leur coût limite souvent leur utilisation aux pays riches. Cependant dans les dernières années, la capacité des usines de dessalement s'est fortement accrue et les coûts de production par mètre cube ont connu une forte diminution. Ces processus ont permis à des pays du tiers monde (Algérie, Arabie Saoudite ...) d'acquérir ces technologies et les exploiter [1].

I.2.2. Propriétés et classification des eaux

La somme des masses de tous les constituants contenus dans un kilogramme d'eau de mer est appelée salinité. Cette salinité peut varier de quelques g/kg dans les zones où les apports en eau douce sont importants (mer Noire, mer Baltique) à plus de 40 g/kg dans les régions arides où l'évaporation l'emporte sur les précipitations (mer Rouge). La salinité moyenne des mers et océans est d'environ 35 g/kg. En

pratique, la salinité est un nombre sans dimension ; on l'exprime donc plutôt en ‰ qu'en g/kg ou en g/L [6-7]. Lorsqu'on classe les eaux en fonction des quantités de matières dissoutes qu'elles contiennent, on distingue trois différents types d'eau:

I.2.2.1. Eau douce : L'eau est dite douce lorsque sa salinité est inférieure à 1 g/L. On retrouve majoritairement les eaux douces sur les continents. On estime qu'uniquement 2,5 % de l'eau retrouvée sur Terre est douce et donc susceptible de servir à la consommation [6].

I.2.2.2. Eau saumâtre : L'eau saumâtre forme la transition entre les zones d'eau douce et celles d'eau salée. La salinité est comprise entre 1 et 10 g/L. On retrouve les eaux saumâtres principalement à l'embouchure des fleuves, dans les estuaires et dans les deltas [6].

I.2.2.3 Eau salée : L'eau des mers et des océans possède une salinité supérieure à celle de l'eau douce. Toutes les eaux dont la salinité dépasse 10 g/L sont qualifiées de salées. L'eau salée représente 97,5 % de l'hydrosphère terrestre. Parmi les nombreux types de sel retrouvés dans l'eau de mer, le chlorure de sodium (NaCl) est le plus abondant [6].

L'eau de mer a une salinité moyenne de 35g /L et plus de 85% des ions présents sont les ions Cl^- et Na^+ . Les différents pays ont établis des normes de potabilité [7]. Ces normes sont variables d'un pays à un autre. Pour l'OMS les valeurs maximales admissibles pour les deux ions Cl^- et Na^+ sont: 200 mg/L (5,63 mol/L) et 175 mg/L (7,61mol/L) respectivement [8].

Ions	Masse (g/litre)	Pourcentage (%)
Chlorure	19.354	55.2
Sodium	10.770	30.7
Sulfate	2.712	7.7
Magnésium	1.290	3.7
Calcium	0.412	1.2
Potassium	0.399	1.1
Hydrogénocarbonate + Carbonate	0.146	0.4

Tableau I.1 Principaux sels dissous pour une eau de mer de salinité 35 g/litre [7].

I.2.3. Technologies de dessalement de l'eau

Le dessalement consiste à produire de l'eau douce à partir d'une eau salée ou saumâtre, le dessalement de l'eau de mer est connu depuis l'Antiquité et constitue une solution fiable utilisée par de nombreux pays côtiers notamment au Moyen-Orient. Deux grandes familles de procédés sont utilisées désormais pour le dessalement de l'eau de mer : les procédés thermiques qui se sont fortement développés à partir de la fin des années 1940 et les procédés membranaires qui ont vu le jour à la fin des années 60. Quel que soit le procédé utilisé, le fonctionnement général est identique : il faut introduire de l'eau de mer dans l'unité de dessalement et lui fournir de l'énergie pour ensuite en extraire de l'eau douce et de la saumure (eau de mer plus concentrée). Les procédés thermiques sont largement utilisés dans les pays où une source énergétique abondante et/ou peu chère est disponible (pétrole ou énergie solaire) [3, 9, 10, 11]. Le tableau I.2 répertorie les principales techniques de dessalement existantes.

Procédés thermiques	Procédés membranaires	Procédés non conventionnels
Multi-flash	Osmose inverse	Humidification / déshumidification
Multiple - effet	Electrodialyse	Distillation membranaire
Compression de vapeur	Nano filtration	Osmose directe
		Congélation

Tableau I.2 Principaux procédés industriels de dessalement d'eau de mer

Le présent travail s'oriente vers le dessalement par les procédés d'électrodialyse. La description de processus et les travaux effectués, seront présentés dans la section I.3.

En effet, les procédés de dessalement restent assez coûteux énergétiquement malgré de nombreuses améliorations dans les récupérations d'énergie. L'utilisation des technologies de dessalement entraînées par des sources d'énergie renouvelable est un moyen appliqué dans de nombreux endroits aujourd'hui pour produire l'eau douce. Ces technologies améliorent la performance avec le développement continu des sources d'énergie renouvelable qui présentent l'unique alternative d'alimenter les systèmes de dessalement dans les régions isolées et où le dessalement est nécessaire [1, 2, 12].

L'adaptation appropriée d'un procédé de dessalement à une source d'énergie est en fonction de sa capacité de fournir un approvisionnement satisfaisant en eau à un coût raisonnable. Aussi, la sélection de la combinaison appropriée dépend d'un certain nombre de facteurs tels que : la quantité de l'eau à dessaler, l'éloignement et la disponibilité de l'électricité du réseau, l'infrastructure technique, le type et le potentiel de la ressource locale d'énergie renouvelable. En particulier, l'association de plusieurs sources est actuellement prometteuse pour les régions éloignées, où la connexion au réseau électrique public est coûteuse ou indisponible. Les systèmes d'approvisionnement en électricité dans des endroits isolés sont maintenant prouvés technologiquement. Plusieurs travaux théoriques et expérimentaux ont été mis en œuvre ces dernières années. Généralement, ces travaux se sont articulés autour des points suivants [1, 12, 13]:

- Faisabilité et flexibilité de configuration des unités de dessalement composées de plusieurs sous-unités,
- Energies renouvelables associées aux procédés de dessalement notamment les réflecteurs thermiques solaires, les panneaux photovoltaïques, les sources éoliennes et les couplages hybrides,
- Solutions et stratégies utilisées pour adapter les fluctuations d'énergie au processus de dessalement.
- Analyse technico- économique, avantages et inconvénients environnementaux des procédés de dessalement.

I.2.4. Dessalement de l'eau à petite échelle

L'idée de produire des équipements de dessalement de l'eau petits et portables est l'un des sujets les plus prometteurs à développer. Dans un proche avenir, cela ouvrira la porte à une utilisation généralisée de ces équipements, en particulier dans les zones où la disponibilité en eau salée est abondante et le manque d'eau potable est important. Cela signifie que cette technologie contribuera à améliorer les conditions de vie de millions de personnes dans le monde.

Dans ce contexte, une équipe d'ingénieurs a développé une usine mobile de dessalement utilisant comme source d'énergie des panneaux solaires et un prototype a déjà été testé dans plusieurs villages de l'Inde en 2014. Cette idée a été conçue par les ingénieurs du MIT associés à Jain Irrigation Systems aux États-Unis. Techniquement, l'usine utilise l'énergie produite grâce aux rayons du soleil pour charger ses batteries qui alimentent un "électrodialyseur" chargé de dessaler l'eau, elle-même pompée dans l'océan ou la mer. L'eau produite est alors parfaitement potable [14].

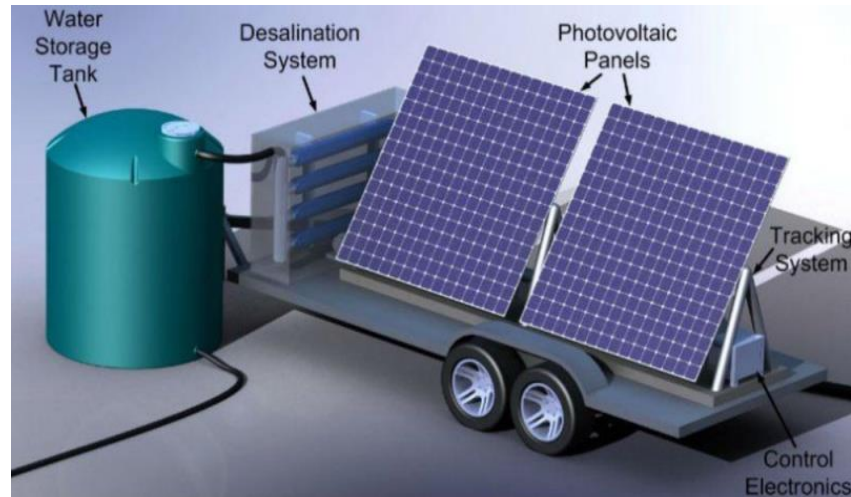


Figure I.1 Usine de dessalement mobile du MIT [14]

En 2014, une nouvelle méthode de dessalement de l'eau de mer a été signalée à Angewandte Chemie par une équipe de chercheurs américains et allemands. L'originalité de la solution réside dans son caractère chimique et son action au niveau des atomes via une puce électronique. Elle présente des avantages très importants: grande simplicité et très faible consommation d'énergie. Le système peut prendre différentes dimensions, depuis l'installation portable individuelle jusqu'à, potentiellement, l'unité de production de grandes quantités d'eau potable [15].

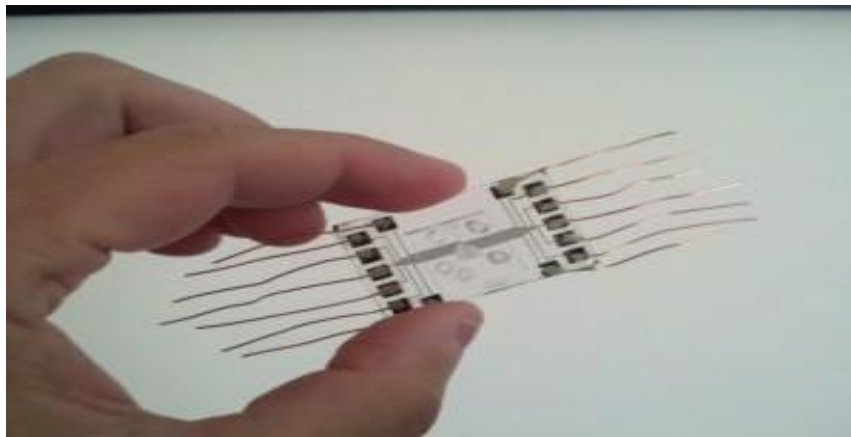


Figure I.2 Prototype de la puce à eau potable (Université du Texas) [15]

D'autre part, des chercheurs chinois ont conçu un nouveau système du matériau dans le pliage d'oxyde de graphène qui dépend de l'utilisation de l'énergie solaire qui a été testée expérimentalement et a

fourni des résultats prometteurs, ce qui signifie que la construction de systèmes de dessalement mobiles et de pliage deviendra dans un proche avenir, un lieu commun. Les détails de ce nouveau système ont été publiés dans le magazine «PNAS», une publication scientifique de l'Académie nationale des sciences des États-Unis en 2016 [16,17].

En ce qui concerne les procédés d'électrodialyse, certains travaux avec des unités à petite échelle ont été effectués au cours des deux dernières décennies. Ces travaux sont détaillés dans la section I.3.3.

I.3. Electrolyse : Description et application au dessalement à petite échelle

I.3.1. Contexte général

Le terme dialyse désigne la diffusion d'un soluté à travers une membrane qui lui est perméable; l'électrodialyse désigne le transfert d'ions à travers une membrane sous l'effet d'un champ électrique. Le premier équipement commercialisé basé sur la technologie de l'électrodialyse (ED) a été développé dans les années 1950 pour déminéraliser l'eau saumâtre. Depuis, l'ED a progressé rapidement en raison de l'amélioration des propriétés de la membrane échangeuse d'ions [18].

Durant les années 1960 l'électrodialyse inverse (EDI) a été introduite, pour éviter les problèmes d'encrassement organiques. Au cours des vingt dernières années l'EDI a gagné une réputation comme un processus de dessalement membranaire qui fonctionne économiquement et de manière fiable sur les approvisionnements en eau de surface, eau recyclée et certaines applications industrielles spécifiques[18].

En termes d'installations actuellement implantées, la plus importante application de l'électrodialyse reste celle de la production d'eau potable à partir d'eau saumâtre, dans ce domaine l'électrodialyse est en compétition directe avec l'osmose inverse et l'évaporation multi-étagée. L'électrodialyse a été implantée aux USA dans les années 1970. Aujourd'hui, il existe des installations de dessalement d'eau de mer à grande échelle en Arabie Saoudite ou dans les zones où les eaux souterraines sont saumâtres aux USA et en Russie [18].

I.3.2. Description des procédés d'électrodialyse

I.3.2.1. Principe de fonctionnement

Dans l'électrodialyse les ions d'un sel dissous dans l'eau, comme le chlorure de sodium par exemple, se déplacent sous l'action d'un champ électrique créé par les électrodes. Les ions positifs ou cations (Na^+) sont attirés par l'électrode négative ou (Cathode) tandis que les ions négatifs ou anions (Cl^-)

sont attirés par l'électrode positive (Cathode). On ajoute alternativement des membranes filtrantes (membranes échangeuses d'ions: M.E.I) soit imperméables aux anions et perméables aux cations, soit imperméables aux cations et perméables aux anions, on obtient ainsi une série de compartiments à forte concentration de sels et d'autres à faible concentration. La figure I.3 permet d'illustrer l'agencement des membranes et les différents flux de transfert qui interviennent pendant l'électrodialyse d'une solution de NaCl. L'ensemble de ces éléments est maintenu entre deux plaques sous une forte pression de serrage, constituant ainsi un réacteur ou empilement. Le motif unitaire est nommé cellule. Un même réacteur peut contenir plusieurs centaines de cellules [18-24].

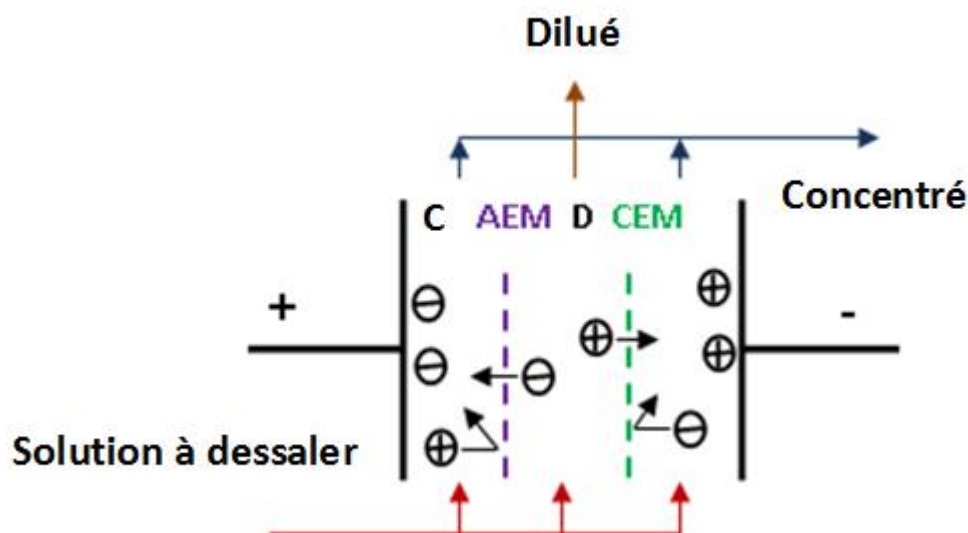


Figure I.3 Vue schématique d'une cellule d'électrodialyse

I.3.2.2. Membranes échangeuses d'ions

Les membranes échangeuses d'ions (M.E.I) sont des matériaux à travers lesquels peut s'établir un transport sélectif d'ions. Les échangeurs d'ions les plus courants sont organiques. Ils sont constitués de chaînes macromoléculaires réticulées formant une structure tridimensionnelle. Sur le réseau ainsi formé sont distribués des groupements fonctionnels ionisables qui sont à la base de la spécificité de la membrane. Si les sites fonctionnels ionisés sont de charge négative, la membrane est appelée échangeuse de cations (MEC), dans le cas contraire il s'agit d'une membrane échangeuse d'anions (MEA). Il existe plusieurs sortes de MEI selon leurs structures et méthodes de fabrication. Pour un fonctionnement efficace, les MEI doivent posséder de bonnes propriétés de sélectivité, une haute stabilité mécanique et

chimique, une faible résistance électrique et ne pas se dégrader à l'utilisation par colmatage ou empoisonnement le plus fréquemment causés par le passage les ions organique [18-24].

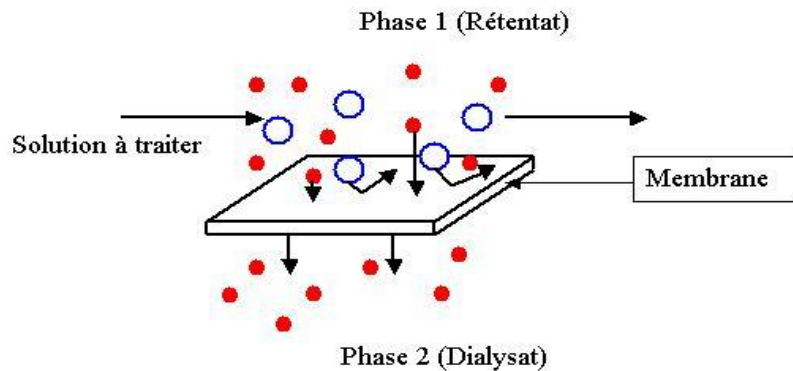


Figure I.4 Schéma explicatif d'une membrane échangeuse d'ions (MEI)

I.3.2.3. Dimensionnement et modes de fonctionnement

Le dimensionnement d'un électrodialyseur est lié à la capacité moyenne d'épuration. Ce paramètre qui caractérise les performances de l'installation dépend de plusieurs paramètres, tels que : l'électrolyte, la mobilité des ions et la durée du traitement. Il existe plusieurs modes de fonctionnement réalisables, tels que : le fonctionnement continu, discontinu et semi continu ou avec recirculation partielle ou totale comme le montre la figure I.5. Le choix d'un mode de fonctionnement se fait essentiellement selon les concentrations des solutions initiales et celles désirées à la sortie, sans oublier les aspects économiques et autres [18].

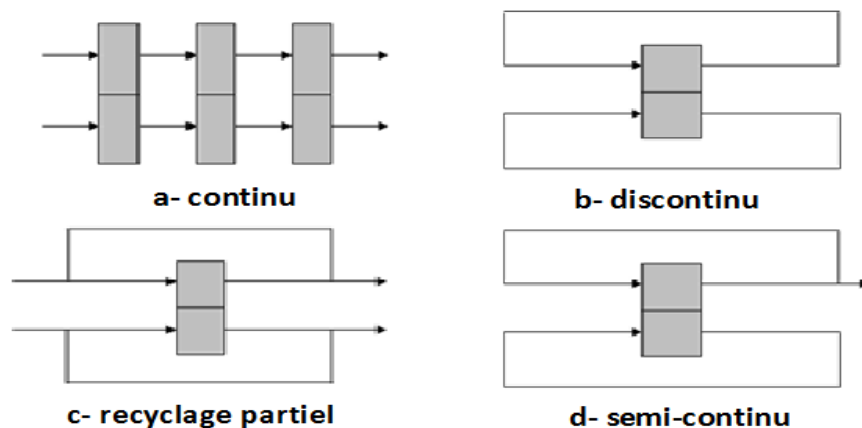


Figure I.5 Schémas de différents modes de fonctionnement d'un électrodialyseur

I.3.3. Procédé d'électrodialyse à petite échelle

De nombreux travaux avec des unités à petite échelle, en particulier pour l'élimination et la récupération de certains éléments trouvés dans les eaux usées, ont été réalisés au cours des deux dernières décennies.

En ce qui concerne le dessalement de l'eau salée, Omar Chaalal et al ont conçu en 2015 un système d'électrodialyse à petite échelle composé de six compartiments et mené une série d'expériences sur le transport des ions de sodium (Na^+) et de chlorure (Cl^-). Les effets du courant électrique et de la tension sur la salinité de l'eau ont été étudiés. Les résultats obtenus confirment que cette application a le potentiel pour des usages domestiques dans des maisons isolées où l'approvisionnement en eau potable n'est pas disponible. Ceci a été réalisé lorsque deux électrodialyseurs à petite échelle ont été placés en série et les solutions des compartiments respectifs ont été mélangées (figure I.6) [25].

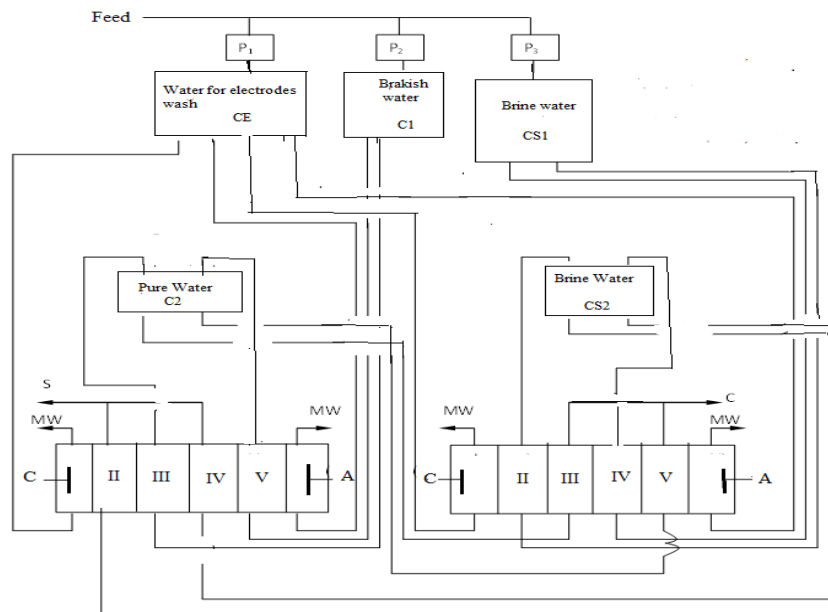


Figure I.6 Un diagramme schématique de l'unité d'électrodialyseur à deux étages [25]

En 2017, une solution alternative à la méthode d'osmose inverse (RO) pour le dessalement de l'eau dans les maisons a été conçue et présentée expérimentalement par K.G. Nayar et al. Les résultats indiquent qu'il est possible de concevoir un système d'électrodialyse à petite échelle qui peut traiter les eaux souterraines tout en offrant une récupération d'eau plus élevée que les produits OI. En outre, il a été démontré que le coût du système proposé était estimé à l'intérieur de la fourchette de prix des produits RO à domicile existants, avec des réductions potentielles des coûts globaux [26].

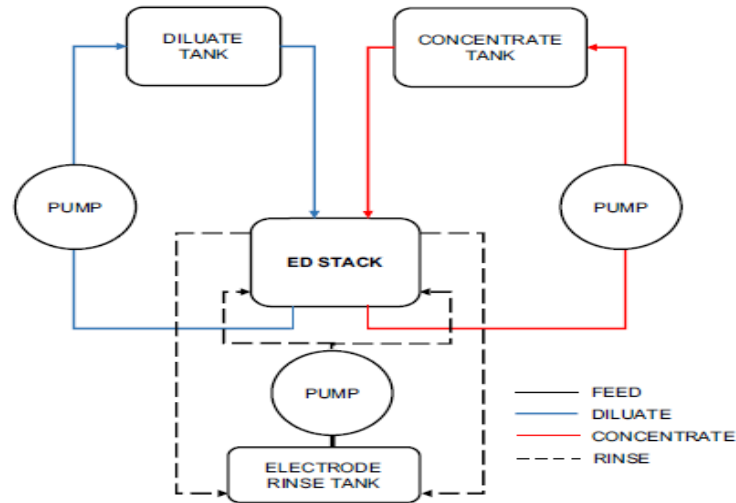


Figure I.7 Organigramme du montage expérimental [26]

Ces procédés utilisent des pompes externes pour pomper l'eau salée vers les dispositifs de filtrage. La présence et éventuellement de telles pompes engendrent des difficultés supplémentaires qu'il convient de considérer. Dans notre travail, on se penche sur la MHD afin d'éliminer définitivement ce type de problèmes.

I.4. Pompes magnétohydrodynamiques (MHD)

I.4.1. Contexte général

La magnétohydrodynamique est la manière d'agir sur un fluide soumis à des forces électromagnétiques, à condition qu'il soit suffisamment conducteur de l'électricité. On parlera alors d'accélérateur MHD. Le physicien suédois Hannes Alfvén fut le premier à employer le terme magnétohydrodynamique en 1942. Il reçut le prix Nobel de physique en 1970 pour ses travaux sur le sujet [27,28].

Les premières études sur la propulsion MHD en milieu océanique datent de la fin des années 1950 aux États-Unis. En 1958 l'ingénieur Stewart Way, du département R&D de Westinghouse à Pittsburgh, publie une analyse très complète et mathématiquement rigoureuse d'un système de propulsion CC à conduit externe. Dès le début des années soixante, un important effort de recherche en MHD avait été initié dans de nombreux pays : Angleterre, URSS, USA, France. Des pays comme l'Allemagne, puis le Japon rejoignent ce peloton plus tard. En 1961, Warren A. Rice dépose le premier brevet [RIC 61], en parallèle aux travaux des américains James B. Friauf et O. M. Philips [27-29].

Un second rapport de Stewart Way est publié en 1964 par l'ASME (American Society of Mechanical Engineers). En 1966, S. Way teste avec succès le premier modèle réduit de sous-marin à propulsion MHD muni de deux électrodes, long de 3 mètres et pesant 400 kilos, dans la baie de Santa Barbara en Californie. Ces recherches sont stoppées durant la décennie suivante, à cause de l'impossibilité de fabriquer les bobines produisant de très forts champs magnétiques nécessaires à un rendement MHD correct. Les Soviétiques continuent cependant les recherches militaires sur la propulsion MHD des sous-marins, afin de rendre ceux-ci silencieux et donc furtifs [27, 28].

La disponibilité d'électroaimants supraconducteurs, capables de produire les champs magnétiques nécessaires (plusieurs teslas), relance ensuite ces études. Aux USA, celles-ci sont destinées en priorité aux sous-marins de l'US Navy. Dans les années 1990, l'Université de Pennsylvanie mène des expériences au FBNML (Francis Bitter National Magnet Laboratory) du MIT (Massachusetts Institute of Technology) en circuit fermé et utilisant une configuration hélicoïdale. Les résultats obtenus affichent des vitesses d'écoulement de 3,7 mètres par seconde et un rendement de 10 % avec un champ magnétique de 8 teslas. En parallèle à ces recherches universitaires, l'US Navy ne commente pas les éventuelles réalisations effectives, mais publie à la même époque plusieurs brevets décrivant des sous-marins à propulsion MHD. [27, 28].

Les Japonais mènent des recherches civiles sur la propulsion MHD depuis les années 1970. L'université de la marine marchande de Kobé réalise en 1976, sous la direction du physicien Yoshiro Saji, une première maquette suivie d'une seconde de 3,6 mètres de long pesant 700 kilos en 1979, et envisage à cette époque la future construction d'un brise-glace sans hélices propulsé par MHD. Le premier véritable navire à propulsion MHD, le Yamato 1 (utilisant 12 accélérateurs linéaires de Faraday) navigue pour la première fois en 1992. La Chine teste également à la fin des années 1990 un prototype de bateau à propulseur MHD hélicoïdal muni d'un électroaimant de 5 teslas, le HEMS-1, et entreprend un partenariat avec le Japon pour tester la propulsion MHD en laboratoire avec des champs magnétiques de grande intensité (15 teslas). En France, le physicien Jean-Pierre Petit du CNRS réalise, à l'IMFM (Institut de Mécanique des Fluides de Marseille) en 1976, l'annihilation de la vague d'étrave et de la turbulence de sillage autour d'un profil cylindrique, immergé dans un courant d'eau acidulée dans un champ magnétique de 4 teslas, par les forces de Lorentz en écoulement externe. Dans les années 1990, la Marine nationale passe un contrat avec l'Université Grenoble-1, afin d'effectuer au LEGI (Laboratoire des écoulements géophysiques et industriels) une veille technologique sur la propulsion MHD [27,28].

En France, la MHD est restée longtemps associée à la production de l'énergie électrique en utilisant le mouvement des gaz ionisés soumis à un champ magnétique. A partir de 1969, date à laquelle

cette activité a été mise en sommeil et définitivement arrêter car la rentabilité à l'échelle industrielle fut estimée trop faible vu les problèmes plutôt technologiques rencontrés (tenue et qualité des matériaux) que dans les principes mis en jeu[30].

En ce qui concerne les pompes MHD, la première application a été le pompage du sodium pour le refroidissement des réacteurs nucléaires. Dès les années 1970, ces pompes ont été utilisées pour le pompage des métaux liquides à haute température comme le zinc et l'aluminium. Aujourd'hui leur domaine d'application est très large, elles sont utilisées notamment dans le pompage d'eau de mer, de métal fondu, de sel fondu et de pompage de nanofluides [30].

Des recherches récentes ont révélé de nombreuses complications susceptibles de réduire considérablement l'efficacité réalisable d'une pompe MHD. Ces travaux a été orienté notamment vers: la conception et dimensionnement des pompes, la supraconductivité dans le but d'obtenir des champs magnétiques de haute intensité, le choix de fluide conducteur, le comportement thermique et ionique du fluide à pomper et enfin la conversion multiphasée [29].

I.4.2. Principe physique des pompes MHD

Le principe de base de MHD est simple; un courant unidirectionnel (I) est établi à travers un fluide électriquement conducteur tel que l'eau de mer. Ensuite, un champ magnétique de haute intensité (\vec{B}) perpendiculaire au courant est imposé à travers le fluide. Ceci donne naissance à une force de Laplace (\vec{F}) qui entraîne la circulation du fluide conducteur dans le canal. La Figure I.8 présente le schéma classique et simplifié du principe de fonctionnement d'une pompe magnétohydrodynamique. Dans le cas général, une pompe MHD comprend les composants suivants: Canal d'écoulement, aimant super-conducteur, électrodes, alimentation électrique et structure de soutien [27-32].

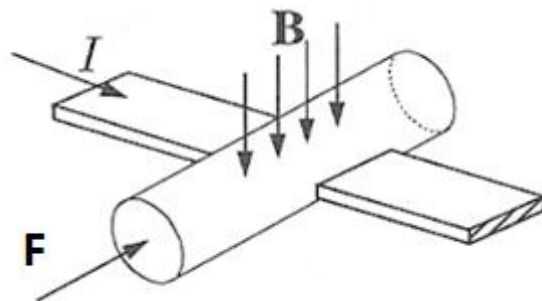


Figure I.8 Principe de fonctionnement d'une pompe MHD

La force de Laplace (\vec{F}) est exprimée par la relation suivante :

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (\text{I.1})$$

Avec (\vec{J}) la densité de courant dans le fluide conducteur et (\vec{B}) l'induction magnétique. Il s'agit bien évidemment de la loi sur laquelle est basé le fonctionnement de la plupart des machines électriques tournantes. Dans le cas d'une pompe MHD, le rotor est remplacé par un fluide conducteur [33,34].

I.4.3. Classification des pompes MHD

Les pompes magnétohydrodynamiques sont classées en fonction de la nature du courant qui les traverse (continu ou alternatif), de la manière dont est créé le champ magnétique (continu ou alternatif) et de l'origine du courant (induction ou conduction). Nous trouvons aujourd'hui deux catégories principales de pompes magnétohydrodynamique, les pompes à conduction et les pompes à induction. Nous parlons de pompe à conduction lorsque le courant est injecté dans le canal de pompage par l'intermédiaire d'électrodes. Dans le cas des pompes à induction, le courant est induit à l'intérieur du canal de pompage par la présence d'un champ magnétique glissant [27-32].

I.4.3.1. Pompes MHD à conduction

Les pompes magnétohydrodynamiques à conduction sont constituées d'un canal dans lequel s'écoule un fluide électriquement conducteur. La Figure I.9 représente le schéma d'une telle pompe. L'interaction entre l'induction magnétique (\vec{B}) suivant le courant (I) injecté par les électrodes donne naissance à une force de Laplace (\vec{F}) qui entraîne l'écoulement du fluide [27-32].

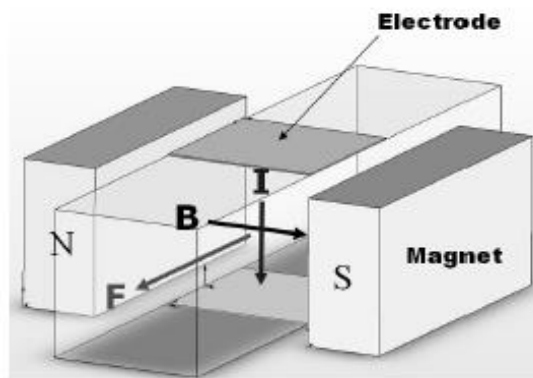


Figure I.9 Schéma d'une pompe MHD à conduction

- **Pompes à conduction à courant continu**

Les pompes à conduction à courant continu (MHD DC) se rapprochent de la roue de Barlow. Deux électrodes injectent un courant continu à travers le fluide soumis à un électroaimant (ou un aimant permanent) qui crée le champ magnétique. Le circuit magnétique peut être refermé par un barreau de fer pour éviter les fuites magnétiques vers l'extérieur et obtenir une induction élevée. La Figure I.10 représente le schéma d'une pompe MHD DC avec un canal rectangulaire et dont l'induction magnétique est créée par des aimants [27-32].

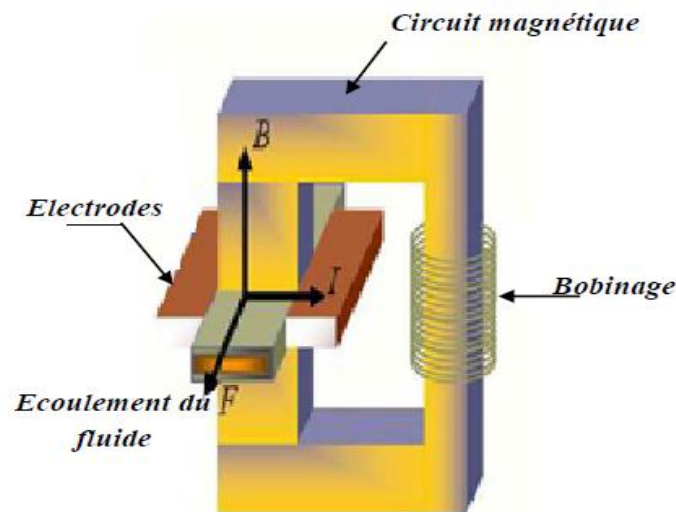


Figure I.10 Pompe à conduction à courant continu

- **Pompes à conduction à courant alternatif**

Dans le cas des pompes magnétohydrodynamiques à courant alternatif (MHD AC), le courant dans le fluide et le courant dans le bobinage sont sinusoïdaux. Le courant traversant le canal de pompage peut donc être fourni en sortie d'un transformateur, et le champ magnétique par un électro-aimant (Figure I.11). L'utilisation d'un transformateur permet d'avoir une alimentation des électrodes très simple car il est assez complexe d'obtenir des alimentations DC à fort courant et faible tension ayant un bon rendement. Le champ magnétique et le courant dans le fluide doivent avoir la même fréquence. La force de pompage est maximale si le champ magnétique et le courant sont en phase d'où l'idée d'avoir la même alimentation pour le courant et l'induction magnétique [27-32].

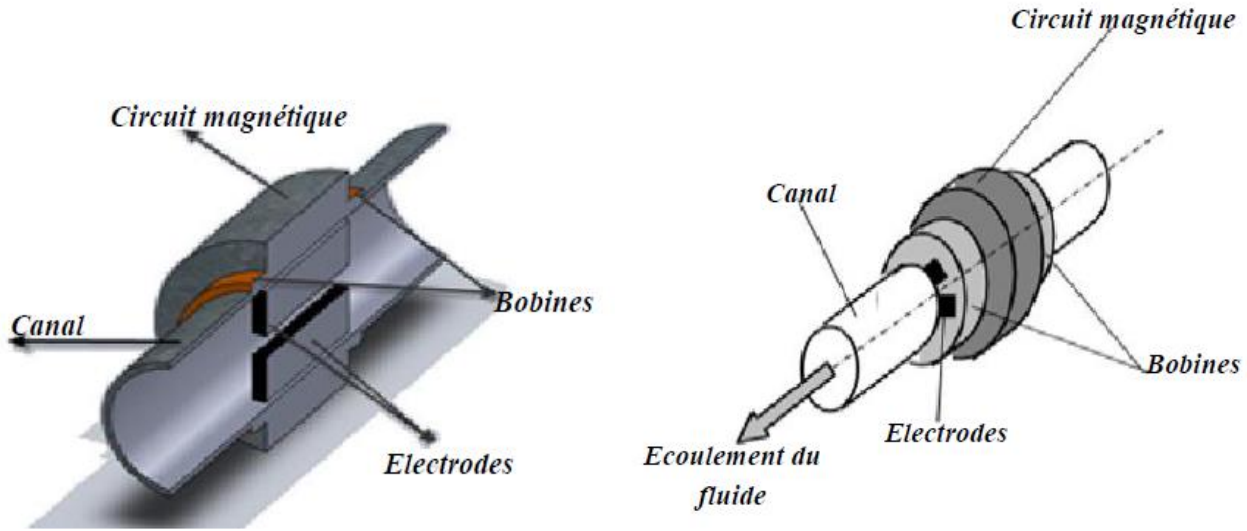


Figure I.11 Pompe à conduction à courant alternatif AC

I.4.3.2 Pompes MHD à induction :

Les pompes à induction se rapprochent des moteurs asynchrones. Le principe général consiste à créer un champ magnétique glissant avec des enroulements polyphasés (en général triphasés). Ce dernier induit des courants dans le fluide conducteur qui créent à leur tour une force de Lorentz tendant à le mettre en mouvement. La Figure I.12 montre les courants induits dans les pompes à induction [27-32].

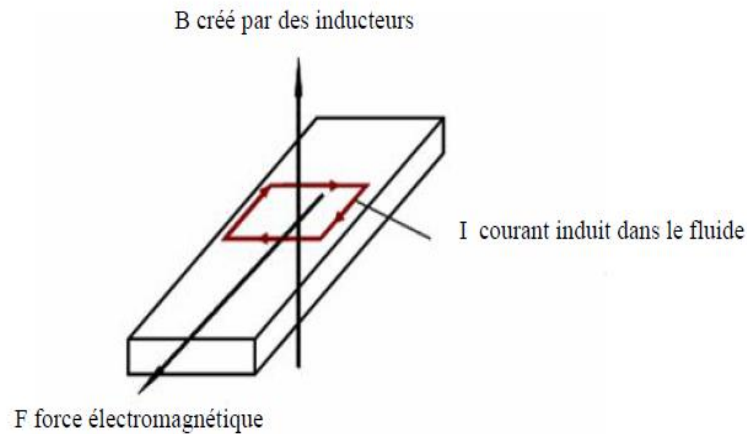


Figure I.12 Lignes de courant dans une pompe MHD à induction

Il existe plusieurs types des pompes à induction. Les plus utilisées dans l'industrie sont les pompes plates et les pompes annulaires. Les deux types sont illustrés dans les figures I.13 et I.14 respectivement où la différence entre les deux est leur géométrie [27-32].

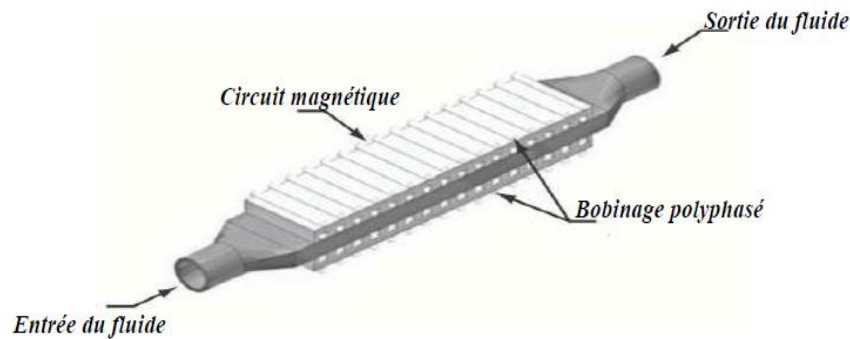


Figure I.13 Pompe MHD à induction plate

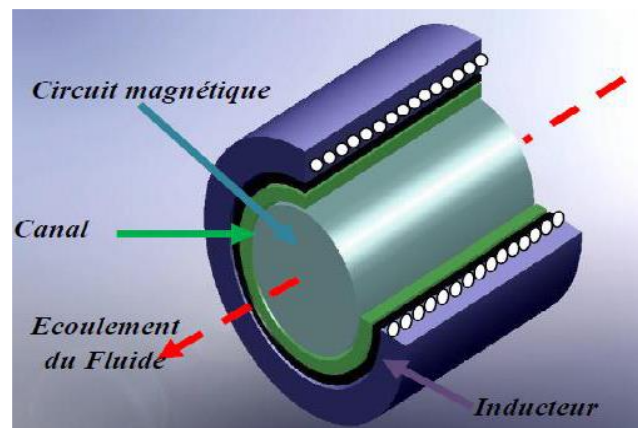


Figure I.14 Pompe MHD à induction annulaire

I.4.4. Avantages et inconvénients des pompes MHD

Les machines électriques rotatives ont occupé une grande place dans l'industrie depuis bien longtemps, mais ces dernières ne peuvent pas régler tous les problèmes, comme le transport des métaux liquides, le pompage, etc... Beaucoup de progrès et développements ont été réalisés dans le domaine des machines linéaires dont les applications sont relativement nouvelles. Plusieurs revues et documents techniques se sont penchés sur ce sujet durant ces deux dernières décennies. Ainsi la technologie a évolué et les pompes MHD ont pris places dans différents domaines comme la métallurgie et dans les centrales nucléaires [34]. On peut résumer les avantages et les inconvénients des pompes MHD comme suit :

I.4.4.1. Avantages

- Simple, compacte, silencieuse et plus fiable car il n'y a pas de pièces mobiles,
- Peut supporter des environnements à très haute température,
- Densité de puissance élevée, haute efficacité et temps transitoire court,
- Fabrication plus facile à micro-échelle et maintenance minimale requise [29].

I.4.4.2 Inconvénients

- Les défis de la technologie des supraconducteurs empêchent une utilisation plus large,
- Les gros aimants représentent une dépense majeure et flux inversé en fin de champ magnétique,
- Répartition non homogène du profil de vitesse du fluide et instabilité du débit dans certaines conditions de fonctionnement [29].

I.5. Orientation de travail et prototype proposé

Le processus d'électrodialyse est une opération complexe où l'écoulement du fluide à traiter est généralement assuré par des pompes externes faisant du système un appareil encombrant et ces systèmes ne peuvent pas être facilement miniaturisés pour une utilisation pratique en laboratoire, à domicile ou à des fins mobiles [33,34]. Dans une étude expérimentale (figure I.15) menée par J.J.Schoeman, la faisabilité d'utiliser de petites techniques (osmose inverse, échange d'ions et électrodialyse) pour éliminer les nitrates et l'azote de l'eau a été envisagée pour une utilisation au niveau clinique dans la province du Limpopo. Il a noté que le processus d'électrodialyse est adapté pour atteindre l'objectif, mais qu'il est plus compliqué et difficile à opérer dans les zones rurales [33].



Figure I.15 Expérience réalisée par J.J.Schoeman [33]

En 2005, un nouveau design pour le dessalement de l'eau où l'écoulement du fluide dans un procédé d'électrodialyse est généré par un effet magnétohydrodynamique (MHD) est proposé par Philippe Sizat et al. Ils ont souligné que le montage habituel (Canal Hartmann) où les aimants et les électrodes sont orthogonaux ne peut pas atteindre l'objectif souhaité [28]. La conception proposée par Philippe Sizat et al est présentée dans la figure I.16.

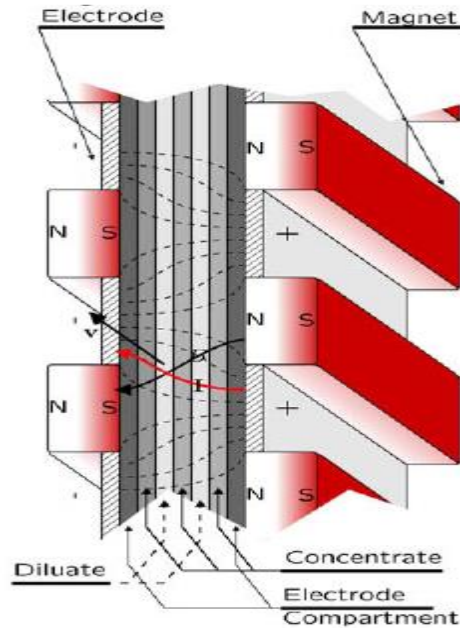


Figure I.16 Conception proposé par Philippe Sizat et al [28]

L'observation soulignée par Philippe Sizat et al est limitée aux systèmes à grandes échelles où les hauteurs des compartiments sont grandes. Dans ce travail, une nouvelle conception applicable à l'échelle portable et domestique est proposée où les aimants et les électrodes sont orthogonaux. Un aimant permanent est ajouté à un procédé d'électrodialyse. L'ensemble devient pratique et moins encombrant car il n'utilise aucune pompe externe, n'ayant pas de pièces mobiles et utilise uniquement une source de courant continu. En conséquence de la combinaison du courant électrique et du champ magnétique, une force MHD agit sur le fluide dans tous les compartiments. La conception proposée est présentée dans la figure I.17.

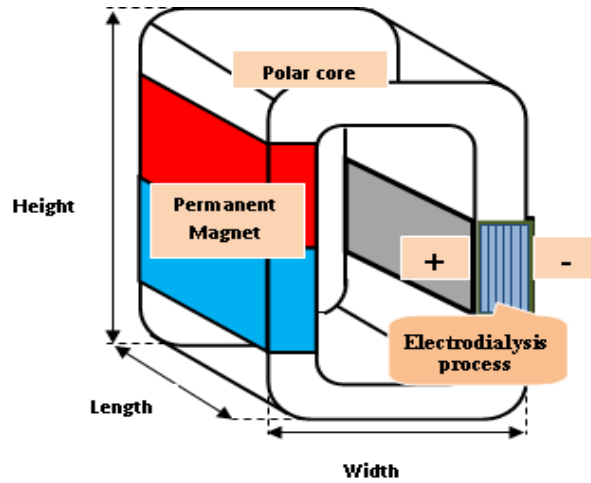


Figure I.17 Conception de système proposé

I.6. Conclusion

L'étude approfondie des performances du système proposé nécessite impérativement une mise en équation des phénomènes apparaissant au sein de l'eau à dessaler et leurs modélisations numériques. Elle consiste en des calculs électromagnétique, hydrodynamique et électrochimique concernant le comportement ionique des espèces constituant le fluide à traiter sera l'objet des prochains chapitres.

Bibliographie

- [1] D. Moudjeber « Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement : Cas de l'Algérie », Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de – Mostaganem, 2015.
- [2] Z. Triki « Études, Analyses et Optimisation de la Consommation Énergétique des Unités de Dessalement pour les Sites Isolés », Thèse de doctorat, Université de constantine1, 2014.
- [3] K.N. Knust, D. Hlushkou, U. Tallarek et R. M. Crooks « Electrochemical desalination for a sustainable water future », *ChemElectroChem*, 1 (2014) 850 – 857.
- [4] M. Laissaoui « Etude et optimisation de l'hybridation solaire des installations des turbines à gaz et turbines à vapeur utilisés pour le dessalement d'eau », 2018.
- [5] L. Guimard « Etude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires », Thèse de doctorat, Université de Lyon1, 2019.
- [6] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-salinite-de-l-eau-s1342>.
- [7] P. Mathon « Influence des forces électromagnétiques sur les processus électrochimiques. Application à la propulsion MHD », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [8] WHO « Guidelines for Drinking-water Quality », fourth edition, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland, 2011.
- [9] O. Charrouf « Commande et Optimisation D'un Système de Dessalement Hybride : Solaire-Eolien », Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider – Biskra, 2018.
- [10] L. Guimard « Etude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires », Thèse de doctorat, Université de Lyon1, 2019.
- [11] A. Campionea, A. Cipollina, E. Toet, L. Gurreri, I.D.L. Bogle et G. Micale « Water desalination by capacitive electrodialysis: Experiments and modeling », *Desalination*, 473 (2020) 1-13.
- [12] M. Elimelech et W.A. Phillip « The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment », *Science*, 333 (2011) 712-717.
- [13] A.B. Chaaben, R. Andoulsi, A. Sellami et R. Mhiri « MIMO Modeling Approach for a Small Photovoltaic Reverse Osmosis Desalination System », *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4 (2011) 35-41.
- [14] MIT Energy Initiative « Energy Futures », Massachusetts Institute of Technology. (2015).
- [15] D. Hlushkou, K.N. Knust, R.M. Crooks and U. Tallarek « Numerical simulation of electrochemical desalination », *Journal of Physics: Condensed Matter*, 28(2016) 1-28.
- [16] X.Q. Li, W.C Xu, M.G Tang, L. Zhou, B. Zhu, S.N Zhu et J. Zhu « Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path », *PNAS*, 113 (2016) 13953–13958.
- [17] X.Z. Hu, W.C. Xu, L. Zhou, Y.L. Tan, Y. Wang, S.N. Zhu et J. Zhu « Tailoring Graphene Oxide-Based Aerogels for Efficient Solar Steam Generation under One Sun », *Advanced Materials*, 29 (2017) 1-5.

- [18] A. Fadel « Etude et modélisation du traitement des eaux de surface par des procédés électromembranaires », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif, 2016.
- [19] M.R ghalloussi – Alloui « Contribution à l'étude du vieillissement de membranes échangeuses d'ions utilisées dans un procédé d'électrodialyse pour l'industrie agroalimentaire », Thèse de doctorat, Université Paris – Est, 2012.
- [20] R. Zerdoumi « Contribution a l'étude de la polarisation de concentration et la dissociation de l'eau dans les membranes échangeuses d'ions », Mémoire de magister, Université de Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [21] P. Y. Pontalier « Identification et modélisation du transfert de matière dans des membranes de nanofiltration », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1996.
- [22] M. Akhter, G. Habib et S. U. Qama « Application of electro dialysis in waste water treatment and impact of fouling on process performance », *J Membr Sci Technol*, 8(2) (2018) 1-8.
- [23] A. Campione, A. Cipollina, E. Toet, L. Gurreri, I. D. L. Bogle et G. Micale « Water desalination by capacitive electro dialysis: Experiments and modelling », *Desalination*, 473 (2020)114150.
- [24] M. Červenková, J. Chromíková, S. Heviánková et Z. Wranová « The application of electro dialysis for the recovery of phosphorus from wastewater sludge liquid discharge », *E&ES*, 92(1) (2017) 012007.
- [25] O. Chaalal et M. M. Hossain « A small-scale membrane electro-dialyser for domestic use, *Membrane Water Treatment* », 6(1) (2015) 43-52.
- [26] K. G. Nayar, P. Sundararaman, J. D. Schacherl, C. L. O'Connor, M. L. Heath, M.O. Gabriel et A. G. Winter « Feasibility study of an electro dialysis system for in-home water desalination in urban India, *Development Engineering* », 2 (2017) 38-46.
- [27] N. Benneceb « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [28] K. Bouali « Contribution a l'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (MHD) », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [29] O. M. Al-Habahbeh, M. Al-Saqqa, M. Safi et T.A. Khater « Review of magneto hydrodynamic pump applications », *Alexandria Engineering Journal*, 55(2) (2016) 1347-1358.
- [30] N. Bergoug « Contribution à la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [31] S. Naceur « Contribution à la modélisation 2d d'un convertisseur magnétohydrodynamique (MHD) à conduction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [32] M. Tawk « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique », Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.
- [33] J. J. Schoeman « Nitrate-nitrogen removal with small-scale reverse osmosis, electro dialysis and ion-exchange units in rural areas », *Water SA*, 35(5) (2009) 721-728.
- [34] P. Sstat, P. Huguet et V. Nikonenko, « Magneto hydrodynamic flow in electro dialyser channel », 207th ECS Meeting, Quebec City (Canada), (2005).

Chapitre II

CHAPITRE II: Modèles mathématiques des phénomènes physiques

I.1 Introduction

En présence d'un champ magnétique, l'étude des phénomènes apparaissant au sein d'un électrolyte aqueux à dessaler par un système électrodialyse est à la croisée de trois sciences: l'électromagnétique, la mécanique des fluides et le transport ionique. Le présent chapitre expose les lois fondamentales et les équations régissant ces trois phénomènes avec leurs termes des couplages. En premier lieu, le phénomène électromagnétique sera introduit, pour cela, les lois constitutives du matériau, qui sont caractéristiques de chaque milieu doivent être ajoutées aux équations de Maxwell pour déterminer les paramètres électromagnétiques relatifs à chaque problème. La seconde partie introduira le phénomène hydrodynamique, dans ce contexte, ce sont les équations de Navier stokes associées aux propriétés du fluide qui permettent de trouver la variation de la vitesse d'écoulement et de la pression. En troisième partie, il est fait appel aux équations dites de Nernst-Planck pour l'analyse des flux des espèces constituant la solution à traiter. Finalement la tension d'alimentation et le débit volumétrique d'un procédé d'électrodialyse composé d'un nombre important de compartiments seront présentés et explicités.

II.2 Phénomène électromagnétique

I.2.1 Equations de Maxwell et relations constitutives du milieu

I.2.1.1 Equations de Maxwell:

L'interaction entre l'électricité et le magnétisme a permis à Maxwell d'énoncer ses quatre équations fondamentales. Elles représentent la base de l'électromagnétisme; c'est-à-dire que ces quatre équations locales expriment les relations entre divers champs en tout point de l'espace et à chaque instant [1-4]. Elles peuvent être décrites comme suit:

1- Equation de Maxwell-Gauss:

$$\operatorname{div}(\vec{D}) = \rho_L \quad (\text{II-1})$$

2- Equation de Maxwell-Faraday (phénomène d'induction)

$$\text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-2})$$

3- Equation de conservation du flux magnétique

$$\text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II-3})$$

4- Equation de Maxwell-Ampère:

$$\text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (\text{II-4})$$

Où:

- \vec{D} : Vecteur induction électrique (déplacement électrique),
- ρ_L : Densité volumique de charges libres,
- \vec{E} : Vecteur champ électrique,
- \vec{B} : Induction magnétique,
- \vec{H} : Vecteur champ magnétique.

I.2.1.2 Relations constitutives du milieu

Pour définir complètement les phénomènes électromagnétiques à l'intérieur d'un milieu, on rajoute aux quatre équations précédentes les lois de comportement des milieux ainsi que la loi d'Ohm [6-10]:

$$1- \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II-5})$$

$$2- \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II-6})$$

$$3- \quad \vec{J} = \vec{J}_{in} + \vec{J}_{ex}$$

(II-7)

Avec:

$$\vec{J}_{in} = \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{v}_D \wedge \vec{B}) \quad (\text{II-8})$$

Dans cette dernière équation, le premier terme représente la densité de courant induit par conduction tandis que le second terme représente la densité de courant induit par la vitesse de déplacement des charges (\vec{v}_D) [9,10].

Avec:

- ε : Permittivité électrique,
- μ : Perméabilité magnétique,
- \vec{J}_{in} : Densité de courant induit,
- \vec{J}_{ex} : Densité de courant source,
- σ : Conductivité électrique.

I.2.2 Conditions aux interfaces et conditions aux limites

Pour que le problème soit complètement défini, il faut déterminer les conditions aux limites sur les frontières du domaine, ainsi que les conditions de passage entre les différents milieux constituant ce domaine. Comme le système est à variation temporaire, la simulation tien compte des conditions initiales telles que : $\vec{B}(M,0) = \vec{B}_0$ [7-10].

I.2.2.1 Conditions aux interfaces

Lors du passage d'un milieu repéré 1 vers un milieu repéré 2, les grandeurs électromagnétiques subissent des discontinuités et ne sont donc plus mathématiquement différentiables. Les équations qui les relient s'écrivent alors [7-10]:

- Conservation de la composante normale de l'induction magnétique:

$$(\vec{B}_1 - \vec{B}_2) \cdot \vec{n} = 0 \tag{II-9}$$

- Discontinuité de la composante normale de l'induction électrique due aux charges surfaciques si elles existent:

$$(\vec{D}_1 - \vec{D}_2) \cdot \vec{n} = \rho_s \tag{II-10}$$

- Conservation de la composante tangentielle du champ électrique:

$$\left(\vec{E}_1 - \vec{E}_2\right) \times \vec{n} = 0 \tag{II-11}$$

- Discontinuité de la composante tangentielle du champ magnétique due aux courants surfaciques s'ils existent:

$$\left(\vec{H}_1 - \vec{H}_2\right) \times \vec{n} = J_s \tag{II-12}$$

Avec :

- ρ_s : Densité surfacique de charge,
- J_s : Densité surfacique de courant,
- \vec{n} : Vecteur unitaire normal dirigé vers l'extérieur du milieu 1.

I.2.2.2 Conditions aux limites

La définition complète du problème magnétodynamique doit prendre en compte les conditions aux limites du type [7-10]:

- **DIRICHLET** (Champ électromagnétique imposé nul sur les frontières):

Le potentiel vecteur est nul à l'infini simulé par (une boîte d'air) autour du domaine d'étude:

$$A = 0 \tag{II-13}$$

- **NEUMANN** (Dérivé du champ imposé nulle sur les frontières):

La condition de Neumann s'écrit donc:

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \tag{II-14}$$

On observera que le modèle magnétodynamique, définissant une équation locale, devra être systématiquement adapté à la région à laquelle il s'applique.

I.2.3 Hypothèses simplificatrices

Les équations de Maxwell décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques et leurs résolutions ne sont possibles que dans le cas de dispositifs simples. Pour déterminer le modèle mathématique qui régit les phénomènes électromagnétiques dans une pompe MHD à conduction, certains phénomènes deviennent négligeables et certaines hypothèses simplificatrices sont à proposer [7-10]:

- Dans le cadre de l'approximation des régimes lentement variables (quasi-statique), les courants de déplacement $\left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right)$ sont négligeables devant les courants de conduction,
- La densité volumique de charge ρ est considérée comme nulle,
- Les matériaux à utiliser sont à propriétés isotropes.

Avec ces hypothèses, les équations de Maxwell, les relations constitutives du milieu et la loi d'Ohm seront résumées comme suit :

$$1- \quad \text{div} \vec{D} = 0 \quad (\text{II-15})$$

$$2- \quad \text{rot}(\vec{E}) = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (\text{II-16})$$

$$3- \quad \text{div}(\vec{B}) = 0 \quad (\text{II-17})$$

$$4- \quad \text{rot}(\vec{H}) = \vec{J} \quad (\text{II-18})$$

$$5- \quad \vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II-19})$$

$$6- \quad \vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II-20})$$

$$7- \quad \vec{J} = \vec{J}_{in} + \vec{J}_{ex} \quad \text{avec : } \vec{J}_{in} = \sigma \vec{E} + \sigma(\vec{v}_D \wedge \vec{B}) \quad (\text{II-21})$$

I.2.4 Formulation électromagnétique

Pour le calcul numérique, la formulation des équations de Maxwell en équations simples est nécessaire dans le but de réduire le nombre d'inconnues et de simplifier la résolution. Il existe un grand nombre de formulations telles que: la formulation en \vec{B} , la formulation en \vec{A} et la formulation en \vec{A}^* [7-10].

Par ailleurs, dans le cadre des pompes MHD à conduction, on a opté pour la formulation en \vec{A} dont les avantages présentés par ce type de formulation sont nombreux [7-10]:

- C'est la plus utilisée et elle réduit le nombre d'inconnues,
- Elle permet d'imposer des sources électriques par des bobines et des électrodes,
- La connaissance de toute autre grandeur physique peut être déduite,
- Cette équation est utilisée par les logiciels de simulation.

La relation (II-17) implique que \vec{B} dérive d'un potentiel vecteur \vec{A} tel que:

$$\vec{B} = \text{rot}(\vec{A}) \tag{II-22}$$

En tenant compte de (II-16) et (II-22), le champ électrique peut être exprimé par :

$$\vec{E} = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \text{grad}(V) \tag{II-23}$$

Où :

V : Potentiel scalaire électrique.

D'après l'équation (II-18) et les relations (II-19); (II-20); (II.22); (II.23), on obtient l'équation:

$$\text{rot}(\text{rot}(\vec{A})) + \sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \sigma \text{grad}(V) - \sigma(\vec{v}_D \wedge \vec{B}) = \vec{J}_{ex} \tag{II.24}$$

Les termes $\sigma \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$ et $\sigma(\vec{v}_D \wedge \vec{B})$ représentent les densités des courants induits. Ils traduisent le caractère dynamique dans le temps et dans l'espace des phénomènes électromagnétiques; pour la pompe MHD à conduction proposée, le champ magnétique imposé est constant ; donc le premier terme s'annule, tandis que le terme $\sigma \text{grad}(V)$ décrit la densité du courant imposée à travers les électrodes. V représente le potentiel scalaire électrique en Volts (n'est pas nul) [7-10].

Pour pouvoir résoudre l'équation (II.24), on applique une autre équation pour que la solution soit unique. On fixe la divergence de \vec{A} (jauge de Coulomb) tel que:

$$\text{div}(\vec{A})=0 \tag{II.25}$$

Le modèle électromagnétique de la pompe sera comme suit [7-10]:

$$r\vec{ot}(vr\vec{ot}(\vec{A})) + \sigma \text{grad}(V) - \sigma(\vec{v}_D \wedge \vec{B}) = \vec{J}_{ex} \tag{II.26}$$

$$\text{div}(\vec{A})=0 \tag{II.27}$$

II.3 Phénomène hydrodynamique

La dynamique des fluides est l'étude des mouvements des fluides, qu'ils soient liquides ou gazeux. Elle fait partie de la mécanique des fluides avec l'hydrostatique (statique des fluides). La résolution d'un problème de dynamique des fluides demande normalement de calculer diverses propriétés des fluides comme la vitesse, la viscosité, la densité, la pression et la température en tant que fonctions de l'espace et du temps [11,12].

II.3.1 Fluide newtonien et écoulement incompressible

On appelle fluide newtonien (en hommage à Isaac Newton) un fluide dont la loi contrainte – vitesse de déformation est linéaire. La constante de proportionnalité est appelée viscosité.

Un écoulement d'un fluide est dit incompressible lorsque l'on peut négliger ses variations de masse volumique au cours du temps (ce qui ne signifie pas que la densité du fluide soit nécessairement constante en un point au cours du temps, ou uniforme en espace). Un écoulement incompressible est

caractérisé par un champ de vitesse à divergence nulle (autrement dit solénoïdal). On comprend ainsi que l'incompressibilité est liée à la vitesse de l'écoulement et vérifiée lorsque le nombre de Mach (Ma) est faible. En général, on considère l'écoulement incompressible lorsque : $Ma < 0.3$ [8, 9].

II.3.2 Formulation vectorielle du phénomène hydrodynamique

Les équations qui régissent le mouvement d'écoulement du fluide incompressible pour un écoulement à propriétés constantes sont l'équation de conservation de la quantité de mouvement (Equation de Navier Stokes) et l'équation de conservation de la masse (Equation de continuité) [13,14]. Ces deux équations forment un système qu'on appelle équation d'écoulement définie comme suit :

II.3.2.1 Conservation de la quantité de mouvement

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non-linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent de nombreux phénomènes d'écoulement de fluide [8-10].

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \text{grad}) \vec{u} = -\frac{1}{\rho_m} \text{grad}(P) + \mathcal{G} \Delta \vec{u} + \vec{F} \tag{II.28}$$

Avec:

- \vec{u} : Vitesse du fluide,
- P : Pression du fluide,
- \mathcal{G} : Viscosité cinématique du fluide,
- ρ_m : Densité volumique du fluide.

Le terme $\frac{\partial \vec{u}}{\partial t}$ correspond à la dérivée partielle de la vitesse (accélération locale), le terme $(\vec{u} \cdot \text{grad}) \vec{u}$ correspond à une accélération associée à la vitesse qu'acquiert le fluide au cours de son mouvement, le terme $-\frac{1}{\rho_m} \text{grad}(P)$ représente le terme de pression par unité de volume, Le terme $\mathcal{G} \Delta \vec{u}$ représente les forces de frottement visqueux et le dernier terme \vec{F} représente les forces volumiques de convection [8-10].

II.3.2.2 Conservation de la masse

Le principe de conservation de la masse totale contenue dans n'importe quelle particule fluide permet d'écrire une relation locale de conservation de la masse volumique, appelée aussi équation de continuité [8-10]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(\rho \vec{u}) = 0$$

(II.29)

L'hypothèse d'incompressibilité de l'écoulement permet de simplifier l'équation ainsi :

$$\operatorname{div}(\vec{u}) = 0$$

(II.30)

II.3.3 Terme de couplage

La modélisation de la magnétohydrodynamique s'appuie sur les équations de l'électromagnétisme et de la mécanique des fluides rappelées dans les sections précédents. Le couplage de ces deux systèmes d'équations est réalisé par la force de Laplace (eq. I.1).

$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B}$$

(II.31)

Dans l'équation (II.28) la force volumiques de convection (\vec{F}) devient la force de Laplace résultante de l'interaction de la densité de courant (\vec{J}) injecté aux électrodes avec les lignes de champ magnétique (\vec{B}). Selon l'équation de Navier-Stokes, cette force est le responsable du pompage de l'eau salée dans les compartiments même en l'absence de différence de pression externe entre l'entrée et la sortie de la cellule [8-10].

II.3.4 Hypothèses simplificatrices

Les écoulements étudiés ici peuvent faire l'objet de certaines hypothèses permettant de simplifier les équations qui les décrivent [8-10]:

- Les écoulements considérés dans ce travail sont des écoulements laminaires.
- Les fluides étudiés étant des solutions aqueuses, à température ambiante et sous la pression atmosphérique, ils seront considérés comme incompressibles et newtoniens.
- Les matériaux à utiliser sont à propriétés isotropes.

II.4 Phénomène de transport ionique

II.4.1 Mécanismes de transport et densité de flux de matière

Le plus souvent, dans l'étude du transport ionique en solution électrolyte, il est fait appel aux équations dites de Nernst-Planck pour l'analyse des flux des espèces chargées ont été les premiers à considérer, dès la fin du siècle dernier, que le transport des ions se faisait sous l'action de plusieurs forces motrices [15]. Les équations de Nernst-Planck traduisent le fait que le flux ionique molaire total (\vec{N}_i) d'une espèce (i) est la somme de plusieurs flux:

II.4.1.1 La diffusion: due au gradient de concentration ionique. Le flux de diffusion d'une espèce i est donné par la loi de Fick [15]:

$$\vec{N}_i^{diff} = -D_i \text{grad}(c_i) \tag{II.32}$$

II.4.1.2 La migration: due au gradient du potentiel électrique. Le flux de migration d'une espèce i est exprimé par la relation suivante[15]:

$$\vec{N}_i^{mig} = -z_i u_{mi} F c_i \text{grad}(V) \tag{II.33}$$

II.4.1.3 La convection forcée et/ou naturelle: Le mouvement de la solution s'accompagne d'un phénomène de transfert convectif pour chacune des espèces. Le flux généré par cette convection s'écrit[15]:

$$\vec{N}_i^{conv} = c_i \vec{u} \tag{II.34}$$

Le flux total de l'espèce (i) est la somme des trois flux définis ci-dessous ; soit :

$$\vec{N}_i = -D_i \text{grad}(c_i) - z_i u_{mi} F c_i \text{grad}(V) + c_i \vec{u} \tag{II.35}$$

Avec:

- D_i : Coefficient de diffusion de l'espèce (i),
- z_i : Charge de l'espèce (i),
- u_{mi} : Mobilité ionique de l'espèce (i),
- F_f : Constante de Faraday,
- V : Potentiel électrique,
- c_i : Concentration en espèce (i),
- \vec{u} : Vitesse du fluide.

II.4.2 Bilan de conservation des espèces

En plus de la conservation de la masse totale contenue dans une particule fluide, exposée ci-dessus, chaque espèce présente dans la particule fluide se conserve, si elle n'est pas consommée ou produite au cours d'une réaction chimique se produisant dans la solution. Dans le cas général, l'évolution de la concentration locale de l'espèce (i) est donnée par l'équation suivante [16-17]:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \text{div}(\vec{N}_i) = 0 \tag{II.36}$$

La variation spatio-temporelle de transport des espèces présentes dans le fluide sont régies par l'équation suivante:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \text{div}(-D_i \text{grad}(c_i) - z_i u_{mi} F_f c_i \text{grad}(V)) = -\vec{u} \cdot \text{grad} c_i \tag{II.37}$$

II.4.3 Terme de couplage

Le courant électrique résulte du déplacement des charges électriques. Dans un métal, ces charges sont transportées par les électrons, mais au sein d'un électrolyte aqueux, les charges mobiles sont transportées uniquement par les ions. La connaissance du mouvement des ions contenus dans une particule fluide permettra de déduire la densité de courant dans cette particule [16-17].

Mentionnant précédemment que le flux total s'écrit comme suit:

$$\vec{N}_i = -D_i \text{grad}(c_i) - z_i u_{mi} F_f c_i \text{grad}(V) + c_i \vec{u} \quad (\text{II.38})$$

Dans cette équation, Le flux de migration $(z_i u_{mi} F_f c_i \text{grad}(V))$ décrit la densité du courant imposée à travers les électrodes où (V) représente le potentiel électrique et le flux de convection $(c_i \vec{u})$ décrit la densité du courant décrit par l'écoulement d'électrolyte aqueux imposée par la force de Laplace (\vec{F}) [16-17].

La densité de courant électrique totale s'obtient alors en sommant vectoriellement les flux de charges transportés par chaque ion [16-17].

II.4.4 Hypothèses simplificatrices

- Dans ce travail, l'eau salée est considérés comme une solution binaire de NaCl.
- Dans les écoulements considérés ici, aucune réaction chimique ne se déroule dans la solution.
- Les matériaux à utiliser sont à propriétés isotropes [16-17].

II.5 Tension d'alimentation et débit volumétrique d'un procédé d'électrodialyse

La figure II.1 illustre un procédé d'électrodialyse de N_{cb} cellules bi-compartiments où chaque cellule bi-compartiments est constituée de : un compartiment dilué, un compartiment concentré, une membrane échangeuse de cations et une membrane échangeuse d'anions.

En pratique, le nombre de cellules bi-compartiments par module doit être assez élevé de manière, d'une part pour s'adapter aux sources d'énergie disponibles, et d'autre part pour minimiser les pertes aux électrodes et rendre l'installation la plus compacte possible. En général, le nombre de cellules bi-compartiments est compris entre 100 et 500 et la tension d'alimentation a généralement une valeur élevée, il peut être jusqu'à des centaines de vols [18-19].

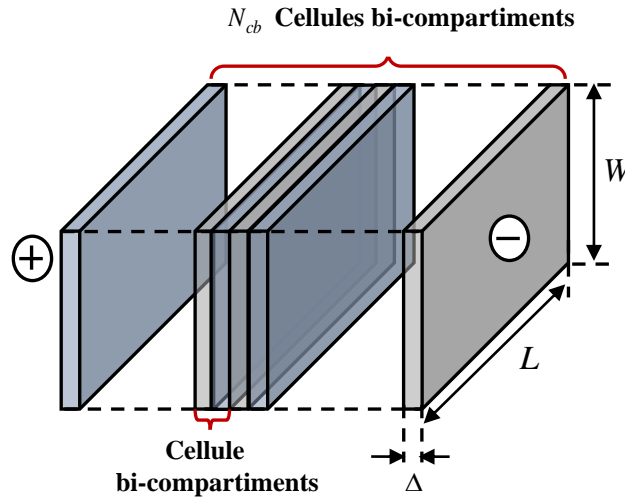


Figure II.1. Procédé d'électrodialyse de N_{cb} cellules bi-compartiments

II.5.1 Tension d'alimentation d'un procédé d'électrodialyse [20-22]

La tension d'alimentation totale (V_{tot}) doit être déterminée par la formule suivante :

$$V_{tot} = \Delta V + N_{cb} \times V_{cb} \tag{II.39}$$

Avec:

$$V_{cb} = V_d + V_c + V_{cm} + V_{am} \tag{II.40}$$

Où le premier terme (ΔV) se réfère à la chute de tension aux électrodes, le deuxième terme (V_{cb}) se réfère à la chute de tension dans chaque cellule bi-compartiments, les termes V_d , V_c , V_{cm} et V_{am} représentent respectivement la tension aux bornes du compartiment dilué, aux bornes du compartiment concentré, aux bornes de la membrane échangeuse de cation et aux bornes de la membrane échangeuse d'anion.

Pour chaque cellule bi-compartiments, quatre résistances peuvent être prises en compte: R_d est la résistance du compartiment dilué, R_c est la résistance de la solution concentrée, R_{cm} est la résistance de la

membrane échangeuse de cations et R_{am} est la résistance de la membrane échangeuse d'anions. La résistance totale s'écrit :

$$R_{cb} = R_d + R_c + R_{cm} + R_{am} \quad (II.41)$$

Selon la loi d'Ohm où (I) est le courant traversant le système la tension (V_{cb}) s'écrit comme suite :

$$V_{cb} = R_{cb} \times I \quad (II.42)$$

Dans la plupart des cas pratiques, l'épaisseur de la membrane et la résistance électrique de la membrane sont bien inférieures à l'épaisseur et à la résistance électrique de la solution diluée. En négligeant les résistances des membranes, la résistance (R) devient :

$$R_{cb} = R_d + R_c \quad (II.43)$$

La tension totale (V_{tot}) devient :

$$V_{tot} = \Delta V + N_{cb} \times (R_d + R_c) \times I \quad (II.44)$$

Les deux résistances R_d et R_c augmentent avec la largeur des compartiments (Δ) et diminuent avec la section transversale ($L \times W$) et la conductivité électrique (σ) des compartiments. Chacune de ces résistances est exprimée par :

$$R_i = \frac{\Delta}{L \times W \times \sigma} \quad (II.45)$$

II.5.2 Débit volumétrique de solution diluée [23]

Le débit volumétrique est un paramètre déterminant dans la conception des systèmes d'électrodialyse. Dans le système de N_{cb} cellules bi-compartiments présenté dans la figure II.1, le débit

volumétrique (Q) de solution diluée augmente avec la section transversale ($\Delta \times W$), la vitesse d'écoulement (u) et avec le nombre de cellules bi-compartiment:

$$Q = N_{cb} \times \Delta \times W \times u \quad (\text{II.46})$$

II.4.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les lois fondamentales et les équations régissant les trois phénomènes physiques (l'électromagnétique, l'hydrodynamique et le transport ionique) intervenant au sein d'électrolyte aqueux à dessaler par un procédé d'électrodialyse en présence d'un champ magnétique avec leurs termes des couplages. Des modèles mathématiques ont été établis, dans leurs formes générales, en liaison avec le type d'application à traiter. Une fois ces modèles mathématiques établis nous aurons besoin de décrire dans le prochain chapitre, les méthodes et les outils numériques adaptés pour résoudre le système d'équations obtenu.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] N. Bennecib, S. Drid et R. Abdessemed « Numerical investigation of flow in a new DC pump MHD », *Journal of applied fluid mechanics*, 2(2) (2009) 23-28.
- [2] M. I. Hasan, A. J. F. Ali et R. S. Tufah « Numerical study of the effect of channel geometry on the performance of Magnetohydrodynamic micro pump », *Engineering science and technology, an international journal*, 20(3) (2017) 982-989.
- [3] S. Naceur, F. Z. Kadid et R. Abdessemed « The study of the electroconductive liquids flow in a conduction magnetohydrodynamic pump », *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 17(5) (2016) 252-256.
- [4] C. R. Roman « Study of the electromagnetic pumping systems of molten metals and molten salts », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2014.
- [5] C. Trophime « Modélisation numérique du couplage Magnétohydrodynamique (M.H.D.) fort. Application à la propulsion M.H.D. navale », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 1995.
- [6] M. Tawk, « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique » Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.
- [7] K. Bouali « Contribution a l'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (MHD) », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [8] S. Naceur « Contribution à la modélisation 2d d'un convertisseur magnétohydrodynamique (MHD) à conduction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [9] N. Bennecib, « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [10] N. Bergoug « Contribution à la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [11] F. Z. Kadid, S. Drid, et R. Abdessemed « Simulation of magnetohydrodynamic and thermal coupling in the linear induction MHD pump », *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(1) (2011) 51-57.
- [12] K. N. Knust, D. Hlushkou, U. Tallarek et R. M. Crooks « Electrochemical desalination for a sustainable water future », *ChemElectroChem*, 1(5), (2014) 850-857.
- [13] R. Enciso, J. A. Delgadillo, O. Domínguez, et I. Rodríguez-Torres « Analysis and validation of the hydrodynamics of an electro dialysis cell using computational fluid dynamics », *Desalination*, 408 (2017) 127-132.
- [14] M. Qin et H.H. Bau « Magneto-hydrodynamic flow in electrolyte solutions », *Comsol conference*. 2009.
- [15] K. Oulmi « Etude des mécanismes de dissociation de l'eau dans les membranes échangeuses d'ions », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif, 2015.
- [16] P. mathon « Influence des forces électromagnétiques sur les processus électrochimiques - application à la propulsion MHD », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.

- [17] N. Abdallah « Etude de l'influence des forces magnétiques sur l'hydrodynamique et le transfert de matière en électrochimie », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [18] <https://www.ircwash.org/sites/default/files/71-WHO81-2270.pdf>.
- [19] <https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-saumatres>.
- [20] H. Nafaa, M. Farhat et S. Lassaad « Mathematical modeling of photovoltaic desalination by electro dialysis », IEEE (Conference Paper), (2017).
- [21] M. Sadrzadeh, A. Kaviani et T. Mohammadi « Mathematical modeling of desalination by electro dialysis », Desalination 206 (2007) 538–546.
- [22] J.M. Ortiz, J.A. Sotoca, E. Exposito, F. Gallud, V. Garcia-Garcia, V. Montiel et A. Aldaz « Brackish water desalination by electro dialysis: batch recirculation operation modeling », Journal of Membrane Science 252 (2005) 65–75.
- [23] K. M. Chehayeb, D. M. Farhat, K. G. Nayar et J. H. Lienhard « Optimal design and operation of electro dialysis for brackish-water desalination and for high-salinity brine concentration », Desalination 420 (2017) 167–182.

Chapitre III

CHAPITRE III: Méthodes numériques et outils de simulation

III.1 Introduction

Les équations aux dérivées partielles qui décrivent de tels phénomènes (électromagnétique, mécanique des fluides, transport ionique, thermique ...) s'obtiennent à partir d'équations fondamentales de la physique et des propriétés des matériaux qui composent les systèmes étudiés. Dans ce travail, la résolution du problème global devient très complexe à cause des interactions entre différents phénomènes apparaissant au sein d'électrolyte à dessaler. Le but de ce chapitre est en premier lieu d'introduire les différentes méthodes de discrétisation des équations aux dérivées partielles (EDP). Dans un deuxième temps, de présenter les algorithmes de couplage des phénomènes physiques et enfin, d'exposer l'outil numérique " COMSOL Multiphysics " adopté pour simuler le couplage multiphysique.

III.2 Différentes méthodes de discrétisation

Les méthodes de discrétisation utilisées pour la résolution des équations mathématiques établies, consistent à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles dans le domaine d'étude, compte tenu des conditions aux limites, à celle d'un système d'équations algébriques dont la solution conduit à la distribution des champs (électromagnétique : potentiel vecteur magnétique, mécanique des fluides : vitesse, pression et transport ionique : concentration ...). Cette approche scientifique permet de passer d'un problème exact continu régi par des équations aux dérivées partielles (EDP) au problème approché discret [1-5].

III.2.1 Méthode des différences finies (MDF):

La méthode des différences finies (MDF), est basée sur la discrétisation du domaine d'étude. Les dérivées sont approximées par les différences résultant dans la représentation algébrique des équations aux dérivées partielles (PDE). Ainsi le problème entraînant les calculs a été transformé en un problème algébrique. L'écriture de cette transformation pour tous les nœuds du maillage conduit à un système algébrique dont la solution permet d'obtenir la distribution de l'inconnu dans le domaine d'étude [1-3]. La figure III.1 représente le principe de discrétisation et les éléments de calcul par la méthode des différences finies.

- **Avantages** : grande simplicité d'écriture et faible coût de calcul.
- **Inconvénients** : limitation à des géométries simples, difficultés de prise en compte des conditions aux limites de type Neumann [3].

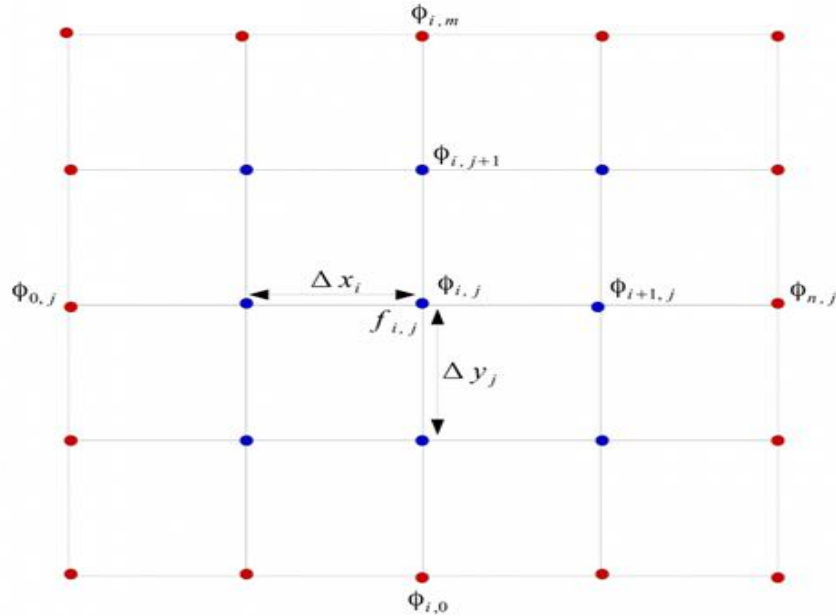


Figure III.1. Discrétisation et éléments de calcul par la méthode des différences finies.

III.2.2 Méthode des volumes finis (MVF) :

La méthode des volumes finis se déduit de la méthode des différences finies pour le fait que le domaine d'étude est subdivisé en volumes élémentaires. Chaque élément contient quatre nœuds de telle manière que chaque volume entoure un nœud du maillage (celui des différences finies) comme le montre la figure III.2. L'équation différentielle est projetée sur une fonction de projection bien déterminée et ensuite intégrée dans chacun des volumes élémentaires. Pour calculer l'intégrale dans le volume élémentaire, la fonction inconnue est représentée à l'aide d'une fonction d'approximation (linéaire, parabolique, puissance, exponentielle,...etc.) entre deux nœuds consécutifs. Ensuite, la forme intégrale est discrétisée dans le domaine d'étude. L'équation discrétisée de cette façon exprime le principe de conservation pour l'inconnu dans l'élément de volume et la solution obtenue est constituée uniquement par les valeurs nodales [1-3].

- **Avantages** : permet de traiter des géométries complexes avec des volumes de forme quelconque, détermination plus naturelle des conditions aux limites de type Neumann [3].

- **Inconvénients** : , contrairement à la MEF, les fonctions pour estimer la solution ne sont pas faciles à réaliser pour un ordre supérieur [6].

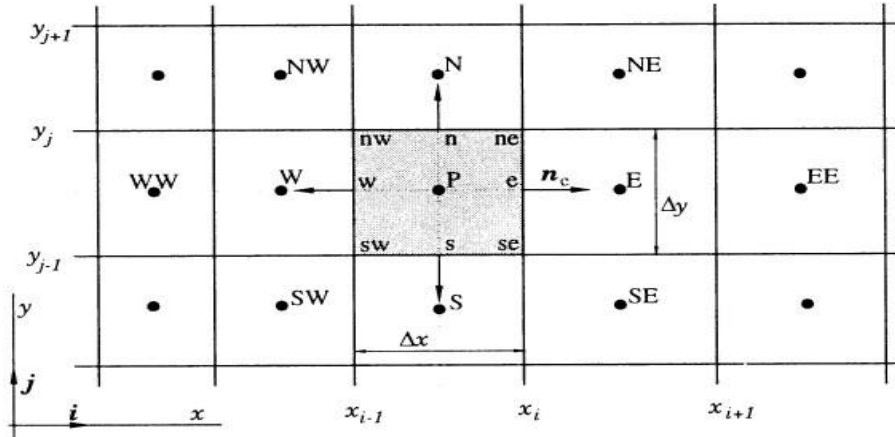


Figure III.2. Discrétisation et éléments de calcul par la méthode des volumes finis.

III.2.3 Méthode des éléments finis (MEF) :

La méthode des éléments finis (MEF) est l’une des méthodes les plus adaptées à la résolution numérique des équations aux dérivées partielles. Elle s’applique à la majorité des problèmes pratiques (linéaires ou non linéaires, stationnaires ou dépendant du temps) définis dans un domaine géométrique complexes et quelques soient les conditions physiques de fonctionnement. La technique des éléments finis discrétise l’espace à l’aide d’éléments géométriques simples (triangles ou quadrangles en général), comme le montre la figure ci-dessous, ensuite la forme forte des équations est remplacée par la forme faible dans laquelle les inconnues sont approximées par une combinaison linéaire de fonctions de base dont le support est l’un des éléments [1-3].

- **Avantages et inconvénients** :

La méthode des éléments finis est très puissante pour la résolution des équations aux dérivées partielles surtout dans des géométries complexes et quelque soient les conditions physiques de fonctionnement. La technique des éléments finis discrétise l’espace à l’aide d’éléments géométriques simples (triangles ou quadrangles en général), ensuite la forme forte des équations est remplacée par la forme faible dans laquelle les inconnues sont approximées par une combinaison linéaire de fonctions de

base dont le support est l'un des éléments. L'inconvénient de cette méthode reste dans la mise en œuvre délicate [3].

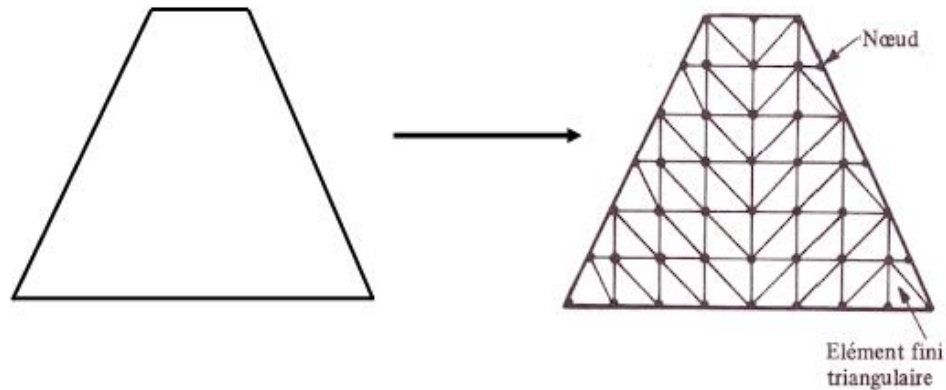


Figure III.3. Discretisation et éléments de calcul par la méthode des éléments finis

III.2.4 Méthode des intégrales de frontières (MIF) :

La méthode des intégrales de frontières (MIF) consiste en la recherche des variables nodales inconnues sur les frontières du domaine. Une fois la distribution de l'inconnue et de ses dérivées connues sur les frontières du domaine physique, le calcul pour les points intérieurs devient possible par une simple intégration numérique. La formulation intégrale traduit le comportement de l'inconnue sur les frontières en fonction de ses dérivées et de la fonction de Green. L'inconvénient de cette méthode est le fait que les matrices obtenues sont plus pleines que celles obtenues par la méthode des éléments finis, de plus son implémentation est complexe et couteuse en temps de calcul [1-3].

III.2.5 Méthodes sans maillage (MSM) :

Une nouvelle technique qui est prometteuse, ce sont les méthodes sans maillage qui ont tout d'abord été développées pour palier les difficultés des méthodes éléments finis, volumes finis et différences finies à traiter les problèmes contenant des discontinuités (si celles-ci ne sont pas situées sur les lignes du maillage) [2].

La première définition qui vient à l'esprit en lisant la dénomination des méthodes "sans maillage" est : "Une méthode sans maillage est une méthode qui n'emploie aucun maillage pour la résolution d'un

problème physique". Bien que cette définition semble la plus adaptée à l'appellation "sans maillage", cette dernière n'est pas compatible avec beaucoup de méthodes qui sont généralement considérées comme des méthodes "sans maillage". On trouve dans la littérature une définition plus générale basée sur le concept des fonctions de forme ou fonctions d'interpolation: "*Une méthode sans maillage est une méthode où la fonction de forme employée dépend des positions des nœuds seulement*"[7].

Ces méthodes nécessitent des remaillages périodiques si les lignes de discontinuité sont mobiles, d'où une certaine lourdeur, ainsi que des difficultés de gestion de programme. L'objectif des méthodes sans maillage est d'éliminer le maillage lors de ces calculs [2, 7].

III.2.6 Synthèse :

Le développement des méthodes numériques (différences finies, volumes finis, éléments finis, intégrales de frontière, etc.) est heureusement accompagné par les avancées du matériel informatique. Des programmes qui nécessitaient autrefois des calculateurs complexes et onéreux tournent à présent sur les PC d'un coût modeste. Cela a contribué à faciliter la mise au point de logiciels. Dans ce travail, la résolution du problème global étant très complexe à cause des interactions entre différents phénomènes apparaissant au sein d'électrolyte aqueux à dessaler, une tentation a été prise pour une utilisation de logiciel COMSOL Multiphysics utilisant la méthode des éléments finis pour résoudre les équations aux dérivées partielles. Ce logiciel est conçu à partir de zéro pour être capable de multiphysique afin que l'utilisateur puisse facilement combiner des modèles représentant différents phénomènes physiques de la manière qu'il souhaite. Parfois, cela peut être réalisé simplement en utilisant les fonctionnalités intégrées du logiciel, mais dans d'autres cas, l'utilisateur devra modéliser et intégrer son programme dans le logiciel de base [8].

III.3 Algorithmes de couplage des phénomènes physiques

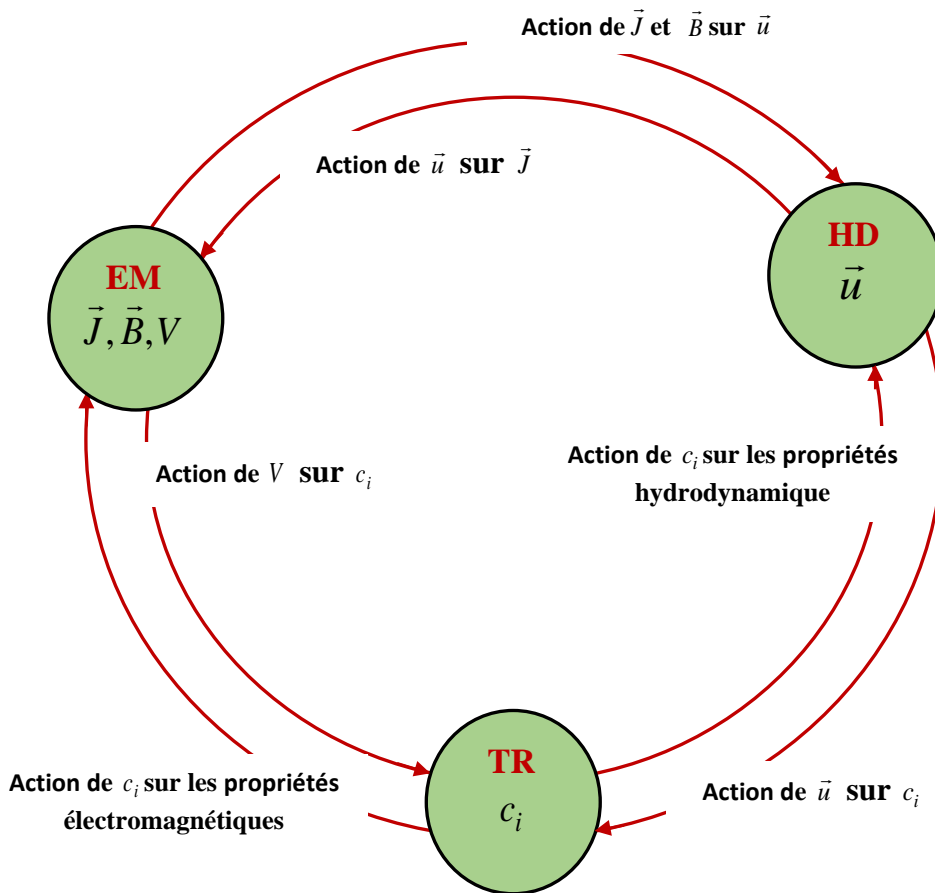
III.3.1 Rôle du couplage

Le type de couplage entre deux phénomènes peut être qualifié de « fort » ou « faible ». Couplage fort : il existe une influence significative des deux phénomènes l'un sur l'autre. Couplage faible : seul un phénomène influence d'une façon significative l'autre phénomène. Notons que sur notre travail les trois phénomènes électromagnétique, hydrodynamique et transport ionique sont intimement liés et la variation

de l'un des trois influence sur les deux autres. On dit alors qu'il y a couplage fort entre les trois phénomènes [9,10].

En présence d'un champ magnétique, l'électrolyte aqueux à dessaler par un système électrodialyse est le siège des phénomènes de natures diverses : électrique, magnétique, hydrodynamique et transport ionique (voir la Figure III.4) [11-14]. Les interactions entre les différents aspects physiques interviennent à deux niveaux:

- Au niveau des termes sources
- Au niveau des propriétés physiques des matériaux [2-5]



EM : Aspect électromagnétique HD : Aspect hydrodynamique TR : Aspect de transport ionique

Figure III.4. Couplage entre les différents aspects du problème

III.3.2. Couplage Electromagnétique – Hydrodynamique

A partir de la résolution des équations électromagnétiques, on détermine la densité de courant induit et à partir la résolution des équations hydrodynamique, on détermine la vitesse d'écoulement. Les deux systèmes d'équations électromagnétique et hydrodynamique ne sont pas indépendants, ils sont liés par les forces magnétohydrodynamiques agissant sur les fluides et les densités de courant liées au champ de vitesse par la loi d'Ohm. Donc les équations caractérisant l'évolution temporelle-spatiale des phénomènes magnétohydrodynamiques nécessitent un modèle couplé. Les étapes de couplage électromagnétique - hydrodynamique se présentent sous la forme suivante :

- Un profil de conditions initial et conditions aux limites sont données;
- Le potentiel vecteur magnétique et l'induction magnétique sont calculés dans le domaine électromagnétique après la résolution par la méthode des éléments finis;
- Le calcul des courants induits et les forces électromagnétique dans la cellule;
- Les forces sont interpolées sur le maillage de la partie fluide à travers les équations de Navier stokes en tant que source de forces volumiques;
- Le calcul de la vitesse par la résolution des équations de Navier Stokes;
- La convergence de la vitesse est satisfaite, aller à l'étape suivante;
- Calcul des courants induits par la loi d'Ohm, aller à l'étape suivante [2-4].

III.3.3. Couplage Electromagnétique – Transport ionique

La principale variable à déterminer lors de la modélisation concernant le transport ionique, est la concentration molaire (c_i).

A première vue, la variation de concentration est obtenue après la résolution de l'équation (éq. II.37) qui exprime la variation spatio-temporelle de transport des espèces présentes dans le fluide :

Dans cette équation, la concentration ionique (c_i) est liée au potentiel électrique (V) via le flux de migration (\vec{N}_i^{mig}) et la conductivité électrique est à son tour une fonction de cette concentration :

$$\sigma = \sum_i \lambda_i \times c_i \quad (\text{III-1})$$

La quantité λ_i signifie la conductivité molaire de l'espèce (i).

Donc les équations caractérisant l'évolution spatiale temporelle des phénomènes électromagnétiques et transport ionique ne peuvent être résolues séparément, et nécessitent absolument un traitement par un modèle mathématique numérique couplé. L'algorithme de simulation consiste donc à effectuer les étapes de calculs suivantes:

- à partir de la concentration donnée (initiale), déterminer la conductivité électrique de chaque élément;
- Résolution de l'équation électromagnétique par la méthode des éléments finis;
- Résoudre l'équation de transport ionique avec un pas approprié et enregistrer la solution correspondant à un intervalle choisi à priori. En utilisant le potentiel électrique résultant de la résolution de l'équation électromagnétique;
- Mettre à jour la distribution de la concentration;
- La convergence de la concentration est satisfaite, aller à l'étape suivante [13-14].

III.3.4. Couplage Hydrodynamique – Transport ionique

D'après l'équation de variation spatio-temporelle de transport des espèces présentes dans le fluide, la concentration ionique (c_i) est liée au champ de vitesse (\vec{u}) via le flux de convection (\vec{N}_i^{conv}). Ajoutant que la densité volumique répond à la loi de variation de la concentration des espèces présentes dans la solution qui suit :

$$\rho_m = \sum_i M_i \times c_i \quad (\text{III-2})$$

La quantité M_i est la masse molaire de l'espèce (i).

Donc les deux systèmes d'équations hydrodynamique et transport ionique ne sont pas indépendants et ne peuvent être résolues séparément. Les étapes de couplage électromagnétique - hydrodynamique se présentent sous la forme suivante :

- à partir de la concentration donnée (initiale), déterminer la densité volumique de chaque élément;
- Résolution de l'équation hydrodynamique par la méthode des éléments finis;

- Résoudre l'équation de transport ionique avec un pas approprié et enregistrer la solution correspondant à un intervalle choisi à priori. En utilisant les vitesses obtenues après la résolution de l'équation hydrodynamique;
- Mettre à jour la distribution de la concentration;
- La convergence de la concentration est satisfaite, aller à l'étape suivante [13-14].

III.4 Outil de simulation numérique

Les couplages multiphysiques peuvent être réalisés à partir de différents logiciels spécialisés. Récemment, on a vu apparaître sur le marché des logiciels dédiés aux couplages multiphysiques, on peut citer : ANSYS, COMSOL, ANSOFT, FLOMERICS et PHYSICA entre autres. Dans le cadre de cette thèse, le logiciel choisi est COMSOL Multiphysics pour réaliser la simulation du couplage magnétohydrodynamique – transport ionique. Ce logiciel est facile à prendre en main et rapide pour réaliser des modèles simples. Il est possible de réaliser sur le même outil des modèles dans différents domaines couplés. De plus il comporte tous les éléments de base utiles dans les étapes de traitement et de résolution numérique [15].

III.4.1 Contexte

Le logiciel COMSOL Multiphysics et la société correspondante ont été créés en 1986 par des étudiants de Germund Dahlquist, dans la suite de son cours consacré à la simulation numérique à l'Institut royal de technologie (KTH)¹ à Stockholm en Suède. La première version de COMSOL Multiphysics est sortie en 1998. La version initiale (avant 2005) de COMSOL Multiphysics s'appelait FEMLAB [16].

Ce logiciel est un outil de simulation incluant toutes les étapes du processus de modélisation - définition des géométries, propriétés matériaux et physiques décrivant les phénomènes spécifiques jusqu'à la résolution et au post-traitement de modèles pour obtenir des résultats précis et fiables. Vous pouvez compléter COMSOL Multiphysics avec des modules additionnels. Des produits d'interface permettent d'intégrer la simulation aux autres logiciels d'ingénierie et de mathématiques utilisés en conception de produits et de procédés. Les modèles développés sont convertibles en application de simulation avec une interface utilisateur dédiée.

Dans le but de construire un modèle sous COMSOL Multiphysics, les étapes suivantes sont suivies :

- Choix de la dimension: 1D, 2D, 3D;
- Choix des modules physique : (Electromagnétique, Hydrodynamique, transport ionique et Transfert de chaleur...);
- Choix du type d'étude: Stationnaire, temporelle et fréquentielle;
- Construction de la géométrie et paramétrage des modules physiques (propriétés des matériaux et conditions aux limites);
- Choix du maillage, du solveur et gestion de résolution;
- Exécution et visualisation des résultats [6, 15].

III.4.2 Construction d'un couplage MHD –Transport ionique dans COMSOL

La modélisation des phénomènes apparaissant au sein du système est intrinsèquement un problème multiphysique : il faut résoudre numériquement le couplage entre la conduction électrique, la magnétostatique, l'écoulement du fluide et le transport ionique [16-19]. Ces différents champs sont tous décrits par des équations aux dérivées partielles, qui peuvent être résolues via la méthode des éléments finis. Les différentes équations résolues par le logiciel sont [17-21]:

1- Milieu Conducteur DC

$$-\nabla \cdot (\sigma \nabla V - J_{ex}) = 0 \quad (\text{III-3})$$

2- Magnétostatique, Aucun courant

$$\mu_0 \mu_r \nabla V_m = 0 \quad (\text{III-4})$$

Avec : V_m signifie le potentiel magnétique scalaire

Les deux équations (III-3) et (III-4) interprètent le comportement électromagnétique du problème à traiter dans ce travail.

3- Navier-Stokes Laminaire

COMSOL Multiphysics utilise une version généralisée des équations de Navier-Stokes pour permettre une viscosité variable.

$$\rho_m \frac{\partial u}{\partial t} + \rho_m (u \cdot \nabla) u = \nabla \cdot \left[-PI + \eta (\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F \quad (\text{III-5})$$

4- Ecoulement Electro-cinétique

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \nabla \cdot (-D_i \nabla c_i - z_i u_{mi} F_f c_i \nabla V) = -u \cdot \nabla c_i \quad (\text{III-6})$$

Les différentes propriétés imposées par le logiciel COMSOL Multiphysics sont présentées dans le tableau suivant [22-24]:

Milieu Conducteur DC		
Densité de courant externe	J_{ex}	A/m^2
Conductivité électrique	σ	S/m
Magnétostatique, Aucun courant		
Permeabilité magnétique relative	μ_r	-
Induction rémanent	B_r	T
Navier-Stokes Laminaire		
Densité	ρ_m	Kg/m^3
Viscosité dynamique	η	Pa/s
Force de volume, x-dir.	F_x	N/m^3
Force de volume, y-dir.	F_y	N/m^3
Force de volume, z-dir.	F_z	N/m^3
Ecoulement Electro-cinétique		
Coefficient de diffusion	D_i	m^2/s
Mobilité	u_{mi}	$s.mol/Kg$
Nombre de charge	z_i	-
Vitesse selon x	u_x	m/s
Vitesse selon y	u_y	m/s
Vitesse selon z	u_z	m/s
Potentiel	V	V

Tableau III.1 Différentes propriétés imposées par le COMSOL Multiphysics

Nous avons mentionné plus tôt que les termes de couplage entre les différents aspects interviennent à deux niveaux: au niveau du terme source et au niveau des propriétés physiques des matériaux. Les expressions de ces termes ne sont pas intégrées au logiciel COMSOL Multiphysics, nous devons donc insérer les formules mathématiques des différents composants constituant ses termes en tenant compte de toutes les conditions aux limites appropriées pour résoudre le système d'équations.

III.4.3 Maillages et Sélection des éléments

La méthode des éléments finis commence par subdiviser le domaine de modélisation en domaines plus petits et plus simples appelés éléments. Ces éléments sont définis par un ensemble de points, traditionnellement appelés nœuds, et chaque nœud possède un ensemble de fonctions de forme ou de fonctions de base. Chaque fonction de forme est associée à certains degrés de liberté. L'ensemble de tous ces degrés de liberté discrets est traditionnellement appelé vecteur de solution. Une des spécificités de la modélisation à éléments finis est que plus le nombre d'éléments croît plus les résultats obtenus s'approchent d'une solution réel. Cependant le temps de calcul nécessaire augmente considérablement avec le nombre d'éléments. Le Comsol Multiphysics propose neuf types de maillage de l'extrêmement fin à l'extrêmement grossier [25].

Comme type d'élément par défaut pour la plupart des modes d'application, COMSOL Multiphysics utilise des éléments de Lagrange du second ordre ou des fonctions de forme (éléments prédéfinis : 1- Linéaire 2- Quadratique 3- Cubique 4- Quartique 5- Quintique ...). Ces éléments et d'autres éléments d'ordre supérieur ajoutent des degrés de liberté supplémentaires au milieu et aux nœuds intérieurs des éléments de maillage. Ces degrés de liberté supplémentaires fournissent une solution plus précise mais nécessitent également plus de mémoire en raison de la rareté réduite du système discrétisé [25].

Pour de nombreux domaines d'application, tels que l'analyse des contraintes en mécanique des structures et des solides, la précision accrue d'un élément de second ordre est importante. Dans la modélisation d'écoulement de fluide utilisant les équations incompressibles de Navier-Stokes, une combinaison de types d'éléments utilisant un élément pour les composantes de vitesse d'un ordre supérieur à celui de la pression fournit généralement le meilleur résultat. L'élément par défaut du mode d'application Incompressible Navier-Stokes est l'élément P2-P1 utilisant des éléments du second ordre pour les composantes de vitesse et des éléments linéaires pour la pression. Pour les autres applications, la sélection

d'élément du premier ordre au lieu d'un élément du second ordre, ou la réduction de l'ordre des éléments en général, est adoptée pour réduire l'utilisation de la mémoire [25].

III.4.4 Solveurs et gestionnaire de résolution

III.4.4.1 Solveurs de résolution

Deux classes d'algorithmes utilisés dans le COMSOL Multiphysics pour résoudre des systèmes d'équations linéaires qui surviennent lors de la résolution de tout problème d'éléments finis [25].

- ***Solveurs directs***

Les solveurs directs utilisés par COMSOL sont : UMFPACK, SPOOLES, PARDISO et TAUCS. Ces solveurs arriveront tous à la même réponse pour tous les problèmes d'éléments finis bien conditionnés, ce qui est leur plus grand avantage, et peuvent même résoudre certains problèmes assez mal conditionnés. Du point de vue de la solution, peu importe lequel des solveurs directs que vous choisissez, car ils renvoient à la même solution. Les solveurs directs diffèrent principalement par leur vitesse relative [25,26].

- ***Solveurs itératifs***

Les solveurs itératifs utilisés par COMSOL sont : GMRES, FGMRES, Gradients conjugués, BiCGStab et Géométrie multigrille. Les solveurs itératifs de COMSOL englobent une variété d'approches, mais ils sont tous conceptuellement assez simples à comprendre à leur plus haut niveau, étant essentiellement similaires à une méthode de gradient conjugué. D'autres variantes incluent la méthode du résidu minimum généralisé et la méthode stabilisée par gradient biconjugué, et il existe de nombreuses variantes de celles-ci, mais elles se comportent toutes de la même manière [25,26].

Les solveurs directs utiliseront plus de mémoire que les solveurs itératifs, mais peuvent être plus robustes. Les solveurs itératifs abordent la solution progressivement, plutôt qu'en une seule étape de calcul. Par conséquent, lors de la résolution d'un problème avec une méthode itérative, vous pouvez observer l'estimation d'erreur dans la solution décroît avec le nombre d'itérations [25,26].

Les problèmes non linéaires sont souvent difficiles à résoudre. Dans de nombreux cas, aucune solution unique n'existe. COMSOL Multiphysics utilise une méthode itérative de type Newton pour

résoudre les équations aux dérivées partielles régissant le problème à traiter. Cette méthode de résolution peut être sensible à l'estimation initiale de la solution. Si les conditions initiales sont trop éloignées de la solution souhaitée, la convergence peut être impossible, même si elle peut être simple à partir d'une valeur de départ différente [25].

Lors de l'utilisation d'un solveur dépendant du temps, deux méthodes sont disponibles : la méthode Alha généralisé et la méthode BDF. Il est possible de fixer le pas de temps, ce qui est préférable, ou de laisser le logiciel le piloter automatiquement [25].

III.4.4.2 Gestionnaire de résolution

Dans un modèle multiphysique fortement couplé, le gestionnaire de résolution de COMSOL Multiphysics permet de spécifier le mode de couplage pour résoudre les équations régissant le problème à traiter. Le mode de couplage alterné (MCA) où les équations régissant le système sont résolus séparément fournit un moyen efficace pour résoudre un modèle multiphysique. L'application du mode de couplage direct (MCD) pour résoudre les équations simultanément peut être avantageusement utilisé dans le cas de problème fortement couplés, cependant, le nombre d'itérations est plus important que dans le cas d'utilisation du mode de couplage alterné [25].

III.4.5 Post-traitement et export des résultats

Les fonctionnalités de visualisation comprennent différents types de graphiques dont les tracés de surface, en coupe, en isosurface, en flèche et en ligne de courant. Le logiciel propose également toute une gamme d'outils de post-traitement pour l'évaluation et l'intégration. Les résultats peuvent être exportés dans de multiples formats [25].

III.5 Conclusion

On a présenté dans ce chapitre les différentes méthodes de discrétisation des équations aux dérivées partielles (EDP), les algorithmes de couplage des phénomènes physiques et le logiciel "COMSOL Multiphysics" utilisant la méthode des éléments finis pour résoudre les équations EDP. L'élaboration d'une simulation tridimensionnelle sous COMSOL accompagnée par une exposition de résultats sera l'objet du prochain chapitre.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] K. Chatri « Etude des phénomènes magnétothermiques dans les dispositifs de chauffage par induction par la méthode des éléments finis », thèse de magister de l'université de Batna, 2003.
- [2] N. Bennecib « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [3] N. Bergoug « Contribution à la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [4] S. Naceur « Contribution à la modélisation 2D d'un convertisseur magnétohydrodynamique (MHD) à conduction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [5] K. Bouali « Contribution à l'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (MHD) », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [6] <https://resources.pcb.cadence.com/blog/2020-finite-element-method-fem-vs-finite-volume-method-fvm-in-field-solvers-for-electronics>.
- [7] A. Hamrani « Apports d'approches sans maillage pour la simulation des phénomènes de séparation de la matière: Application aux procédés de mise en forme », thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2016.
- [08]-<https://www.comsol.fr/paper/validation-of-comsol-multiphysics-for-magnetohydrodynamics-mhd-flows-in-fusion-a-50552>.
- [09] Thomas Heuzé « Couplages Multiphysiques », Notes de cours, École d'ingénieur. France. 2020.
- [10] P. Triwong « Modélisation numérique 3D des phénomènes couplés dans les procédés d'élaboration par induction : couplage faible et couplage fort », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [11] Y. Safa « Simulation numérique des phénomènes thermiques et magnétohydrodynamiques dans une cellule de Hall-Héroult », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [12] S. Flotron « Simulations numériques de phénomènes MHD-thermiques avec interface libre dans l'électrolyse de l'aluminium », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2013.
- [13] N. Abdallah « Etude de l'influence des forces magnétiques sur l'hydrodynamique et le transfert de matière en électrochimie », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [14] P. Mathon « Influence des forces électromagnétiques sur les processus électrochimiques. Application à la propulsion MHD », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [15] Thomas Heuzé « Couplages Multiphysiques », Notes de cours, École Centrale de Nantes, 2020.
- [16] https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics.
- [17] M. Qin et H.H. Bau « Magneto-hydrodynamic flow in electrolyte solutions », Comsol conference. 2009.
- [18] M. Tawk, « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique » Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.

- [19] K. Tado, F. Sakai, Y. Sano et A. Nakayama « An analysis on ion transport process in electro dialysis desalination », *Desalination* 378 (2016) 60–66.
- [20] Z. Zourmand, F. Faridirad, N. Kasiri et Toraj Mohammadi « Mass transfer modeling of desalination through an electro dialysis cell », *Desalination* 359 (2015) 41 – 51.
- [21] <https://br.comsol.com/blogs/building-a-magneto hydrodynamic-multiphysics-model-in-comsol/>
- [22] « COMSOL Muliphysics : AC/DC module », Version 3.5, 2008.
- [23] « COMSOL Muliphysics : Navier-Stokes Laminar module », Version 3.5, 2008.
- [24] « COMSOL Muliphysics: Electro-kinetic flow module », Version 3.5, 2008.
- [25] « COMSOL Muliphysics: user’s guide », Version 3.5, 2008.
- [26] B. Stute, W. Joppich, W. Wiechert et E. Lieres « Performance of iterative equation solvers for convection-diffusion-adsorption-problems in threedimensional sphere packings in comsol », *Simul Model Pract Th*, 33 (2013):115-131.

Chapitre IV

CHAPITRE IV: Simulation numérique et discussion

IV.1 Introduction

Après avoir exposé dans les chapitres précédents les différentes étapes pour une modélisation numérique du couplage multi - physique : électromagnétique, hydrodynamique et transport ionique, on va essayer dans ce chapitre de présenter les résultats de simulation du modèle élaboré sous logiciel COMSOL Multiphysics utilisant la méthode des éléments finis pour résoudre les équations aux dérivées partielles. Le travail dans un premier lieu met en évidence le comportement des différentes grandeurs physiques caractérisant le prototype proposé principalement la vitesse d'écoulement et la concentration ionique des espèces présentes dans la solution à traiter. Dans un deuxième temps, les effets des valeurs de tension et d'induction sur la performance du système seront étudiés et explicités. Le travail dans la troisième partie s'oriente vers la performance d'un procédé électrodialyse composé de plusieurs cellules unitaire où la tension d'alimentation et le débit volumétrique seront étudiés afin de rendre l'application proposée réalisable et rentable.

IV.2 Description générale du prototype proposé

Comme nous avons souligné au paragraphe I.5 concernant la conception proposée, elle est composée d'un aimant permanent ajouté à un procédé d'électrodialyse. En conséquence de la combinaison du courant électrique et du champ magnétique, la force de Laplace (MHD) agit sur le fluide dans tous les compartiments.

La simulation est réalisée sur une cellule de $(20 \times 20 \times 5)$ mm de longueur, hauteur et largeur respectivement; elle est composée de trois compartiments consécutifs de $(5 \times 0,5)$ mm respectivement de hauteur et de largeur de chaque compartiment. Lorsqu'une différence de potentiel à courant continu est appliquée aux bornes de la cellule, les cations chargés positivement se déplacent vers la cathode, passent à travers la membrane échangeuse de cations chargée négativement et retenus par la membrane échangeuse d'anions chargée positivement. D'autre part, les anions chargés négativement se déplacent vers l'anode, passent à travers la membrane échangeuse d'anions chargée positivement et retenus par la membrane échangeuse de cations chargée négativement. À la fin, le résultat sera un compartiment dilué entre deux autres concentrés.

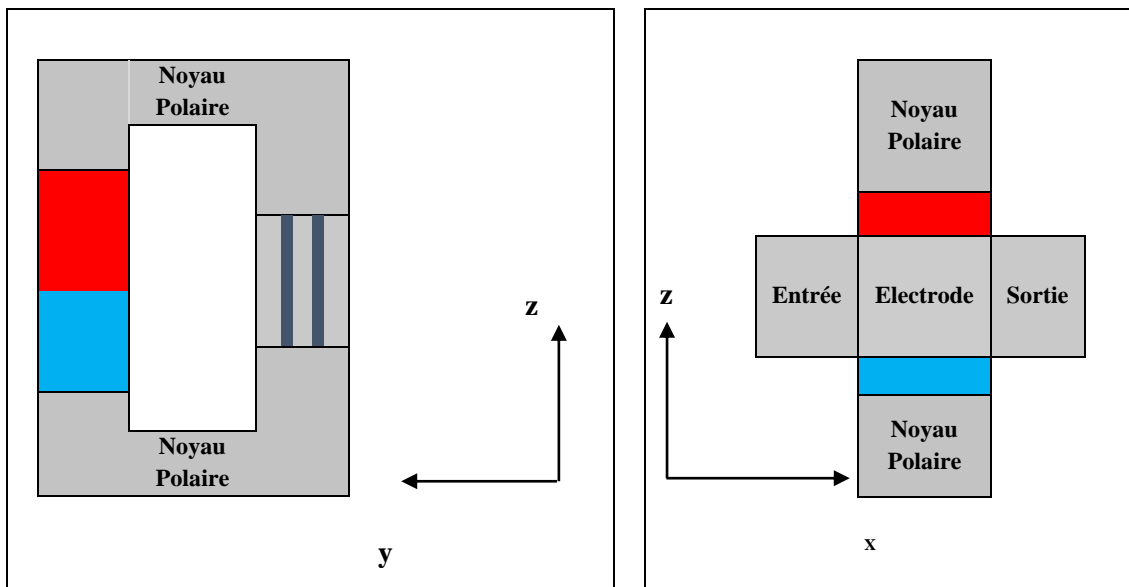
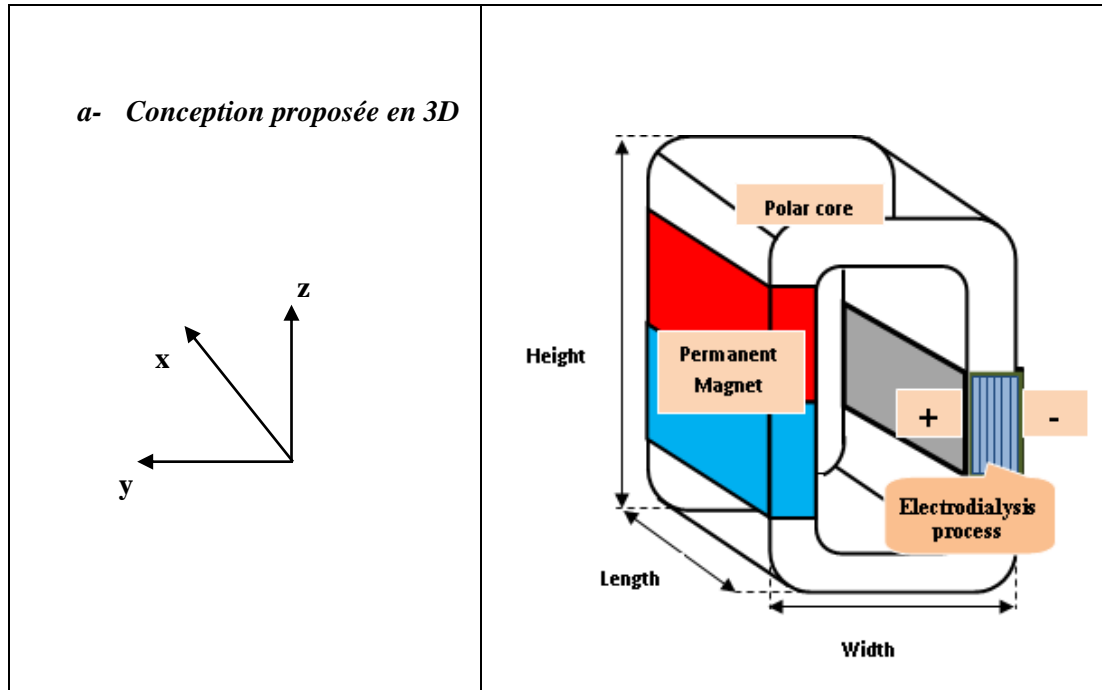


Figure IV.1 Conception de système proposé

Dans un premier temps, nous faisons la simulation par des valeurs préliminaires de tension appliquée et d'induction magnétique ($V_a = 0.2V$ et $B_r = 0.5T$). Pour voir le comportement de la cellule notamment les profils de vitesse d'écoulement et de concentration d'espèces présentes dans la solution. Dans une deuxième étape, nous étudions les effets de la tension appliquée et de l'induction magnétique sur

la vitesse d'écoulement et la concentration ionique. Dans un dernier temps, les résultats obtenus seront utilisés pour étudier la performance d'un module électrodialyse à N_{cb} cellule bi-compartiments.

Dans ce travail, La solution à traiter est considérée comme une solution binaire de NaCl et les propriétés utilisées dans les calculs sont indiquées ci-dessous où les deux indices 1 et 2 signifient Cl^- et Na^+ respectivement.

Paramètre	Valeur
Perméabilité magnétique relative de solution	1
Perméabilité magnétique relative de noyau polaire	5000
Viscosité dynamique	$0.996 \times 10^{-2} Pa.s$
Coefficient de diffusion	$D_1 = 2.03 \times 10^{-9} m^2 / s$ $D_2 = 1.33 \times 10^{-9} m^2 / s$
mobilité ionique	$u_{m1} = 8.193506 \times 10^{-9} s.mol / Kg$ $u_{m2} = 5.368159 \times 10^{-9} s.mol / Kg$
Conductivité molaire	$\lambda_1 = 7.63 \times 10^{-3} S.m^2 / mol$ $\lambda_2 = 5.01 \times 10^{-3} S.m^2 / mol$
masse molaire	$M_1 = 35.5 g / mol$ $M_2 = 23 g / mol$
Densité volumique de l'eau pure	$\rho_0 = 998 Kg / m^3$

Tableau IV.1 Différentes valeurs des propriétés de système [1-4].

IV.3 Conditions aux limites et conditions d'interfaces :

Tenant compte de toutes les conditions aux limites et d'interfaces appropriées pour résoudre le système d'équations. Ces conditions s'écrivent :

1- Électromagnétique [5-10] :

- L'espace environnant de la cellule est représenté par une boîte d'air magnétiquement isolée par rapport l'espace externe.
- Aux bornes de la cellule, le potentiel électrique prend les valeurs imposées par une source de courant continue ($+V$ et $-V$).

2- Hydrodynamique [6-10] :

- La vitesse d'écoulement vérifie les conditions de non-glissement aux parois des compartiments.
- La différence de pression entre l'entrée et la sortie de la cellule est supposée nulle.

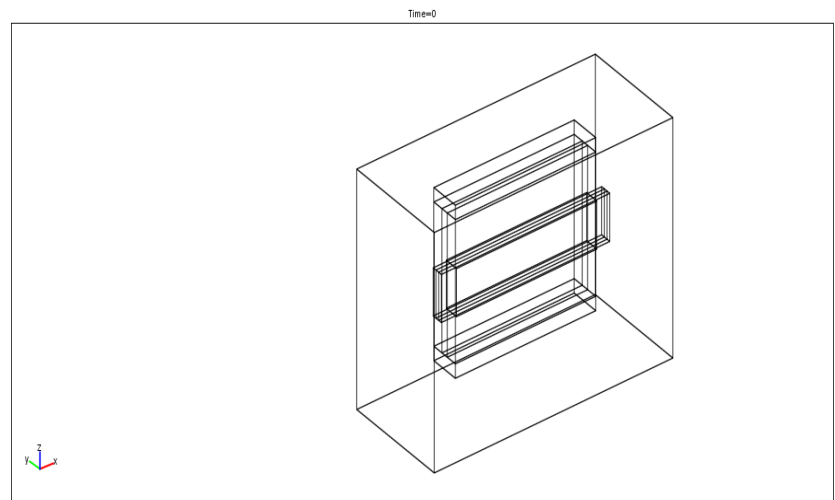
3- Transport ionique [1-3, 11-14] :

- Aux entrées des compartiments, la concentration de Cl^- et de Na^+ est uniforme et spécifiée ($c_0 = 500 \text{ mol} / \text{m}^3$) et le flux des ions c'est le flux d'écoulement résultant de l'application de la force de Laplace lui-même.
- Dans les compartiments dilué et concentré, au niveau de la membrane sélective anionique, le flux d'ions positifs est nul, et au niveau de la membrane sélective cationique, le flux d'ions négatifs est nul.

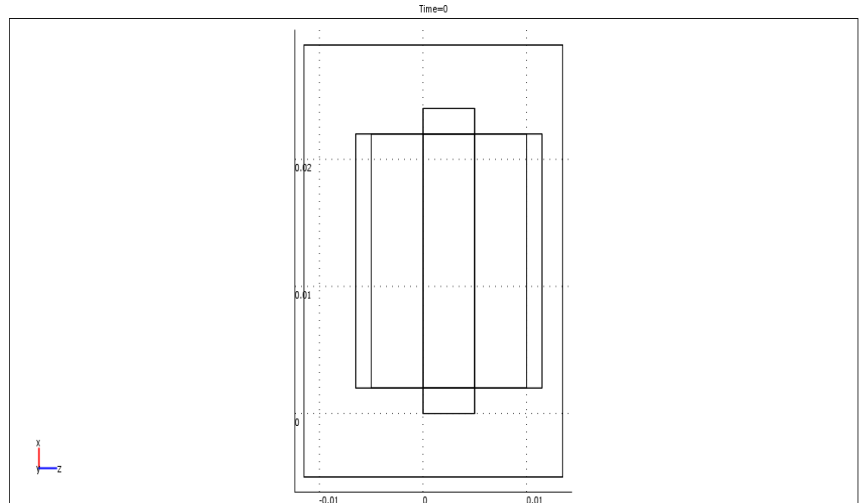
Les solveurs directs utiliseront plus de mémoire que les solveurs itératifs, mais peuvent être plus robustes [15]. Dans notre travail, la résolution numérique des systèmes matriciels résultants des calculs électromagnétiques, hydrodynamiques et transport ionique est effectuée par un solveur direct : SPOOLES (SParse Object Oriented Linear Equations Solver) et le couplage multiphysique est assuré par un mode de couplage direct (MCD) où les équations régissant les différents aspects physiques seront résolues simultanément, cela sera très avantageusement surtout pour les couplages forts [15].

IV.4 Implémentation sous COMSOL Multiphysics

a- Prototype en 3D



b- Prototype en 2D
Plan (xz)



c- Prototype en 2D
Plan (yz)

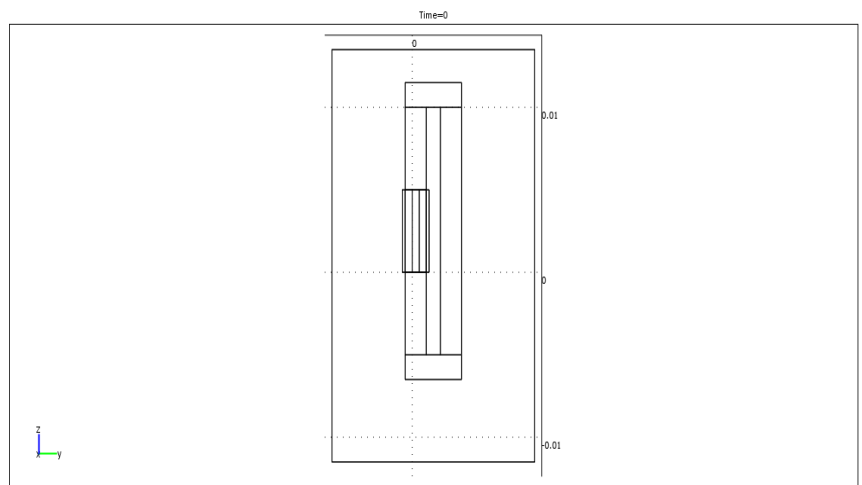


Figure IV.2 Prototype implémenté sous COMSOL Multiphysics

IV.5 Résultats de simulation et interprétation

IV.5.1 Représentation des grandeurs magnétiques

Les figures IV.3 et IV.4 montrent respectivement la distribution du potentiel vecteur et de la densité de flux magnétiques. Nous pouvons voir que le champ magnétique est créé par l'aimant dans le sens de l'axe z positif et rebouclé par le noyau polaire, la cellule d'électrodialyse devient soumise à un champ magnétique dans le sens des z négatifs.

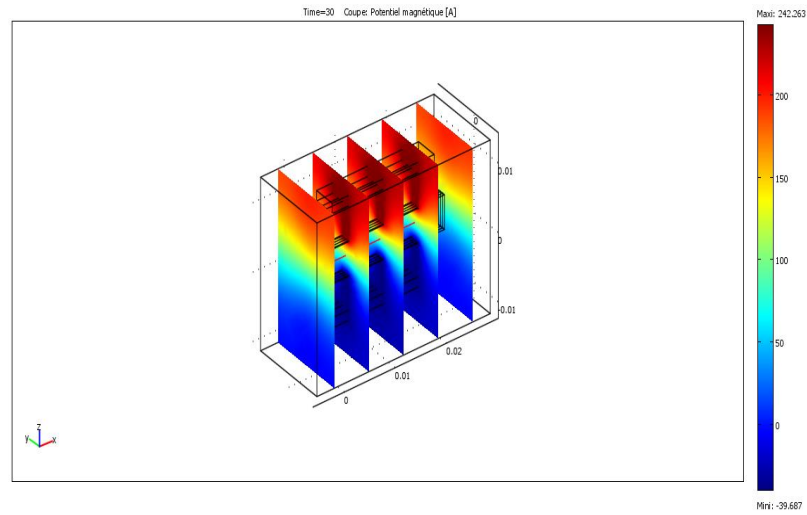


Figure IV.3 Distribution du potentiel vecteur magnétique

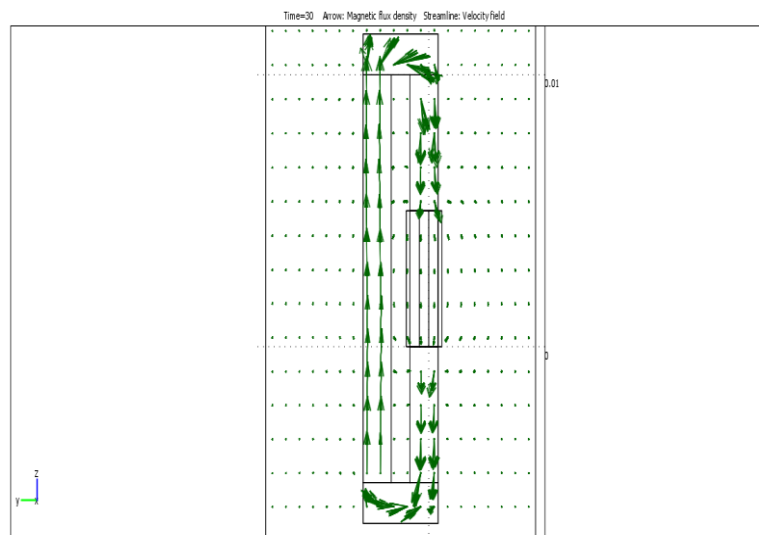


Figure IV.4 Distribution de densité de flux magnétique

IV.5.2 Représentation des grandeurs électriques

Les figures IV.5 et IV.6 représentent respectivement la distribution du potentiel et de la densité de courant induit. La densité de courant est créée sur la partie active (c'est-à-dire dans la solution à traiter sous le champ magnétique) dans le sens des y négatifs.

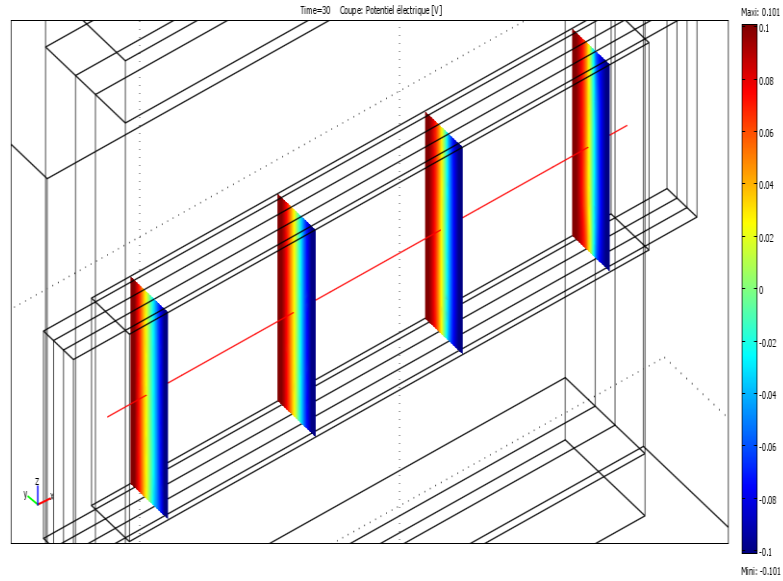


Figure IV.5 Distribution du potentiel électrique

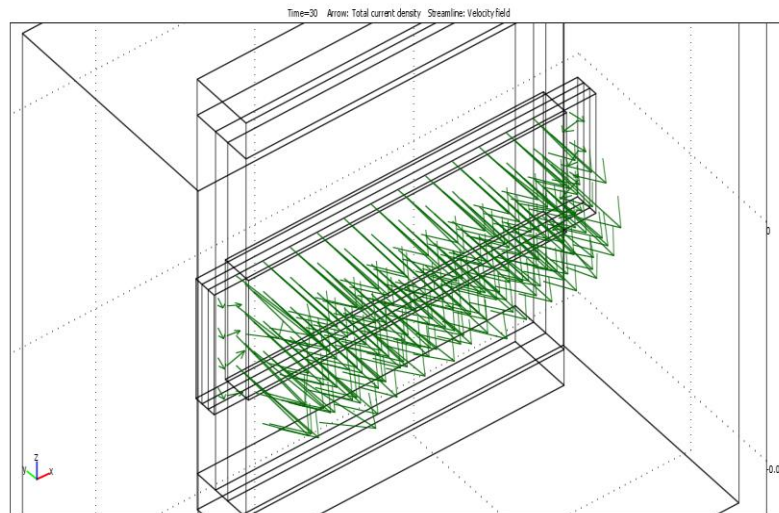


Figure IV.6 Distribution de la densité de courant induit

IV.5.3 Profil et évolution de la vitesse d'écoulement

Sous l'influence des lignes de champ magnétique canalisées par le noyau polaire, la cellule d'électrodialyse devient soumise à un champ magnétique, son interaction avec le courant induit crée la force de Laplace qui met le fluide en mouvement dans le sens des x positifs. Le champ de vitesse d'écoulement est indiqué dans la figure IV.7.

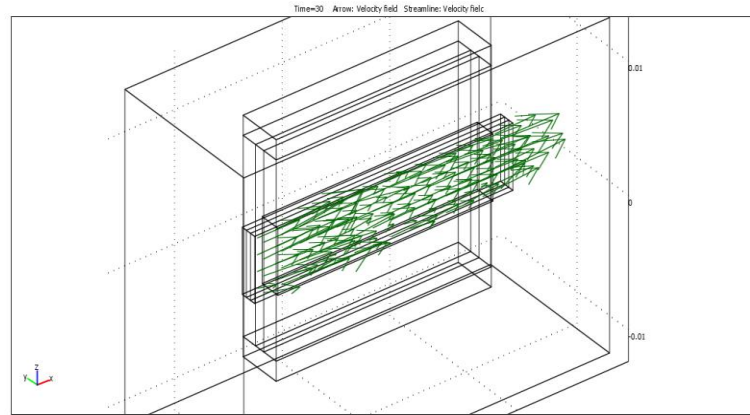


Figure IV.7 Champ de vitesse d'écoulement

La figure IV.8 montre le profil de vitesse d'écoulement à la sortie de la cellule à l'instant ($t = 30$ s), ce profil est parabolique; les valeurs maximales de cette vitesse sont situées au centre des compartiments. Ces valeurs diminuent progressivement pour prendre des valeurs minimales sur les parois des compartiments.

Dans la sortie du compartiment dilué; la visualisation de l'évolution temporelle de la vitesse est représentée sur la figure IV.9; on note que cette vitesse passe par un état transitoire puis se stabilise à une valeur de: $u = 1.5\text{mm/s}$.

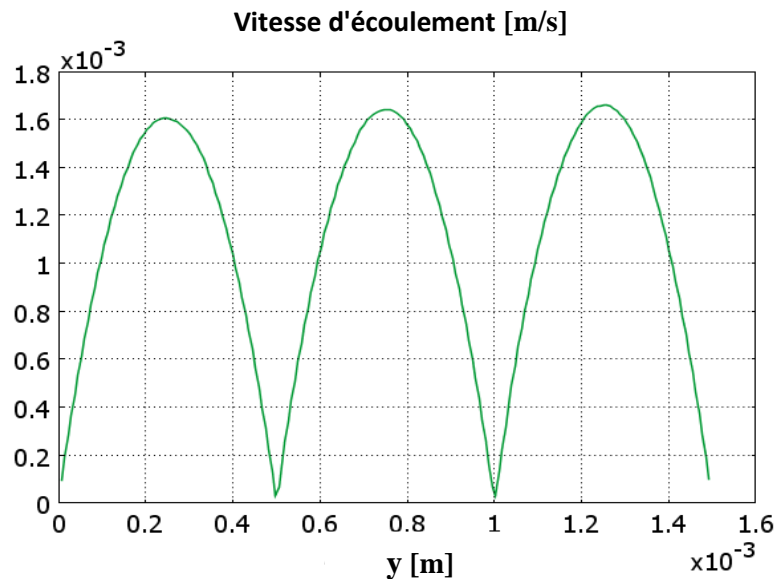


Figure IV.8 Profil de vitesse d'écoulement au centre de la cellule

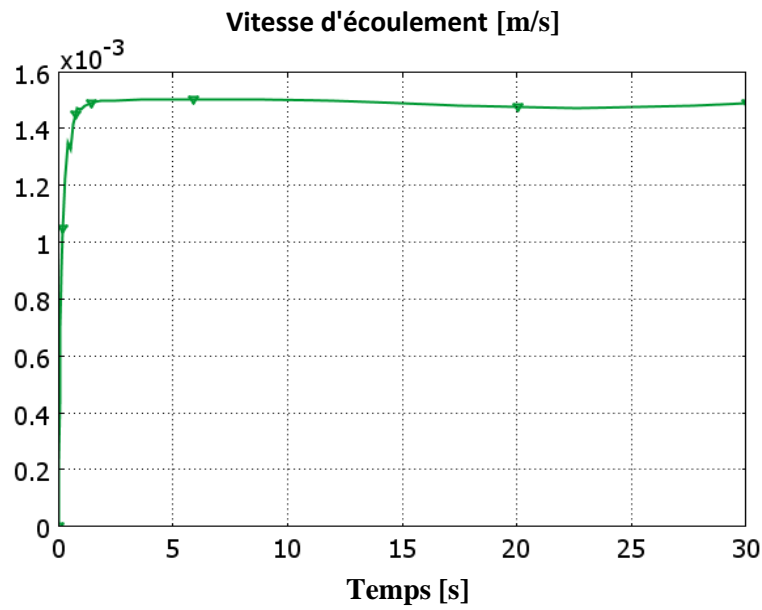


Figure IV.9 Évolution de la vitesse du fluide dilué à la sortie

IV.5.4 Profil et évolution de la concentration des espèces

La distribution des ions au niveau de la cellule est présentée sur les figures IV.10 et IV.11. Ces figures montrent que les concentrations ioniques aux entrées des compartiments sont égales comme supposé alors que ces valeurs commencent à diminuer à la sortie. La solution devient moins concentrée «compartiment dilué» dans le compartiment central et plus concentrée «compartiments concentrés» dans les compartiments adjacents.

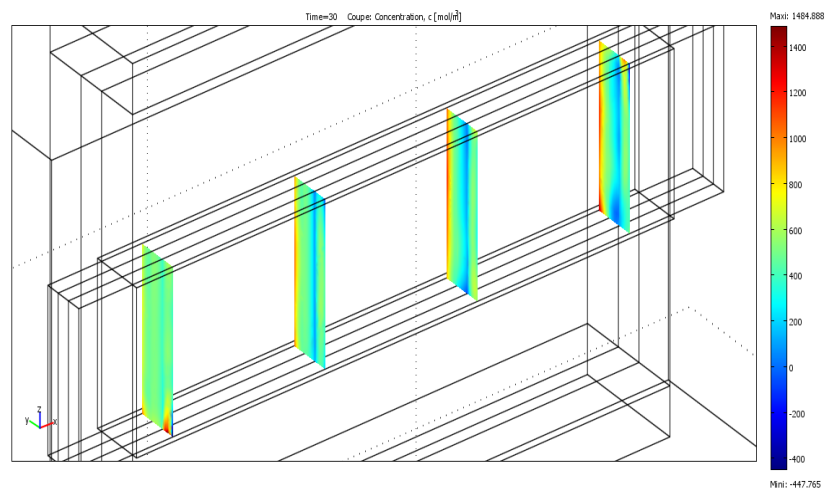


Figure IV.10 Distribution ionique du Cl^-

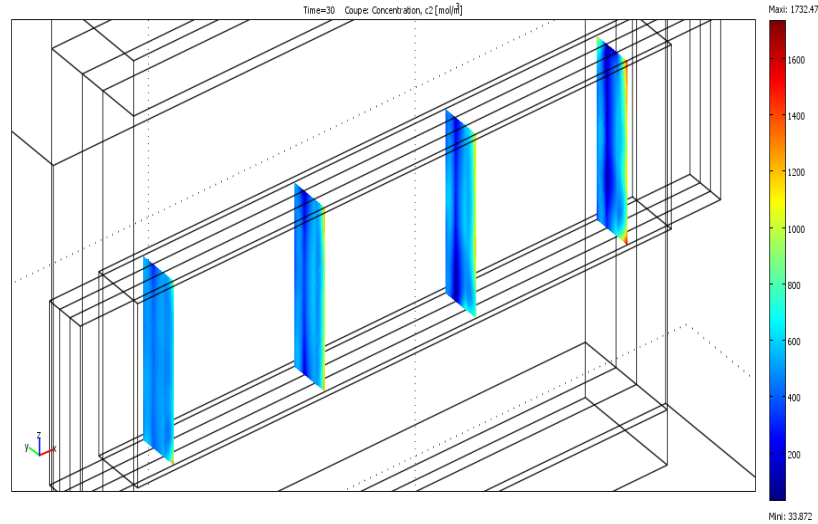


Figure IV.11 Distribution ionique du Na^+

Sur les figures IV.12 et IV.13, la concentration ionique et la conductivité électrique le long du compartiment dilué à ($t = 30$ s) sont présentées respectivement. Les profils de concentration des espèces présentes dans la solution montrent que les valeurs de concentration sont maximales et à peu près égales à la concentration initiale ($c_0 = 500 \text{ mol/m}^3$) à l'entrée des compartiments puis elles diminuent progressivement jusqu'à des valeurs minimales à la sortie. Ce processus peut réduire la concentration ionique de 60 % pour Cl^- et 50 % pour Na^+ . C'est précisément ce que traduit la diminution progressive de la conductivité électrique qui tire sa valeur des ions présents dans la solution.

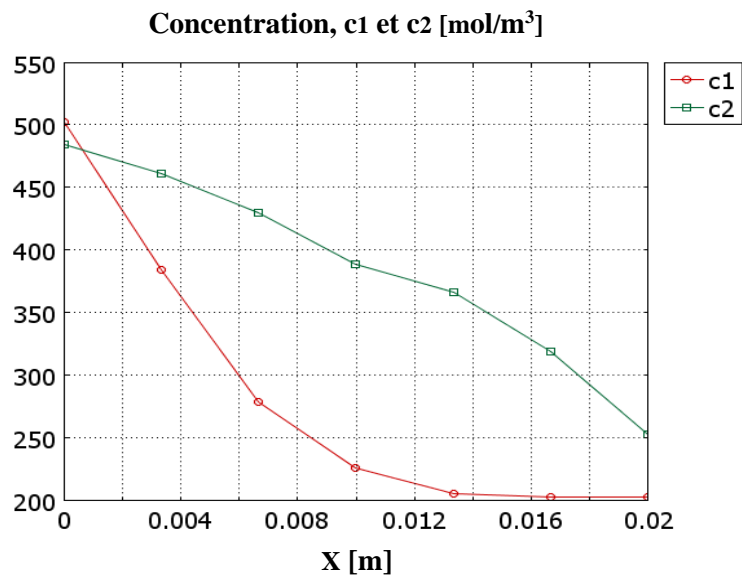


Figure IV.12 Concentration ionique le long du compartiment dilué

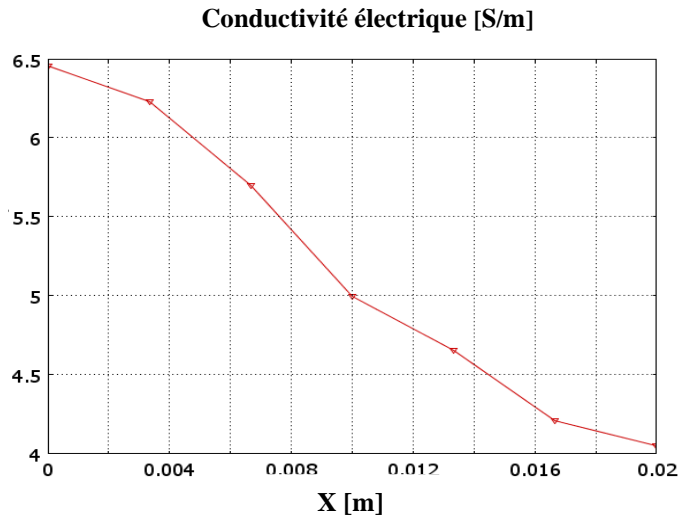


Figure IV.13 Conductivité électrique le long du compartiment dilué

Les profils horizontaux des concentrations d'espèces présentes dans la solution à l'entrée, au milieu et à la sortie du compartiment dilué sont représentés sur les Figure IV.14 et IV.15 à (t = 30s). Dans ce dernier cas, on observe que la concentration de Cl^- (c_1) est minimale ($c_1 = 150 mol/m^3$) sur la paroi gauche (CEM); cette valeur augmente progressivement pour atteindre une valeur maximale ($c_1 = 425 mol/m^3$) sur la paroi droite (AEM), alors que l'on constate que la concentration de Na^+ (c_2) est minimale ($c_2 = 175 mol/m^3$) sur la paroi droite (AEM) puis elle augmente progressivement jusqu'à une valeur maximale ($c_2 = 465 mol/m^3$) sur la paroi gauche (MEC). Il est clair que les valeurs moyennes de ces concentrations sont inférieures à la concentration initiale ($c_0 = 500 mol/m^3$).

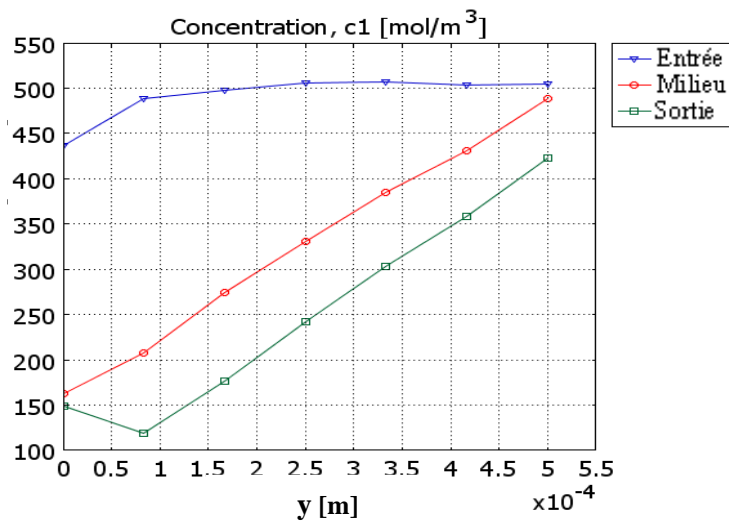


Figure IV.14 Profil horizontal de concentration de Cl^- au niveau du compartiment dilué

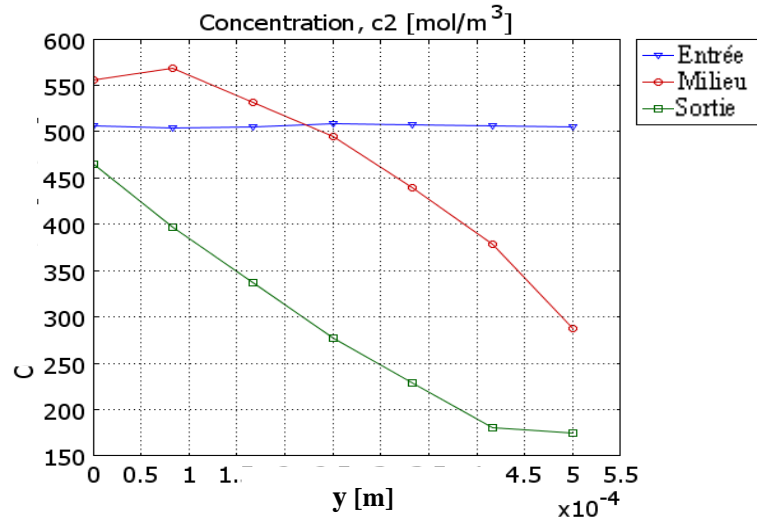


Figure IV.15 Profil horizontal de concentration de Na^+ au niveau du compartiment dilué

IV.5.5 Effet de l'induction et de la tension appliquée sur la performance de cellule

Les résultats obtenus dans le paragraphe précédent indiquent que les principaux paramètres de notre modèle sont capables de diminuer la concentration ionique selon la théorie mais leurs valeurs finales sont encore élevées. Pour aller plus loin, nous avons étudié l'influence des variations de tension et d'induction appliquées sur la performance du système proposé. Au début, la simulation a été répétée plusieurs fois dans laquelle la tension appliquée a été variée de 0V à 3V et l'induction a augmenté de 0,15 T à 0,45 T; une deuxième étape, en utilisant l'outil informatique MATLAB pour tracer l'évolution de la vitesse et de la concentration en fonction de la tension appliquée.

D'après les résultats obtenus, il a été constaté qu'il y avait une nette amélioration à la fois de la vitesse d'écoulement et surtout de la réduction de la concentration de la solution qui diminuait à 0,57 g / L avec une vitesse de 3,75 mm / s pour une induction de 0,15 T et une tension appliquée de 3V comme indiqué sur les figures IV.16, IV.17 et le tableau IV.1.

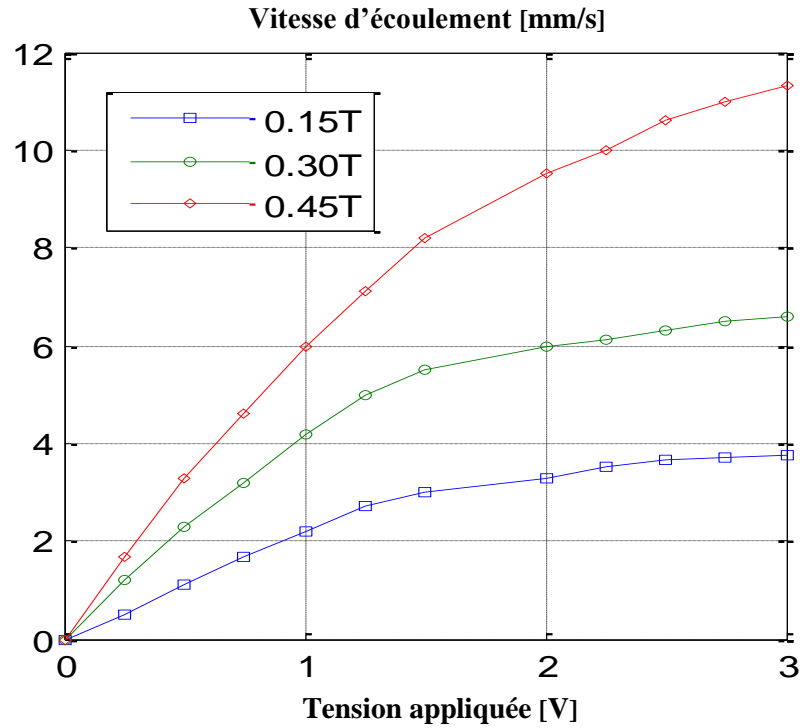


Figure IV.16 Effet de la tension appliquée et de l'induction sur la vitesse d'écoulement

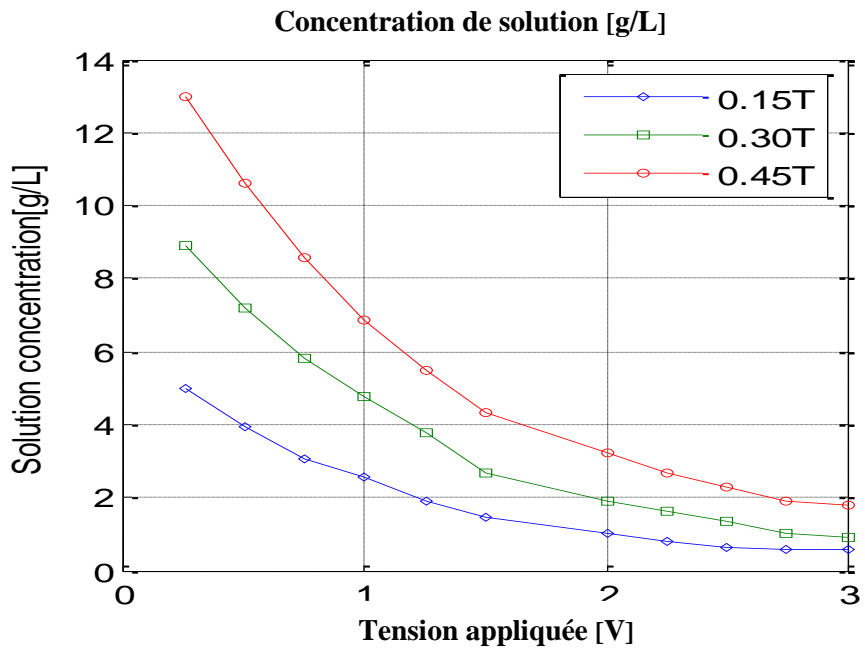


Figure IV.17 Effet de la tension appliquée et de l'induction sur la concentration de la solution

Induction [T]	Tension [V]	Vitesse [mm/s]	Concentration [g / L]
0.15	1	2.20	2.57
	2	3.30	1.00
	3	3.75	0.57
0.30	1	4.20	4.79
	2	6.00	1.90
	3	6.60	0.90
0.45	1	6.00	6.84
	2	9.50	3.20
	3	11.3	1.78

Tableau IV.1. Effet de la tension appliquée et de l'induction sur la vitesse et la concentration de la solution

La vitesse a tendance à augmenter de proportionnalité avec le champ magnétique et la tension appliquée en raison d'une augmentation de la force de Laplace. En ce qui concerne la concentration, la simulation montre que les meilleurs résultats sont obtenus pour des tensions appliquées plus élevées pour tout champ magnétique donné.

II.5.6 Performance d'un procédé composé de N_{cb} cellules bi-compartiments

Dans ce dernier paragraphe les résultats obtenus dans la section précédente seront utilisés pour étudier la performance d'un module électrodialyse à N_{cb} cellule bi-compartiments où la tension d'alimentation et le débit volumétrique seront calculés et explicités afin de rendre l'application proposée réalisable et rentable. Pour calculer la tension d'alimentation et le débit volumétrique nous suivons les étapes suivantes [16-19]:

- **Calcul de la tension d'alimentation**

- 1- Calcul de la valeur moyenne de la conductivité électrique (σ_{moy}) pour chacun des compartiments dilue et concentré accompagné par le calcul des résistances électriques équivalentes (R_d et R_c), en utilisant l'expression :

$$R_i = \frac{\Delta}{L \times W \times \sigma_{moy}} \quad (IV-1)$$

- 2- Calcul de la tension aux bornes de cellule bi-compartiments (V_{cb}), en utilisant l'expression :

$$V_{cb} = V_d + V_c \quad (\text{IV-2})$$

3- Calcul de la tension d'alimentation (V_{tot}), Il s'exprime comme suit :

$$V_{tot} = \Delta V + N_{cb} \times V_{cb} \quad (\text{IV-3})$$

▪ ***Calcul du débit volumétrique***

- Le débit volumétrique de solution diluée (Q), il peut être exprimé par :

$$Q = N_{cb} \times \Delta \times W \times u \quad (\text{IV-4})$$

En raison des dimensions adoptées dans ce travail, le nombre $N_{cb} = 20$ sera pris comme la plus grande valeur du nombre de cellules bi-compartiments pouvant être adoptées. Les résultats obtenus sont répertoriés dans le tableau IV.3 :

Induction	Concentration	Résistances électriques des compartiments		Tension d'alimentation et débit volumétrique en fonction de nombre de cellules bi-compartiments					
		Compartiment dilué	Compartiment concentré	Une seule cellule bi-compartiment		Dix cellules bi-compartiments		Vingt cellules bi-compartiments	
				Tension	Débit	Tension	Débit	Tension	Débit
0.15	2.57	1.22	0.63	0.75+ ΔV	0.01980	07.50+ ΔV	0.1980	15.00+ ΔV	0.40
	1.00	3.03	0.51	1.74+ ΔV	0.02970	17.40+ ΔV	0.2970	34.80+ ΔV	0.59
	0.57	4.54	0.37	2.85+ ΔV	0.03377	28.50+ ΔV	0.3377	57.00 + ΔV	0.67
0.30	4.79	0.87	0.79	0.68+ ΔV	0.03780	06.80+ ΔV	0.3780	13.60+ ΔV	0.68
	1.90	2.53	0.64	1.66+ ΔV	0.05400	16.60+ ΔV	0.5400	33.20+ ΔV	1.08
	0.90	3.47	0.47	2.67+ ΔV	0.05940	26.70+ ΔV	0.5940	53.40+ ΔV	1.19
0.45	6.84	0.79	0.89	0.65+ ΔV	0.05400	06.50+ ΔV	0.5400	13.00+ ΔV	1.08
	3.20	1.96	0.72	1.58+ ΔV	0.08550	15.80+ ΔV	0.8550	31.60+ ΔV	1.71
	1.78	2.94	0.53	2.61+ ΔV	0.1017	26.10+ ΔV	1.0170	52.20+ ΔV	2.03
- Induction magnétique en [T]		- Concentration en [g/Litre]		- Résistances électriques en [Ω]		- Tension électrique en [V]			
- Débit volumétrique en [Litres/heure]		- ΔV est la chute de tension aux électrodes en [V]							

Tableau IV. Propriétés et paramètres d'un procédé composé de N_{cb} cellules bi-compartiments

Les résultats répertoriés dans le tableau ci-dessus indiquent que :

- Le débit volumétrique a tendance à augmenter de proportionnalité avec le champ magnétique et la tension appliquée en raison d'une augmentation de la vitesse résultant de l'augmentation de la force de Laplace.
- plus le nombre de cellules bi-compartiments augmente, plus le débit volumétrique augmente et plus la tension d'alimentation nécessaire augmente avec des valeurs appropriées.
- Pour un module composé de vingt cellules bi-compartiments ($N_{cb}=20$) si en appliquant des tensions varient de 52volts à 57volts le système devient capable de fournir un débit volumétrique comprise entre 0.67 litres/heures d'une solution de concentration 0.57g/l et 2.03 litres/heures d'une solution de concentration 1.78g/l.

D'après cette simulation nous observons les points suivants :

1. *Le profil de vitesse d'écoulement est parabolique; les valeurs maximales de cette vitesse sont situées au centre des compartiments. Ces valeurs diminuent progressivement pour prendre des valeurs minimales sur les parois des compartiments. L'évolution temporelle de ces vitesses passe par un régime transitoire puis se stabilise à une valeur permanente.*
2. *Les profils de concentration des espèces présentes dans la solution montrent que les valeurs de concentration sont maximales et à peu près égales à la concentration initiale à l'entrée des compartiments puis elles diminuent progressivement jusqu'à des valeurs minimales à la sortie du compartiment. La concentration de Na^+ est plus élevée par rapport à la concentration de Cl^- en raison de la mobilité ionique de chaque espèce.*
3. *L'augmentation de la vitesse d'écoulement diminue le temps de contact de la solution à traiter avec les surfaces des membranes ce qui conduit à une augmentation de la concentration ionique à la sortie du compartiment. Comme des vitesses plus élevées signifient un temps de séjour plus faible, les ions qui se trouvent entre les membranes n'ont pas assez de temps pour passer à travers les membranes.*
4. *En raison de la force de Lorentz, l'augmentation en induction magnétique conduit à des vitesses plus élevées accompagnées par une diminution de la proportion de sel séparé par le processus électrodialyse.*

5. *En raison des termes de couplage : la force de Lorentz, la loi d'Ohm et le terme de flux de migration, la vitesse a tendance à augmenter de proportionnalité avec la tension appliquée alors que la quantité de sel séparé est difficilement prévisible. Ce dont il est sûr, c'est que pour chaque induction magnétique donnée les meilleurs résultats sont obtenus pour les tensions les plus élevées.*
6. *D'après les résultats de simulation on peut noter qu'il est désirable de travailler à des tensions élevées afin d'achever un dessalement rapide. En pratique, cependant, les courants opératoires sont limités par le phénomène dit de la polarisation de concentration et ses conséquences néfastes qu'il n'a pas été pris en compte dans cette étude.*
7. *Pus le nombre de cellules bi-compartiments augmente, plus le débit volumétrique augmente et plus la tension d'alimentation nécessaire augmente avec des valeurs appropriées. Le nombre de cellules bi-compartiments doit être augmenté d'une manière appropriée aux dimensions géométriques adoptés d'une part et adaptée aux sources d'énergie disponible d'autre part.*

IV.6 Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la simulation du couplage magnétohydrodynamique - transport ionique. Le comportement des différentes grandeurs physiques caractérisant le prototype proposé a été étudié et l'effet de tension et d'induction sur la performance du système a été explicité. Les résultats prédisent un écoulement de solution accompagné par une diminution de concentration des espèces ioniques à la sortie ce qui rend cette application, un processus pratique et moins encombrant car il s'agit d'une conception simple qui n'utilise pas de pompes externes et n'a pas de pièces mobiles.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] P. Mathon « Influence des forces électromagnétiques sur les processus électrochimiques. Application à la propulsion MHD », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [2] N. Abdallah « Etude de l'influence des forces magnétiques sur l'hydrodynamique et le transfert de matière en électrochimie », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [3] K.N. Knust, D. Hlushkou, U. Tallarek, et R. M. Crooks « Electrochemical desalination for a sustainable water future », *ChemElectroChem*, 1 (2014) 850 – 857.
- [4] K. Oulmi « Etude des mécanismes de dissociation de l'eau dans les membranes échangeuses d'ions », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif, 2015.
- [5] N. Bennecib « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [6] N. Bergoug « Contribution à la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [7] S. Naceur « Contribution à la modélisation 2D d'un convertisseur magnétohydrodynamique (MHD) à conduction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [8] K. Bouali « Contribution à l'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (MHD) », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [9] M. Tawk « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique », Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.
- [10] M. Qin et H. Bau « Magneto-Hydrodynamic Flow in Electrolyte », *Solutions Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, (Boston), (2009).*
- [11] K. Tado, F. Sakai, Y. Sano and A. Nakayama « An analysis on ion transport process in electro dialysis desalination », *Desalination* 378 (2016) 60–66.
- [12] Z. Zourmand, F. Faridirad, N. Kasiri and Toraj Mohammadi « Mass transfer modeling of desalination through an electro dialysis cell », *Desalination* 359 (2015) 41 – 51.
- [13] J.M. Ortiz, J.A. Sotoca, E. Exposito, F. Gallud, V. Garcia-Garcia, V. Montiel et A. Aldaz « Brackish water desalination by electro dialysis: batch recirculation operation modeling », *Journal of Membrane Science* 252 (2005) 65–75.
- [14] K. Tado, F. Sakai, Y. Sano et A. Nakayama « An analysis on ion transport process in electro dialysis desalination », *Desalination* 378 (2016) 60–66.
- [15] « COMSOL Multiphysics: user's guide », Version 3.5, 2008.
- [16] H. Nafaa, M. Farhat and S. Lassaad « Mathematical modeling of photovoltaic desalination by electro dialysis », *IEEE (Conference Paper), (2017).*
- [17] M. Sadrzadeh, A. Kaviani et T. Mohammadi « Mathematical modeling of desalination by electro dialysis », *Desalination* 206 (2007) 538–546.

- [18] Y. Tanaka « A computer simulation of continuous ion exchange membrane electro dialysis for desalination of saline water », *Desalination* 249 (2009) 809–821.
- [19] K. M. Chehayeb, D. M. Farhatb, K. G. Nayar et J. H. Lienhard « Optimal design and operation of electro dialysis for brackish-water desalination and for high-salinity brine concentration *Desalination* 420 (2017) 167–182.

Conclusion générale et
perspectives

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

De nombreux pays souffrent encore aujourd'hui de pénurie en eau potable. Une des techniques prometteuses pour certains pays est le dessalement de l'eau de mer ou des eaux saumâtres. Les techniques de dessalement de l'eau de mer sont opérationnelles depuis de nombreuses années, mais leur coût limite souvent leur utilisation aux pays riches. En effet, les procédés de dessalement restent assez coûteux énergétiquement malgré de nombreuses améliorations dans les récupérations d'énergie. L'utilisation des technologies de dessalement alimentées par des sources d'énergie renouvelable est un moyen appliqué dans de nombreux endroits aujourd'hui pour produire l'eau douce. Ces technologies améliorent de plus en plus les performances du système avec le développement continu des sources d'énergie renouvelable qui présentent l'unique alternative d'alimenter les systèmes de dessalement dans les régions isolées et où le dessalement est nécessaire.

De nombreux travaux concernant les procédés d'électrodialyse avec des unités à petite échelle ont été réalisés au cours des deux dernières décennies. Le processus d'électrodialyse est adapté pour atteindre l'objectif, mais il est une opération complexe où l'écoulement du fluide à traiter est généralement assuré par des pompes externes faisant du système un appareil encombrant et ces systèmes ne peuvent pas être facilement miniaturisés pour une utilisation pratique en laboratoire, à domicile ou à des fins mobiles. Dans ce contexte, une nouvelle conception simple et pratique où un aimant permanent est ajouté à un procédé d'électrodialyse à petite échelle classique a été proposée. Cette conception nécessite uniquement une seule source à courant continu pour assurer le pompage et le dessalement à la fois.

En présence d'un champ magnétique, l'étude des phénomènes apparaissant au sein d'un électrolyte aqueux à dessaler par un système électrodialyse est à la croisée de trois sciences: l'électromagnétique, la mécanique des fluides et le transport ionique. Les lois constitutives du matériau, qui sont caractéristiques de chaque milieu doivent être ajoutées aux équations de Maxwell pour déterminer les grandeurs électromagnétiques. Les équations de Navier Stokes associées aux propriétés du fluide permettent de trouver la variation de la vitesse d'écoulement et de la pression, En fin, il est fait appel aux équations de Nernst-Planck pour l'analyse des flux des espèces constituant la solution à traiter.

Les méthodes de discrétisation (différences finies, volumes finis, des éléments finis ...) utilisées pour la résolution des équations mathématiques établies, consistent à ramener la résolution des équations aux dérivées partielles dans le domaine d'étude vers une solution d'équations algébriques facilement traitées par un ordinateur. L'application de telles méthodes de discrétisation permet de résoudre l'ensemble des équations régissant le problème étudié. Le logiciel COMSOL Multiphysics utilisant la méthode des éléments finis a été adopté pour faire la simulation numérique. Le comportement des différentes grandeurs physiques caractérisant le prototype proposé a été étudié et l'effet de tension et d'induction sur la performance du système a été explicité. Les résultats prédisent des écoulements de solution accompagnés par une diminution de concentration des espèces ioniques à la sortie de la cellule.

A l'issue de ce travail, nous recommandons que les travaux futures soient orientés vers :

1. L'étude des effets de variation des autres paramètres tels que la longueur, la hauteur et la largeur des compartiments afin d'optimiser le système. D'un point de vue industriel, le nombre des cellules doit être principalement adapté à la source d'énergie disponible (panneaux photovoltaïques, batterie ...).
2. L'introduction du modèle thermique en plus des modèles étudiés donnera une bonne perception sur la possibilité de moduler le travail d'un système électrodialyse vers un système hybride (électrodialyse – distillation).
3. L'analyse économique comparative entre le modèle proposé et les procédés utilisés actuellement où l'écoulement du fluide à traiter est assuré par des pompes externes.
4. L'étude de la faisabilité de s'appuyer sur les panneaux photovoltaïques pour alimenter le dispositif par l'énergie solaire. Les avantages de l'utilisation de ce type d'énergie sont qu'elle n'est pas polluante — une fois les panneaux solaires produits; elle est silencieuse, abondante, décentralisée, gratuite, interminable, pérenne et faible coût de maintenance. Un autre facteur positif, ces sources peuvent également alimenter directement le système – sans utiliser les systèmes des batteries – pour produire l'eau pendant les heures d'ensoleillement et stocker l'eau dessalée au lieu de stocker l'énergie électrique.
5. L'étude expérimentale pour valider et affiner les résultats obtenus.

BIBLIOGRAPHIE GLOBALE

Chapitre I

- [1] D. Moudjeber « Utilisation des énergies renouvelables dans le dessalement : Cas de l'Algérie », Thèse de doctorat, Université Abdelhamid Ibn Badis de – Mostaganem, 2015.
- [2] Z. Triki « Études, Analyses et Optimisation de la Consommation Énergétique des Unités de Dessalement pour les Sites Isolés », Thèse de doctorat, Université de constantine1, 2014.
- [3] K.N. Knust, D. Hlushkou, U. Tallarek et R. M. Crooks « Electrochemical desalination for a sustainable water future », ChemElectroChem, 1 (2014) 850 – 857.
- [4] M. Laissaoui « Etude et optimisation de l'hybridation solaire des installations des turbines à gaz et turbines à vapeur utilisés pour le dessalement d'eau », 2018.
- [5] L. Guimard « Etude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires », Thèse de doctorat, Université de Lyon1, 2019.
- [6] <https://www.alloprof.qc.ca/fr/eleves/bv/sciences/la-salinite-de-l-eau-s1342>.
- [7] P. Mathon « Influence des forces électromagnétiques sur les processus électrochimiques. Application à la propulsion MHD », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [8] WHO « Guidelines for Drinking-water Quality », fourth edition, 20 Avenue Appia, 1211 Geneva 27, Switzerland, 2011.
- [9] O. Charrouf « Commande et Optimisation D'un Système de Dessalement Hybride : Solaire-Eolien », Thèse de doctorat, Université de Mohamed Khider – Biskra, 2018.
- [10] L. Guimard « Etude du comportement et modélisation d'une installation de dessalement d'eau de mer par distillation soumise à des régimes transitoires », Thèse de doctorat, Université de Lyon1, 2019.
- [11] A. Campionea, A. Cipollina, E. Toet, L. Gurreri, I.D.L. Bogle et G. Micale « Water desalination by capacitive electrodialysis: Experiments and modeling », Desalination, 473 (2020) 1-13.
- [12] M. Elimelech et W.A. Phillip « The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment », Science, 333 (2011) 712-717.
- [13] A.B. Chaaben, R. Andoulsi, A. Sellami et R. Mhiri « MIMO Modeling Approach for a Small Photovoltaic Reverse Osmosis Desalination System », Journal of Applied Fluid Mechanics, 4 (2011) 35-41.
- [14] MIT Energy Initiative « Energy Futures », Massachusetts Institute of Technology. (2015).
- [15] D. Hlushkou, K.N. Knust, R.M. Crooks and U. Tallarek « Numerical simulation of electrochemical desalination », Journal of Physics: Condensed Matter, 28(2016) 1-28.
- [16] X.Q. Li, W.C Xu, M.G Tang, L. Zhou, B. Zhu, S.N Zhu et J. Zhu « Graphene oxide-based efficient and scalable solar desalination under one sun with a confined 2D water path », PNAS, 113 (2016) 13953–13958.
- [17] X.Z. Hu, W.C. Xu, L. Zhou, Y.L. Tan, Y. Wang, S.N. Zhu et J. Zhu « Tailoring Graphene Oxide-Based Aerogels for Efficient Solar Steam Generation under One Sun », Advanced Materials, 29 (2017) 1-5.

- [18] A. Fadel « Etude et modélisation du traitement des eaux de surface par des procédés électromembranaires », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif, 2016.
- [19] M.R ghalloussi – Alloui « Contribution à l'étude du vieillissement de membranes échangeuses d'ions utilisées dans un procédé d'électrodialyse pour l'industrie agroalimentaire », Thèse de doctorat, Université Paris – Est, 2012.
- [20] R. Zerdoumi « Contribution a l'étude de la polarisation de concentration et la dissociation de l'eau dans les membranes échangeuses d'ions », Mémoire de magister, Université de Mohamed Khider – Biskra, 2012.
- [21] P. Y. Pontalier « Identification et modélisation du transfert de matière dans des membranes de nanofiltration », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1996.
- [22] M. Akhter, G. Habib et S. U. Qama « Application of electrodialysis in waste water treatment and impact of fouling on process performance », *J Membr Sci Technol*, 8(2) (2018) 1-8.
- [23] A. Campione, A. Cipollina, E. Toet, L. Gurreri, I. D. L. Bogle et G. Micale « Water desalination by capacitive electrodialysis: Experiments and modelling », *Desalination*, 473 (2020)114150.
- [24] M. Červenková, J. Chromíková, S. Heviánková et Z. Wranová « The application of electrodialysis for the recovery of phosphorus from wastewater sludge liquid discharge », *E&ES*, 92(1) (2017) 012007.
- [25] O. Chaalal et M. M. Hossain « A small-scale membrane electro-dialyser for domestic use, *Membrane Water Treatment* », 6(1) (2015) 43-52.
- [26] K. G. Nayar, P. Sundararaman, J. D. Schacherl, C. L. O'Connor, M. L. Heath, M.O. Gabriel et A. G. Winter « Feasibility study of an electrodialysis system for in-home water desalination in urban India, *Development Engineering* », 2 (2017) 38-46.
- [27] N. Bennecib « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [28] K. Bouali « Contribution a l'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (MHD) », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [29] O. M. Al-Habahbeh, M. Al-Saqqa, M. Safi et T.A. Khater « Review of magneto hydrodynamic pump applications », *Alexandria Engineering Journal*, 55(2) (2016) 1347-1358.
- [30] N. Bergoug « Contribution à la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [31] S. Naceur « Contribution à la modélisation 2d d'un convertisseur magnétohydrodynamique (MHD) à conduction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [32] M. Tawk « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique », Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.
- [33] J. J. Schoeman « Nitrate-nitrogen removal with small-scale reverse osmosis, electrodialysis and ion-exchange units in rural areas », *Water SA*, 35(5) (2009) 721-728.
- [34] P. Sstat, P. Huguet et V. Nikonenko, « Magnetohydrodynamic flow in electrodialyser channel », 207th ECS Meeting, Quebec City (Canada), (2005).

Chapitre II

- [1] N. Bennecib, S. Drid et R. Abdessemed « Numerical investigation of flow in a new DC pump MHD », *Journal of applied fluid mechanics*, 2(2) (2009) 23-28.
- [2] M. I. Hasan, A. J. F. Ali et R. S. Tufah « Numerical study of the effect of channel geometry on the performance of Magnetohydrodynamic micro pump », *Engineering science and technology, an international journal*, 20(3) (2017) 982-989.
- [3] S. Naceur, F. Z. Kadid et R. Abdessemed « The study of the electroconductive liquids flow in a conduction magnetohydrodynamic pump », *Transactions on Electrical and Electronic Materials*, 17(5) (2016) 252-256.
- [4] C. R. Roman « Study of the electromagnetic pumping systems of molten metals and molten salts », Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2014.
- [5] C. Trophime « Modélisation numérique du couplage Magnétohydrodynamique (M.H.D.) fort. Application à la propulsion M.H.D. navale », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 1995.
- [6] M. Tawk, « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique » Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.
- [7] K. Bouali « Contribution a l'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (MHD) », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [8] S. Naceur « Contribution à la modélisation 2d d'un convertisseur magnétohydrodynamique (MHD) à conduction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [9] N. Bennecib, « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [10] N. Bergoug « Contribution à la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [11] F. Z. Kadid, S. Drid, et R. Abdessemed « Simulation of magnetohydrodynamic and thermal coupling in the linear induction MHD pump », *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 4(1) (2011) 51-57.
- [12] K. N. Knust, D. Hlushkou, U. Tallarek et R. M. Crooks « Electrochemical desalination for a sustainable water future », *ChemElectroChem*, 1(5), (2014) 850-857.
- [13] R. Enciso, J. A. Delgadillo, O. Domínguez, et I. Rodríguez-Torres « Analysis and validation of the hydrodynamics of an electro dialysis cell using computational fluid dynamics », *Desalination*, 408 (2017) 127-132.
- [14] M. Qin et H.H. Bau « Magneto-hydrodynamic flow in electrolyte solutions », *Comsol conference*, 2009.
- [15] K. Oulmi « Etude des mécanismes de dissociation de l'eau dans les membranes échangeuses d'ions », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif, 2015.
- [16] P. mathon « Influence des forces électromagnétiques sur les processus électrochimiques - application à la propulsion MHD », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.

- [17] N. Abdallah « Etude de l'influence des forces magnétiques sur l'hydrodynamique et le transfert de matière en électrochimie », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [18] <https://www.ircwash.org/sites/default/files/71-WHO81-2270.pdf>.
- [19] <https://www.encyclopedie-energie.org/le-dessalement-deau-de-mer-et-des-eaux-saumatres>.
- [20] H. Nafaa, M. Farhat et S. Lassaad « Mathematical modeling of photovoltaic desalination by electro dialysis », IEEE (Conference Paper), (2017).
- [21] M. Sadrzadeh, A. Kaviani et T. Mohammadi « Mathematical modeling of desalination by electro dialysis », Desalination 206 (2007) 538–546.
- [22] J.M. Ortiz, J.A. Sotoca, E. Exposito, F. Gallud, V. Garcia-Garcia, V. Montiel et A. Aldaz « Brackish water desalination by electro dialysis: batch recirculation operation modeling », Journal of Membrane Science 252 (2005) 65–75.
- [23] K. M. Chehayeb, D. M. Farhat, K. G. Nayar et J. H. Lienhard « Optimal design and operation of electro dialysis for brackish-water desalination and for high-salinity brine concentration », Desalination 420 (2017) 167–182.

Chapitre III

- [1] K. Chatri « Etude des phénomènes magnétothermiques dans les dispositifs de chauffage par induction par la méthode des éléments finis », thèse de magister de l'université de Batna, 2003.
- [2] N. Bennecib « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.
- [3] N. Bergoug « Contribution à la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [4] S. Naceur « Contribution à la modélisation 2D d'un convertisseur magnétohydrodynamique (MHD) à conduction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [5] K. Bouali « Contribution à l'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (MHD) », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [6] N. Bensedira « Contribution à l'étude du couplage électromagnétique-thermique dans une charge à symétrie axiale (Etude + Simulation) », mémoire de magister université de Batna, 2013.
- [7] A. Hamrani « Apports d'approches sans maillage pour la simulation des phénomènes de séparation de la matière: Application aux procédés de mise en forme », thèse de doctorat, l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2016.
- [08]-[https://www.comsol.fr/paper/validation-of-comsol-multiphysics-for magnetohydrodynamics - mhd-flows-in-fusion-a-50552](https://www.comsol.fr/paper/validation-of-comsol-multiphysics-for-magnetohydrodynamics-mhd-flows-in-fusion-a-50552).
- [09] Thomas Heuzé « Couplages Multiphysiques », Notes de cours, École d'ingénieur. France. 2020.
- [10] P. Triwong « Modélisation numérique 3D des phénomènes couplés dans les procédés d'élaboration par induction : couplage faible et couplage fort », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [11] Y. Safa « Simulation numérique des phénomènes thermiques et magnétohydrodynamiques dans une cellule de Hall-Héroult », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.

- [12] S. Flotron « Simulations numériques de phénomènes MHD-thermiques avec interface libre dans l'électrolyse de l'aluminium », Thèse de doctorat, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, 2013.
- [13] N. Abdallah « Etude de l'influence des forces magnétiques sur l'hydrodynamique et le transfert de matière en électrochimie », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [14] P. Mathon « Influence des forces électromagnétiques sur les processus électrochimiques. Application à la propulsion MHD », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [15] Thomas Heuzé « Couplages Multiphysiques », Notes de cours, École Centrale de Nantes, 2020.
- [16] https://fr.wikipedia.org/wiki/COMSOL_Multiphysics.
- [17] M. Qin et H.H. Bau « Magneto-hydrodynamic flow in electrolyte solutions », Comsol conference. 2009.
- [18] M. Tawk, « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique » Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.
- [19] K. Tado, F. Sakai, Y. Sano et A. Nakayama « An analysis on ion transport process in electro dialysis desalination », Desalination 378 (2016) 60–66.
- [20] Z. Zourmand, F. Faridirad, N. Kasiri et Toraj Mohammadi « Mass transfer modeling of desalination through an electro dialysis cell », Desalination 359 (2015) 41 – 51.
- [21] <https://br.comsol.com/blogs/building-a-magneto-hydrodynamic-multiphysics-model-in-comsol/>
- [22] « COMSOL Muliphysics : AC/DC module », Version 3.5, 2008.
- [23] « COMSOL Muliphysics : Navier-Stokes Laminar module », Version 3.5, 2008.
- [24] « COMSOL Muliphysics: Electro-kinetic flow module », Version 3.5, 2008.
- [25] « COMSOL Muliphysics: user's guide », Version 3.5, 2008.
- [26] B. Stute, W. Joppich, W. Wiechert et E. Lieres « Performance of iterative equation solvers for convection-diffusion-adsorption-problems in threedimensional sphere packings in comsol », Simul Model Pract Th, 33 (2013):115-131.

Chapitre IV

- [1] P. Mathon « Influence des forces électromagnétiques sur les processus électrochimiques. Application à la propulsion MHD », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [2] N. Abdallah « Etude de l'influence des forces magnétiques sur l'hydrodynamique et le transfert de matière en électrochimie », Thèse de doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2008.
- [3] K.N. Knust, D. Hlushkou, U. Tallarek, et R. M. Crooks « Electrochemical desalination for a sustainable water future », ChemElectroChem, 1 (2014) 850 – 857.
- [4] K. Oulmi « Etude des mécanismes de dissociation de l'eau dans les membranes échangeuses d'ions », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas – Setif, 2015.
- [5] N. Bennecib « Contribution à l'étude d'une machine MHD à conduction en vue de son exploitation sur un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université de Batna, 2010.

- [6] N. Bergoug «Contribution à la modélisation numérique d'une pompe magnétohydrodynamique (MHD) annulaire à induction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2013.
- [7] S. Naceur « Contribution à la modélisation 2D d'un convertisseur magnétohydrodynamique (MHD) à conduction », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [8] K. Bouali « Contribution a l'étude et l'optimisation des convertisseurs magnétohydrodynamiques (MHD) », thèse de doctorat, Université de Batna, 2015.
- [9] M. Tawk « Etude et réalisation d'un système de refroidissement pour l'électronique de puissance basé sur la mise en mouvement d'un fluide conducteur électrique », Thèse de doctorat, l'université de Grenoble, 2011.
- [10] M. Qin et H. Bau « Magneto-Hydrodynamic Flow in Electrolyte », Solutions Excerpt from the Proceedings of the COMSOL Conference, (Boston), (2009).
- [11] K. Tado, F. Sakai, Y. Sano and A. Nakayama « An analysis on ion transport process in electro dialysis desalination », *Desalination* 378 (2016) 60–66.
- [12] Z. Zourmand, F. Faridirad, N. Kasiri and Toraj Mohammadi « Mass transfer modeling of desalination through an electro dialysis cell », *Desalination* 359 (2015) 41 – 51.
- [13] J.M. Ortiz, J.A. Sotoca, E. Exposito, F. Gallud, V. Garcia-Garcia, V. Montiel et A. Aldaz « Brackish water desalination by electro dialysis: batch recirculation operation modeling », *Journal of Membrane Science* 252 (2005) 65–75.
- [14] K. Tado, F. Sakai, Y. Sano et A. Nakayama « An analysis on ion transport process in electro dialysis desalination », *Desalination* 378 (2016) 60–66.
- [15] « COMSOL Muliphysics: user's guide », Version 3.5, 2008.
- [16] H. Nafaa, M. Farhat and S. Lassaad « Mathematical modeling of photovoltaic desalination by electro dialysis », *IEEE (Conference Paper)*, (2017).
- [17] M. Sadrzadeh, A. Kaviani et T. Mohammadi « Mathematical modeling of desalination by electro dialysis », *Desalination* 206 (2007) 538–546.
- [18] Y. Tanaka « A computer simulation of continuous ion exchange membrane electro dialysis for desalination of saline water », *Desalination* 249 (2009) 809–821.
- [19] K. M. Chehayeb, D. M. Farhatb, K. G. Nayar et J. H. Lienhard « Optimal design and operation of electro dialysis for brackish-water desalination and for high-salinity brine concentration *Desalination* 420 (2017) 167–182.

ملخص

في هذا العمل، قمنا بتقديم مقاربة جديدة لجهاز ذو حجم صغير موجه لتحلية مياه البحر يعتمد في ذلك تقنية الفرز الغشائي الكهربائي (Electrodialyse) حيث يمكن استعماله لأغراض منزلية و متنقلة. يتم اعتماد قوة MHD لدفع المحلول المراد معالجته عبر الجهاز، ما يجعل هذا الجهاز عملي وغير معقد كونه لا يستعمل أي مضخة خارجية كما أنه اقتصادي باعتباره يعتمد في تزوده بالطاقة الضرورية في عمليتا الدفع و التحلية مصدرا كهربائيا واحدا فقط ذو تيار مستمر. تم إجراء محاكاة ثلاثية الأبعاد لتزواج الظواهر الفيزيائية المشكلة للنظام بواسطة برنامج Multiphysics COMSOL الذي يعتمد طريقة العناصر المنتهية في حله للمعادلات ذوات الاشتقاقات الجزئية كما تم تحليل النتائج المتحصل عليها التي أظهرت نقصان في تركيز الأملاح داخل المياه المعالجة.

Résumé

Dans ce travail, nous présentons une nouvelle approche d'un système électrodialyse mobile, domestique et à petite échelle pour le dessalement de l'eau de mer où le débit de l'eau salée est généré par une force magnétohydrodynamique (MHD), ce qui rend le processus pratique et moins encombrant car il n'utilise aucune pompe externe. Ce modèle proposé est économique en énergie car il utilise uniquement une source externe à courant continu pour fournir le courant nécessaire au pompage et au dessalement de la solution à traiter. Une simulation tridimensionnelle du couplage magnétohydrodynamique - transport ionique par le logiciel COMSOL Multiphysics utilisant la méthode des éléments finis pour résoudre les équations aux dérivées partielles est modélisée et les résultats montrant une réduction de la concentration du sel dans l'eau traitée sont analysés.

Abstract

In this work, we present a new approach of a small-scale electro dialysis for domestic and mobile water desalination where the flow of saltwater is generated by MHD driving force which makes the process practical and less cumbersome as it uses no external pumps. This proposed model is energy efficient as it uses only an external DC source to supply the necessary current needed to pump and desalt the solution to be treated. A three-Dimensional modeling and simulation of coupling Magneto hydrodynamic-Ionic transport with COMSOL Multiphysics using finites elements method are carried out and the results showing a decrease in the concentration of salt in the treated solution are analysed.