

N°

Ordre...../F.S.S.A/UAMOB/2022

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ DE BOUIRA**



Faculté des Sciences et Sciences Appliquées  
Département de Génie Civil

**Mémoire de Fin d'Etude**

Présenté par :

**ZERROUGUI Ferial**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : **Hydraulique**

Option : **Ressources Hydrauliques**

**Thème**

**MODELISATION DE LA CONDUCTIVITE ELECTRIQUE DE L'EAU**  
**SOUTERRAINE**  
**ETUDE DE CAS DES EAUX SOUTERRAINES DE LA REGION DE HASSI R'MEL**  
**(W.LAGHOAT)**

**Devant le jury composé de :**

<b>YAHIAOUI</b>	<b>Abdelhalim</b>	Dr	UAMOB	Président
<b>METAICHE</b>	<b>Mehdi</b>	Dr	UAMOB	Encadreur
<b>REZKI</b>	<b>Mohamed</b>	Dr	UAMOB	Examineur

**Année Universitaire 2021/2022**



## ***Remerciements***

J'ai l'honneur et le plaisir de présenter mes profondes gratitudee et mes sincères remerciements à mon encadreur Dr. M.METAICHE pour son orientation et le temps qu'il a accordé pour mon encadrement.

Mes remerciements s'adressent également au membre du jury pour avoir accepté de juger mon travail.

A tous les enseignants de département qu'ont faits de leurs mieux pour former les futurs cadres que nous sommes, merci.



## *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect et de reconnaissance*

*A:*

*Ma très chère mère qui a été et qui reste pour toujours mon guide dans  
la vie.*

*Mon chère Papa qui a participé par tous les moyens pour me porter  
l'aide morale et matériel.*

*A mon mari qui a toujours été là pour moi*

*A mes beaux parents*

*A mes grand-mères qui nous ont quittés, vous resterez toujours  
présentes et vivantes dans mon cœur.*

*A Mes sœurs, Samah et Selma.*

*Mes frères, Faiçal, Amine, Hani et Juba.*

*A Mes oncles et mes tantes*

*A Tous mes cousins et cousines*

*A Toutes mes amies : Lydia T, Yamina, Lydia A, Imen, Lydia.M,  
Safa, Djidji...*

*Je vous aime ♥*

*ZERROUGUI Ferial*

## Résumé

L'objectif de ce travail est d'affirmer la fiabilité des analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la région de Hassi R'mel, Wilaya de Laghouat, par la modélisation de la conductivité électrique.

À l'aide des données d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines de la région, nous avons estimé les valeurs de la conductivité électrique théorique, en utilisant 23 modèles de calcul de cette dernière, l'examen des résultats nous a permis de déterminer les modèles les plus fiables pour cette étude.

Les résultats finals ont confirmé la validité de la modélisation de la conductivité électrique pour vérifier les données physico-chimiques.

**Mots clés:** Conductivité électrique, Analyses physico-chimiques, Modélisation, Eaux souterraines.

## ملخص

الهدف من هذا العمل هو التأكد من مصداقية التحاليل الفيزيائية و الكيميائية للمياه الجوفية لمنطقة حاسي رمل، ولاية الاغواط، من خلال نمذجة الناقلية الكهربائية للماء. باستخدام بيانات التحاليل الفيزيائية و الكيميائية للمياه الجوفية للمنطقة استطعنا تقييم الناقلية الكهربائية نظريا و ذلك باستخدام ثلاثة و عشرون نموذجا حسابيا. فحص النتائج سمح لنا بتحديد النماذج الحاسوبية الاكثر موثوقية و مصداقية لهذه الدراسة. اكدت النتائج النهائية لهذه الدراسة صحة نمذجة الناقلية الكهربائية في التحقق من مصداقية البيانات الفيزيائية و الكيميائية للمياه الجوفية.

**الكلمات المفتاحية:** الناقلية الكهربائية، التحاليل الفيزيائية و الكيميائية، النمذجة، المياه الجوفية.

## Abstract

The objective of this work is to affirm the reliability of the physico-chemical analysis of groundwater, in the region of Hassi R'mel, Wilaya of Laghouat, by modeling electrical conductivity.

Using data from physico-chemical analysis of groundwater in the region, we estimated the values of theoretical electrical conductivity, using 23 calculation models, the examination of the results allowed us to determine the most reliable models for this study.

The final results confirmed the validity of the electrical conductivity modeling to verify the physico-chemical data.

**Keywords:** Electrical conductivity, Physico-chemical analysis, Modelling, Groundwater.



# Sommaire

List des figures .....	I
Liste des tableaux. ....	II
Liste des abréviations.. ....	III
Introduction générale.....	1

## Chapitre I : Présentation de la région d'étude

I.1. Introduction.....	2
I.2. Présentation du site (zone d'étude) .....	2
I.2.1. Aperçu géographique et administrative.....	2
I.3. Etude hydrologique .....	3
I.3.1. Aperçu climatique.....	3
I.3.1.2. Pluviométrie.....	5
I.4. Étude hydrogéologique.....	6
I.4.1. Le système Aquifère du Sahara Septentrional.....	6
I.4.1.1. Les Formations Acquières du Sahara Septentrional .....	8
I.4.2. Situation géologique du champ de Hassi R'Mel .....	10
I.4.3. Structure de Hassi R'mel.....	10
I.4.3.1. La nappe superficielle du Sénono-Turonien .....	11
I.5. Conclusion.....	12

## Chapitre II : Présentation des données et méthodes de calcul

II.1. Introduction.....	13
II.2. Les Paramètres Physiques.....	13
II.2.1. Température .....	13
II.2.2. pH.....	14
II.2.3. Conductivité électrique .....	14
II.2.3.1. La conductivité mesurée.....	15
II.2.3.2. Le fonctionnement de Conductimètre .....	16
II.2.3.3. Les paramètres qui influencent la mesure .....	18
II.3. Données de l'étude.....	20
II.4. Modélisation de la conductivité électrique .....	24

II.4.1. Conductivité électrique d'une solution aqueuse ionique.....	24
II.5. Conclusion .....	29

### **Chapitre III: Calculs et interprétation des résultats**

III.1. Introduction .....	30
III.2. Vérification de la fiabilité des données .....	30
II.2.1. Balance ionique .....	30
II.3. Modélisation de la conductivité électrique .....	31
II.3.1. Résultats de calcul .....	31
III.3.2. Représentation graphique des résultats .....	44
II.4. Interprétation des résultats .....	47
II.4.1. Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques .....	47
II.4.2. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Debye-Hückel limité .....	48
II.4.3. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg .....	50
III.4.4. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Legrand-Poirier .....	51
III.4.5. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Debye-Hückel étendu .....	52
III.4.6. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies.....	54
III.4.7. Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques .....	55
III.4.8. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité.....	56
III.4.9. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg .....	58
III.4.10. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier.....	59
III.4.11. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu.....	60
III.4.12. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies ..	62
III.4.13. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques .....	63
III.4.14. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel limité	64
III.4.15. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg.....	66
III.4.16. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Legrand-Poirier	67
III.4.17. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel étendu .	68
III.4.18. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies.	70
III.4.19. Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction des teneurs ioniques) .....	71
III.4.20. Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique) .....	72

III.4.21. Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{max}$ ) .....	74
III.4.22. Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{min}$ ).....	75
III.4.22. Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{moy}$ ) .....	76
III.5. Remarque globale .....	77
II.6. Conclusion .....	79
Conclusion générale .....	80

## Liste des Figures

<b>Figure I.1:</b> Situation Géographique de champ Hassi R'mel (Google maps).....	2
<b>Figure I.2:</b> Bassins versant méridional de l'Atlas Saharien (Gaci.N, 2020).....	3
<b>Figure I.3:</b> Variations des températures moyennes mensuelles de Hassi R'Mel .....	4
<b>Figure I.4:</b> Variations moyennes annuelles des températures de .....	4
<b>Figure I.5:</b> Variations moyennes mensuelles des Précipitations (Période : 2001-2019) .....	5
<b>Figure I.6:</b> Variation annuelle des précipitations Période (2001-2019).....	5
<b>Figure I.7:</b> Variations moyennes mensuelles de l'humidité moyenne relative .....	6
<b>Figure I.8:</b> Position géographique du SASS (Lyazidi.A, 2021). .....	7
<b>Figure I.9:</b> Carte des points d'eau du CI et du CT en Algérie (2001) .....	8
<b>Figure I.10:</b> Carte en isopaque du Barrémien de la plateforme saharienne (Bassin algéro-tunisien). Equidistance 100 m. (BUSSON, 1970) .....	9
<b>Figure I.11:</b> Situation géologique du champ de Hassi R'Mel .....	10
<b>Figure II.1:</b> Migration des ions en solution (SAS, 2004) .....	15
<b>Figure II.2:</b> Diagramme simplifié d'un conductimètre (SAS, 2004) .....	16
<b>Figure II.3:</b> Accumulation d'espèces ioniques à la surface de l'électrode (SAS, 2004).....	19
<b>Figure III.1:</b> Représentation graphique des résultats (Année 2018) .....	44
<b>Figure III.2:</b> Représentation graphique des résultats (Année 2019) .....	45
<b>Figure III.3:</b> Représentation graphique des résultats (Année 2020) .....	46
<b>Figure III.4:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques (Année 2018).....	47
<b>Figure III.5:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques (Année 2019).....	47
<b>Figure III.6:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques (Année 2020) .....	48
<b>Figure III.7:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2018) .....	48
<b>Figure III.8:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2019) .....	49

<b>Figure III.9:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2020) .....	49
<b>Figure III.10:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2018) .....	59
<b>Figure III.11:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2019) .....	50
<b>Figure II.12:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2020) .....	50
<b>Figure III.13:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Legrand-Poirier .....	51
<b>Figure III.14:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Legrand-Poirier .....	51
<b>Figure III.15:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Legrand-Poirier .....	52
<b>Figure III.16:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2018) .....	52
<b>Figure III.17:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2019) .....	53
<b>Figure III.18:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2020) .....	53
<b>Figure III.19:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2018) .....	54
<b>Figure III.20:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2019) .....	54

<b>Figure III.21:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2020) .....	54
<b>Figure III.22:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques (Année 2018) .....	55
<b>Figure III.23:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques (Année 2019) .....	55
<b>Figure III.24:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques (Année 2020) .....	56
<b>Figure III.25:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) .....	56
<b>Figure III.26:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) .....	57
<b>Figure III.27:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) .....	57
<b>Figure III.28:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG) ..	58
<b>Figure III.29:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG) ..	58
<b>Figure III.30:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG) ..	58
<b>Figure III.31:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier .....	59
<b>Figure III.32:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier .....	59
<b>Figure III.33:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier .....	60
<b>Figure III.34:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) .....	60
<b>Figure III.35:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) .....	61
<b>Figure III.36:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) .....	61

<b>Figure III.37:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies .....	62
<b>Figure III.38:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies .....	62
<b>Figure III.39:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2020) .....	62
<b>Figure III.40:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques .....	63
<b>Figure III.41:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques .....	63
<b>Figure III.42:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques .....	64
<b>Figure III.43:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel limité.....	64
<b>Figure III.44:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel limité.....	65
<b>Figure III.45:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel limité.....	65
<b>Figure III.46:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg .....	66
<b>Figure III.47:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg .....	66
<b>Figure III.48:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg .....	66
<b>Figure III.49:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Legrand-Poirier.....	67
<b>Figure III.50:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Legrand-Poirier.....	67
<b>Figure III.51:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Legrand-Poirier.....	68

<b>Figure III.52:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel étendu .....	68
<b>Figure III.53:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel étendu .....	69
<b>Figure III.54:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel étendu .....	69
<b>Figure III.55:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies.....	70
<b>Figure III.56:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies.....	70
<b>Figure III.57:</b> Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies.....	70
<b>Figure III.58:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique (en fonction des teneurs ioniques).....	71
<b>Figure III.59:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction des teneurs ioniques) .....	71
<b>Figure III.60:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction des teneurs ioniques) .....	72
<b>Figure III.61:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique).....	72
<b>Figure III.62:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique).....	73
<b>Figure III.63:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique).....	73
<b>Figure III.64:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{max}$ ) .....	74
<b>Figure III.65:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{max}$ ) .....	74
<b>Figure III.66:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{max}$ ) .....	74
<b>Figure III.67:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{min}$ ).....	75

<b>Figure III.68:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{min}$ ).....	75
<b>Figure III.69:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{min}$ ).....	75
<b>Figure III.70:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{moy}$ ).....	76
<b>Figure III.71:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{moy}$ ).....	76
<b>Figure III.72:</b> Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la $TDS_{moy}$ ).....	76

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I-1:</b> Récapitulatif des points d'eau du bassin saharien en (2001) .....	7
<b>Tableau II.1:</b> Données d'analyses physico-chimique de la série des forages du champ Hassi R'mel (Année 2018) .....	21
<b>Tableau II.2:</b> Données d'analyses physico-chimique de la série des forages du champ Hassi R'mel (Année 2019) .....	22
<b>Tableau II.3:</b> Données d'analyses physico-chimique de la série des forages du champ Hassi R'mel (Année 2020) .....	23
<b>Tableau II.4:</b> Conductivités molaires ioniques en ( $\text{Sm}^2 \cdot \text{eq}^{-1}$ ) à 25 °C.....	28
<b>Tableau II.5:</b> Coefficients de diffusion dans l'eau à 25°C de certains ions en ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).....	29
<b>Tableau III.1:</b> Résultats de la balance ionique.....	30
<b>Tableau III.2:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2018) .....	32
<b>Tableau III.3:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2018) (suite) .....	33
<b>Tableau III.4:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2018) (suite) .....	34
<b>Tableau III.5:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2018) (suite) .....	35
<b>Tableau III.6:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2019) .....	36
<b>Tableau III.7:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2019) (Suite).....	37
<b>Tableau III.8:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2019) (Suite).....	38
<b>Tableau III.9:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2019) (Suite).....	39
<b>Tableau III.10:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2020) .....	40
<b>Tableau III.11:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2020) (suite).....	41

<b>Tableau III.12:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2020) (suite).....	42
<b>Tableau III.13:</b> Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2020) (suite).....	43
<b>Tableau III.14:</b> Les modèles les plus performants pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l'eau .....	77

## Liste des symboles et abréviations

- **CI** : Continental Intercalaire
- **CT**: Complexe Terminal
- **°C**: Degré Celsius
- **K**: Conductivité
- **G**: Conductance
- **K** : Constante de cellule
- **R** : Résistance de la solution
- **I** : Courant
- **V** : Tension
- **S/cm**: Siemens/centimètre
- **Ω** : Ohm
- **a** : Surface réelle des électrodes
- **d** : distance entre les électrodes
- **G<sub>m</sub>** : Conductance mesurée
- **G<sub>s</sub>** : Conductance de la solution
- **R<sub>c</sub>** : Résistance du câble
- **T**: Température
- **pH** : Potentiel hydrogène
- **Ca<sup>2+</sup>** : Calcium
- **Mg<sup>2+</sup>** : Magnésium
- **Na<sup>+</sup>** : Sodium
- **K<sup>+</sup>** : Potassium
- **Cl<sup>-</sup>** : Chlorure
- **SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>** : Sulfate
- **HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Bicarbonates
- **NO<sub>3</sub><sup>-</sup>** : Nitrate
- **CE** : Conductivité électrique
- **mg/l** : Milligramme par litre
- **σ<sub>i</sub>** : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i
- **C<sub>i</sub>** : Concentration de l'ion
- $\frac{\text{eq}}{\text{m}^3}$  : Equivalent sur mètre cubes
- **λ<sub>i/z</sub>** : Conductivité molaire ionique de l'ion
- **Z<sub>i</sub>(-)** : Valence de l'ion i (nombre de charges)
- **a<sub>i</sub>** : Activité l'ion i
- **D<sub>i</sub>** : Coefficient de diffusion de l'ion i
- **N<sub>A</sub>** : Nombre d'Avogadro
- $\sum \text{Cations}$  : La somme des concentrations des cations
- $\sum \text{Anions}$  : La somme des concentrations des anions

- **TDS** : Résidus Secs
- $\gamma_i$  : coefficient ionique de l'ion i
- **DHL** : Debye-Hückel limité
- **I** : Force ionique
- **AG** : Debye-Hückel-Güntelberg
- **DHE** : Debye-Hückel étendu
- $d_{ei}$  : Diamètre effectif moyen de l'ion hydraté
- $\sigma_{25^\circ\text{C}}$  : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion à  $T=25^\circ\text{C}$
- $\sigma_t$  : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion à T mesuré
- **BI** : Balance ionique
- $\Delta\sigma$  : Erreur relative

# **Introduction générale**

---

## Introduction générale

De par sa grande fiabilité, sa sensibilité et son faible coût, la conductivité électrique est une technique potentielle de premier ordre pour toute application de surveillance. C'est une méthode extrêmement répandue et utile, tout particulièrement dans des applications de contrôle de qualité des eaux destinés à la consommation humaine. Le degré de qualité exigible dépend évidemment de ces usages, mais aussi des ressources en eau disponibles.

L'échantillonnage de l'eau souterraine requiert plusieurs précautions quant à la façon de procéder et à la conservation des échantillons. Plusieurs méthodologies ont été développées au cours des années, chacune étant adaptée aux paramètres mesurés et au niveau de précision désiré.

Notre travail est basé sur la possibilité de préciser la validité des résultats de mesures de la conductivité électrique, à partir des modèles et méthodes de calcul qui faisant intervenir tous les ions majeurs les prédominants de notre solution. Alors, la problématique que soulève ce travail est la suivante: Est-on capable, à partir des ions majeurs d'une eau souterraine donnée, de déterminer la conductivité électrique?

Dans ce cadre, s'inscrit le thème de notre projet de fin d'études. On s'appuyant sur plusieurs études de recherches scientifiques existantes nous avons suggéré (23) modèles de calcul différents de la conductivité électrique, à appliquer sur trois séries d'échantillons de 17 forages de la région de Hassi R'mel, wilaya de Laghouat.

Notre plan de travail s'articulera en plusieurs chapitres organisés de manière suivante : Nous débuterons par une présentation géographique, hydrologique et hydrogéologique de la région d'étude, puis une présentation des données physico-chimiques d'échantillons à étudier ainsi que les modèles de calcul théorique de la conductivité électrique à appliquer. Ces derniers seront l'objet de deuxième chapitre.

Le troisième chapitre sera consacré pour la présentation, l'interprétation et la discussion des résultats.

# **Chapitre I**

## **Présentation de la région d'étude**

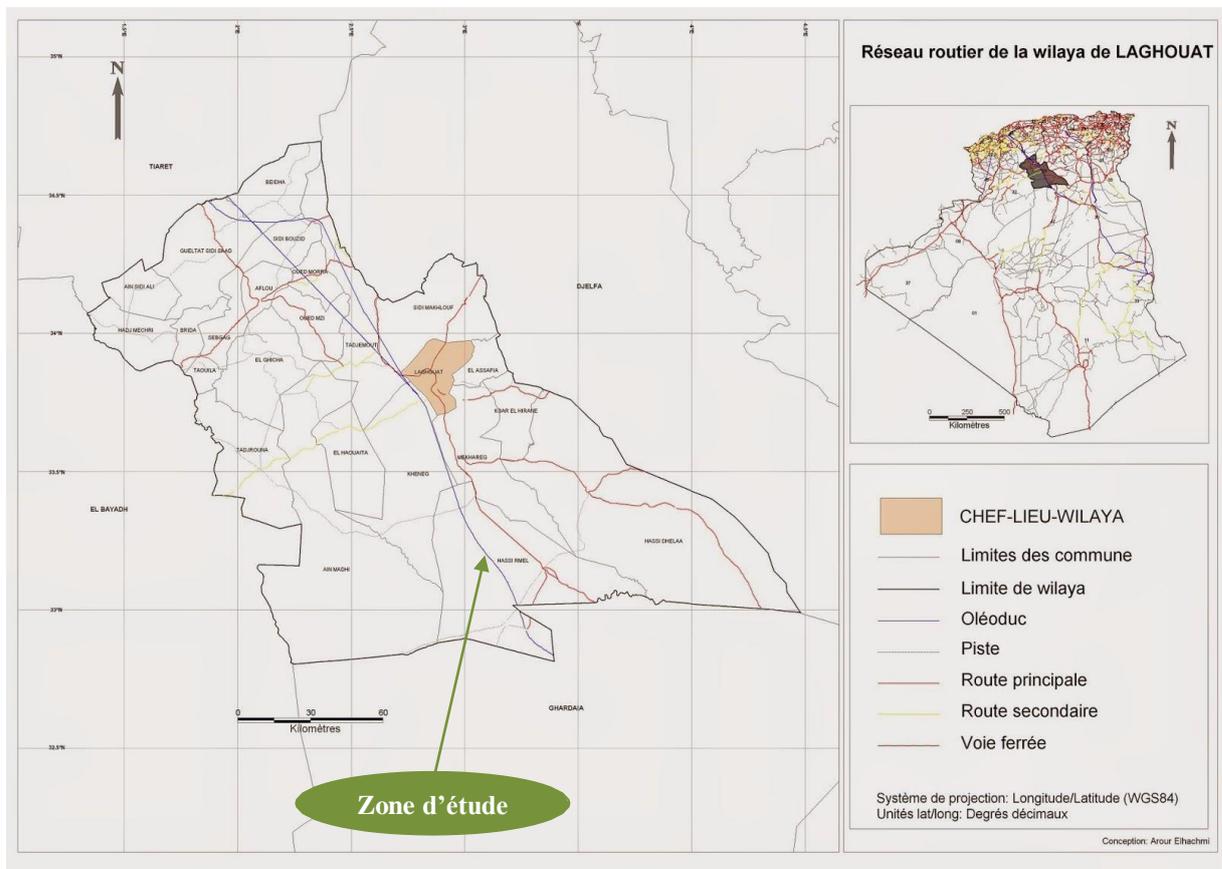
## I.1. Introduction

Avant toute étude hydrochimique, l'étude du site est nécessaire pour connaître toutes les caractéristiques du lieu et les facteurs qui influent sur la qualité des eaux souterraines, parmi ces facteurs nous citons : la localisation géographique, les données relatives à l'hydrologie et l'hydrogéologie de la région ; les données climatiques ainsi que la connaissance de la géomorphologie et les horizons aquifères de la zone. Notre étude est basée sur un exemple des données relatives à la région de Hassi R'mel située à la wilaya de Laghouat au sud d'Algérie.

## I.2. Présentation du site (zone d'étude)

### I.2.1. Aperçu géographique et administrative

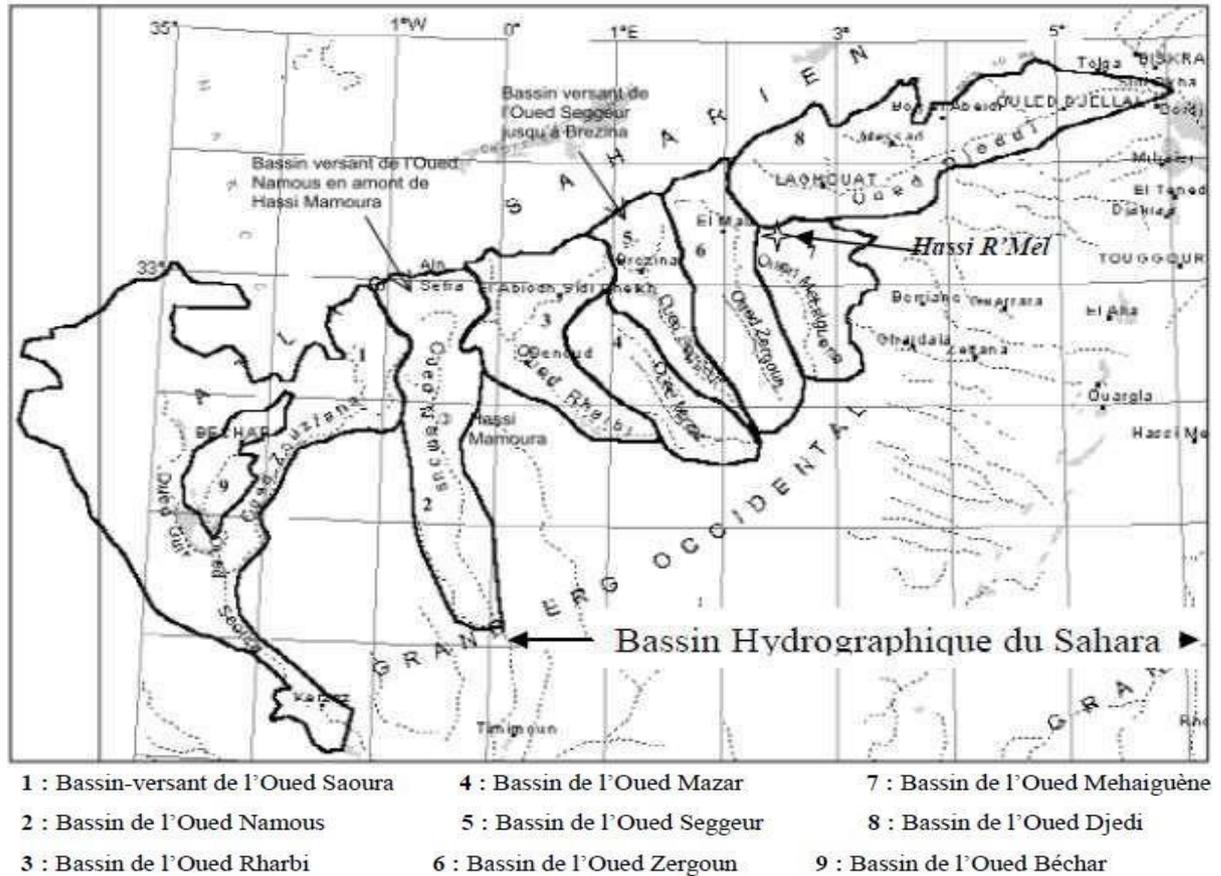
La région du Hassi R'mel est située au Nord de la plate-forme saharienne à 550 km au sud d'ALGER et 120 km au sud de la ville de Laghouat, entre les méridiens 2°55' et 3°50' Est, et les parallèles 33°15' et 33°45' Nord, avec une altitude moyenne de 750 m au-dessus de niveau de la mer, d'une superficie de 3500 km<sup>2</sup>, et un périmètre de 380 km. (Aricha.M, 2003)



**Figure I.1 :** Situation Géographique de champ Hassi R'mel  
(decoupage administratif algérien, 2015)

### I.3. Etude hydrologique

Selon la classification de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH), La zone d'étude se situe dans le sous-bassin N°07, et qui fait partie de la région hydrographique du Sahara représenté dans la figure ci-dessous.



**Figure I.2:** Bassins versant méridional de l'Atlas Saharien (Gaci.N, 2020)

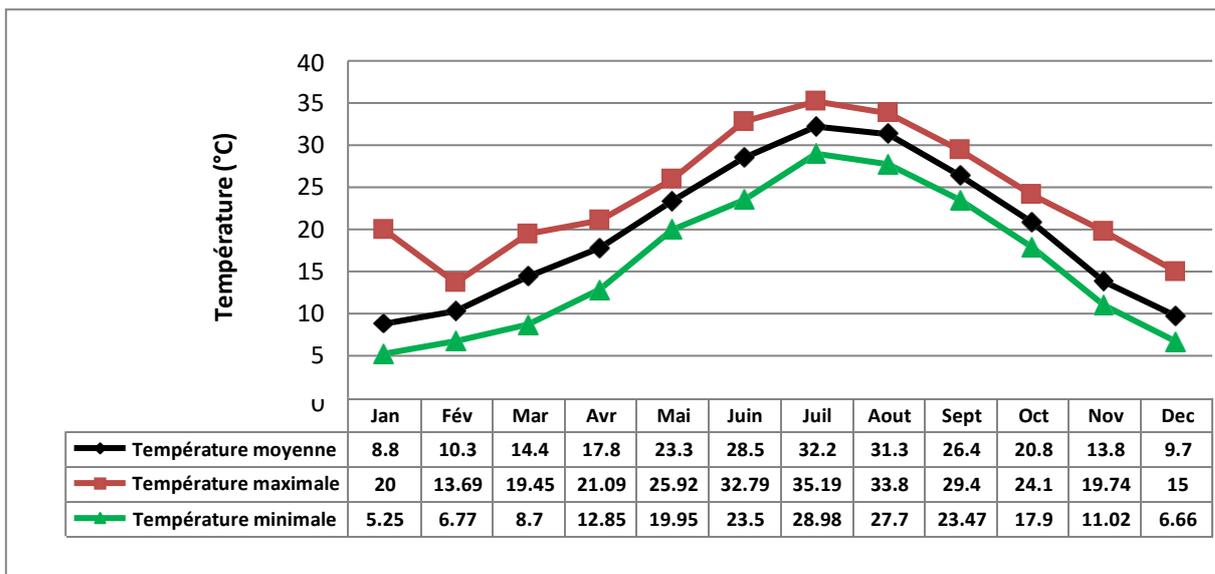
#### I.3.1. Aperçu climatique

Les paramètres climatiques présentés dans cette partie proviennent des données de la station météorologique de Hassi R'mel, sur une durée d'observation qui s'étale de 2001 jusqu'à 2020.

##### I.3.1.1. Température de l'air

Ce paramètre est un facteur très important pour l'estimation du bilan hydrologique.

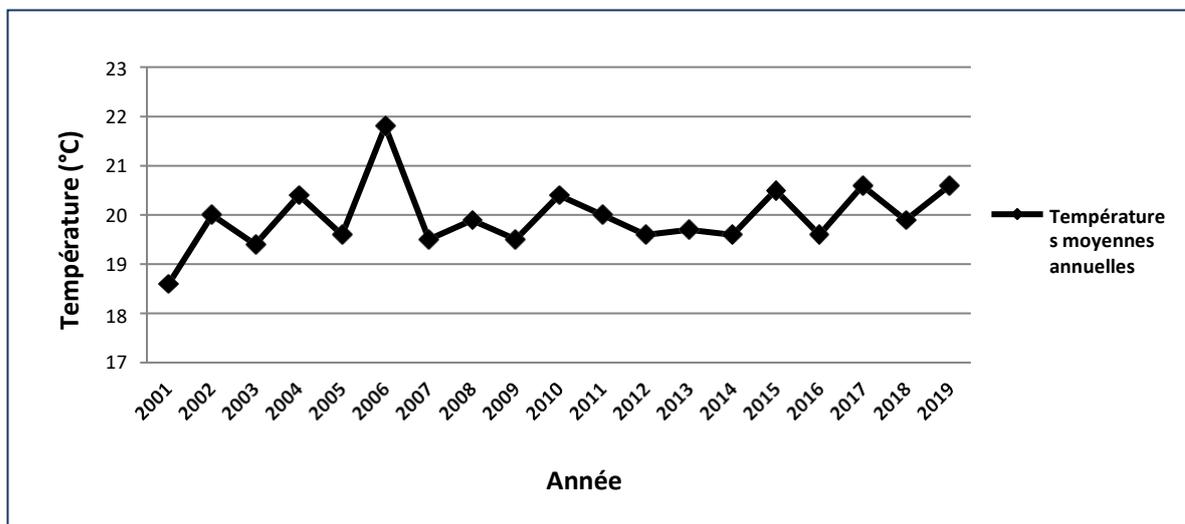
**a. Températures moyennes mensuelles**



**Figure I.3:** Variations des températures moyennes mensuelles de Hassi R'Mel (Période 2001-2019)

A travers les données de températures illustrées dans le graphe ci-dessus on remarque que: La température minimale est en mois de janvier à 5.25 °C, la moyenne est à 21.09 °C, et la température maximale est en mois de juillet à 35.19 °C.

**b. Température moyennes annuelle**



**Figure I.4:** Variations moyennes annuelles des températures de (Période: 2001-2019)

D'après la courbe de variation des températures moyennes annuelles, on constate que durant l'année hydrologique 2006 une température moyenne maximale de 21.8 °C, une température moyenne minimale de 18.6 °C, durant l'année 2001, et une température moyenne annuelle de 19,95°C.

Donc l'examen des données fait sortir de très faibles variations des températures moyennes annuelles, sur la période 2001-2019.

### I.3.1.2. Pluviométrie

#### a. Précipitations moyennes mensuelles

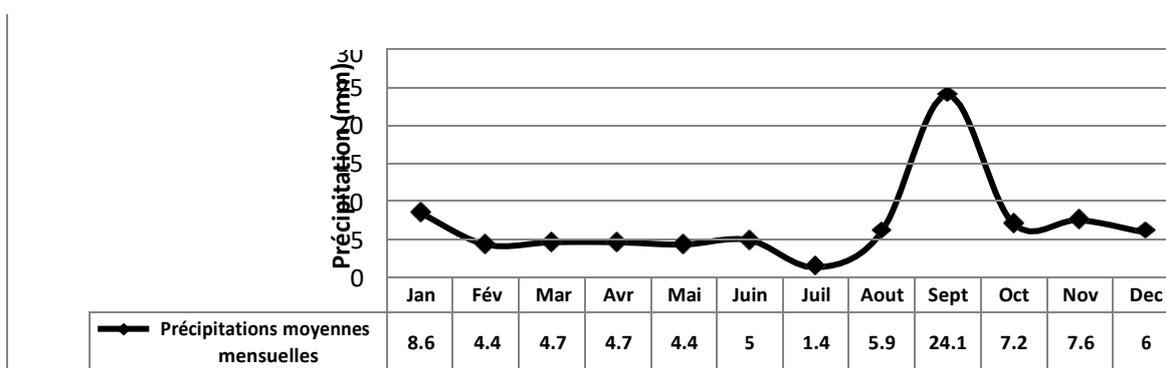


Figure I.5: Variations moyennes mensuelles des Précipitations (Période : 2001-2019)

La région de Hassi R'Mel est caractérisée par une faible pluviométrie; on constate que le mois le plus pluvieux est celui de Septembre avec 24.1 mm, alors que le mois le plus sec est le mois de Juillet avec 1,4 mm.

#### b. Précipitation moyennes annuelles

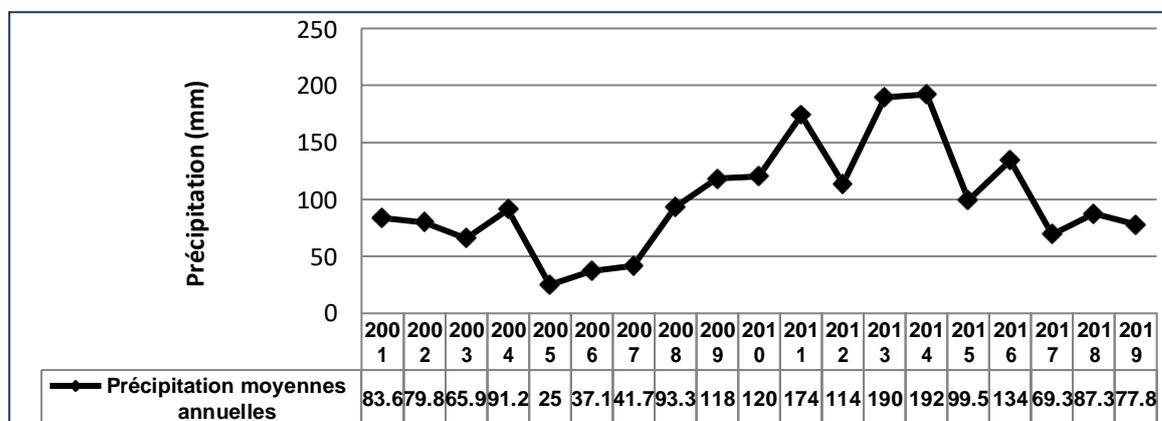
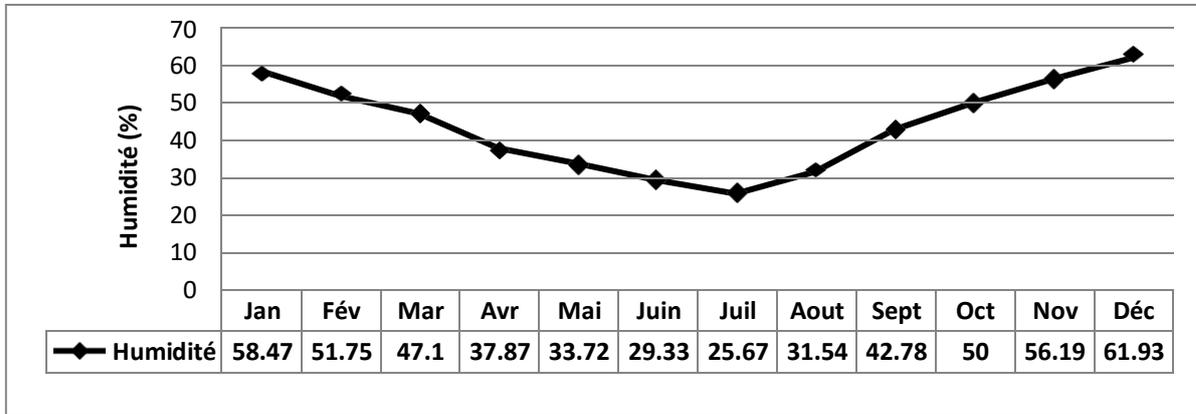


Figure I.6: Variation annuelle des précipitations Période (2001-2019)

D'après les données illustrées dans la (figure I-6), on remarque que l'année la plus pluvieuse est celle de 2014, avec un cumul de précipitations de 192.1 mm et l'année 2005 comme l'année la plus sèche avec une précipitation de 25 mm, la moyenne annuelle est de 96.86 mm.

### c. Humidité relative



**Figure I.7:** Variations moyennes mensuelles de l'humidité moyenne relative  
Période (2001-2019)

La (figure I.7) montre les différentes variations mensuelles de l'humidité (2001-2020), on remarque que le taux de l'humidité le plus élevé est enregistré en mois de décembre avec (61.93%) et le plus faible en mois de Juillet avec un taux d'humidité de (25.67%).

## I.4. Étude hydrogéologique

### I.4.1. Le système Aquifère du Sahara Septentrional

Le Système Aquifère du Sahara Septentrional « SASS » s'étend sur une vaste zone dont les limites sont situées en Algérie, Tunisie et Libye. Ce bassin englobe une série de couches aquifères qui ont été regroupées en deux réservoirs appelés le Continental Intercalaire (CI) et le Complexe Terminal (CT).

Le terme du « Continental intercalaire » désigne d'après son auteur (C. Kilian, 1932), un épisode continental localisé entre deux cycles sédimentaires marins:

- A la base, le cycle du Paléozoïque qui achève l'orogénèse hercynienne,
- Au sommet, le cycle du Crétacé supérieur.

Le Complexe Terminal est un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire et principalement du Miocène. Ces définitions ont été adoptées, à l'origine, pour analyser et schématiser, en vue de la modélisation, le fonctionnement hydrodynamique des aquifères algériens ...

La configuration structurale et le climat de la région Saharienne font que les réserves de ces deux nappes se renouvellent très peu: ce sont des réserves géologiques dont les exutoires naturels (sources et foggaras) ont permis le développement d'oasis où les modes de vie séculaires sont restés longtemps en parfaite symbiose avec l'écosystème saharien. (TAARIT, 2003)

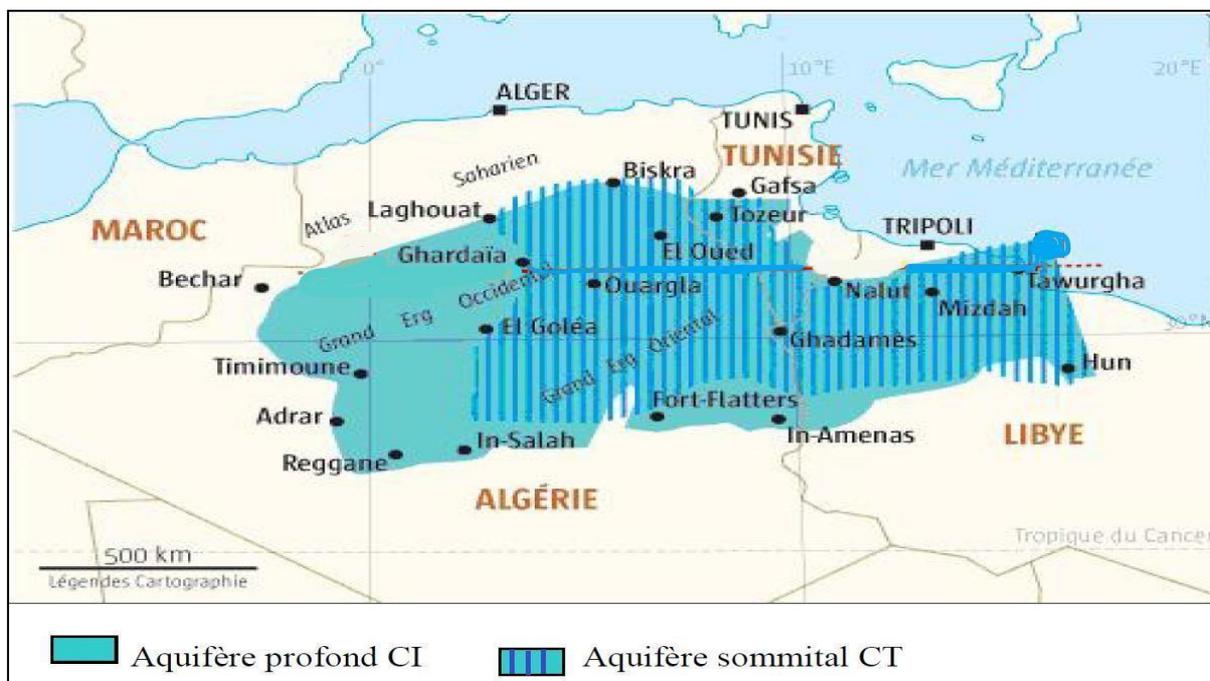


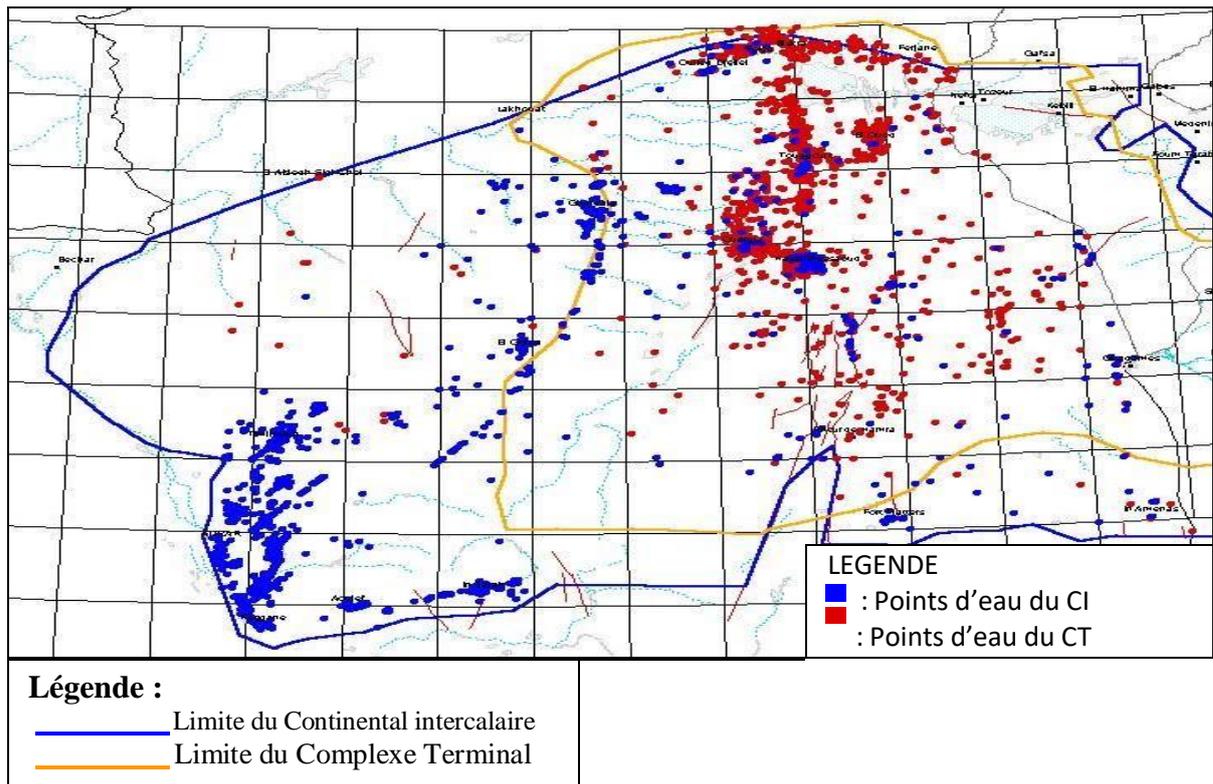
Figure I.8: Position géographique du SASS (Lyazidi.A, 2021).

❖ Les points d'eau du bassin saharien Algérien

L'état récapitulatif des points d'eau du bassin saharien situés en territoire algérien fait ressortir en l'an 2001, un total de 6108 points, se répartissant comme suit (TAARIT, 2003) :

Tableau I-1: Récapitulatif des points d'eau du bassin saharien en (2001)

Aquifère	Foggaras	Groupes de foggaras	Forages pompés	Forages artésiens	Forages pétroliers	Sources	Piézomètres	Total points d'eau
Continental intercalaire	701	176	1257	214	33		2	2383
Complexe terminal			3415	156	87	66	1	3725
<b>Total</b>	701	176	4672	370	120	66	3	<b>6108</b>



**Figure I.9:** Carte des points d'eau du CI et du CT en Algérie (2001)

#### I.4.1.1. Les Formations Acquières du Sahara Septentrional

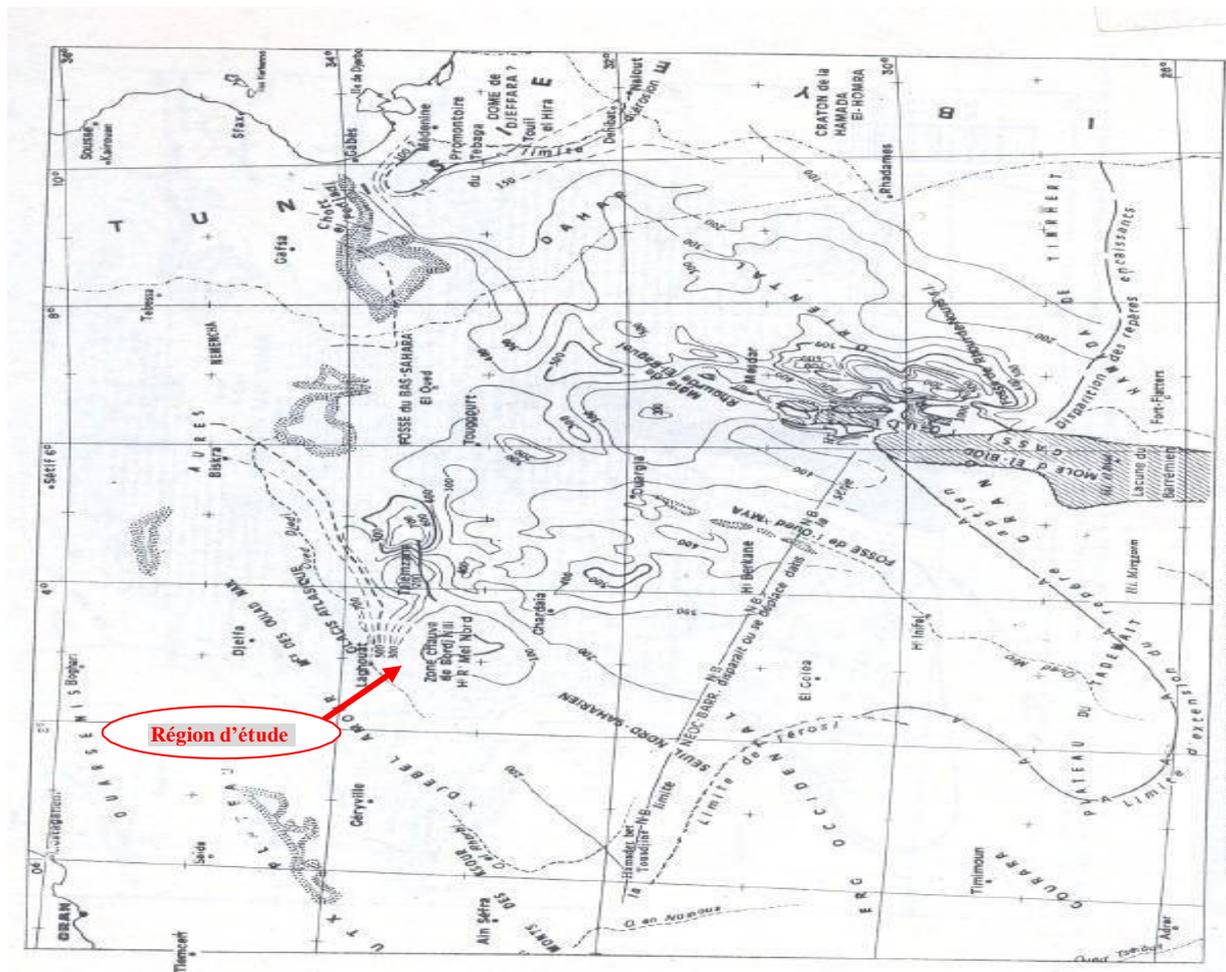
Le bassin du Sahara Septentrional est une entité géographique relativement étendue (près de 1000.000 km<sup>2</sup>). Sur le plan orographique, cette entité est limitée sur les bordures, par des reliefs qui sont principalement des chaînes montagneuses (l'Atlas saharien) et des plateaux (Dahar, Tademaït, Tnirhert, etc..). Avec un réseau hydrographique relativement peu dense et à moitié fossilisé, ce bassin s'individualise en trois sous-entités qui sont les deux sous-bassins du Grand Erg Occidental et du Grand Erg Oriental et le plateau de la Hamada El Hamra...

En Sahara algérien, les travaux de (BUSSON, 1970) et de (FABRE, 1976) constituent les références de base pour une bonne compréhension de la géologie du Sahara algérien. La description stratigraphique des formations influençant les nappes de cette zone, est limitée à la base du Trias.

➤ **Le Trias:** montre une grande variation de faciès et des épaisseurs (BUSSON, 1970). Le Trias est divisé en grandes unités lithologiques distinctes:

- le Trias argilo-gréseux inférieur (Grès de Nezla),
- le Trias carbonaté,
- le Trias argilo-gréseux supérieur (Grès de Tartrat),

- le Trias argileux, le Trias salifère.
- **Le Jurassique inférieur et moyen** : (Lias-Dogger) comprend essentiellement des couches lagunaires constituées de sel, d'anhydrite et d'argiles qui deviennent par la suite, marines et se présentent sous forme de calcaires et argiles avec des bancs d'anhydrite. La transgression jurassique couvre tous le bassin du Grand Erg Oriental et les séries jurassiques y sont épaisses.
- **Le Crétacé inférieur** : est constitué par des couches terrigènes continentales azoïques qui sont en contraste lithologique et sédimentaire avec les formations marines du Jurassique supérieur. Le Crétacé inférieur comprend, en partant des formations les plus anciennes (TAARIT, 2003) :
  - Le Néocomien
  - Le Barrémien
  - L'Aptien
  - L'Albien



**Figure I.10:** Carte en isopaque du Barrémien de la plateforme saharienne (Bassin algéro-tunisien). Equidistance 100 m. (BUSSON, 1970)

### I.4.2. Situation géologique du champ de Hassi R'Mel

La structure de Hassi R'Mel plonge en pente douce vers le Nord, en direction de la flexure Sud-Atlasique tout en se prolongeant vers le Sud-ouest par la petite structure anticlinale du Djebel Bissa. Elle se limite l'Est par la dépression d'oued Mya. (Sonatrach, 1972)

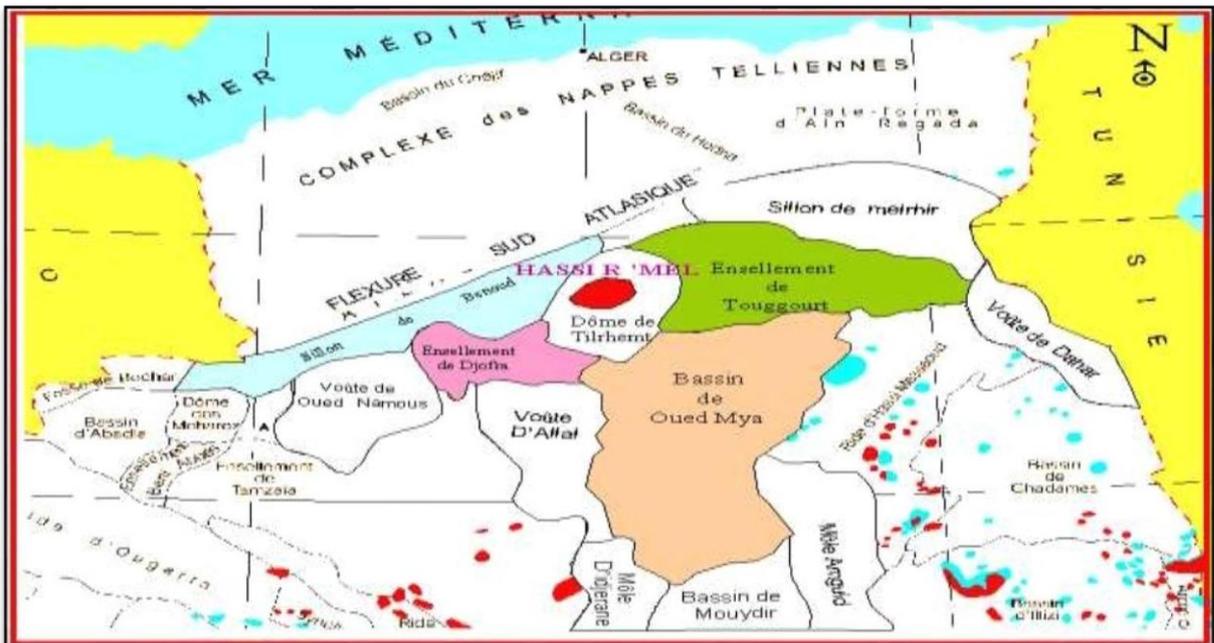


Figure I.11: Situation géologique du champ de Hassi R'Mel

### I.4.3. Structure de Hassi R'mel

L'analyse structurale de la région de Hassi R'mel nous a permis de répertorier trois traits paléogéographiques majeurs et qui sont :

- L'héritage des mouvements Autrichiens.
- Les mouvements Atlasiques.
- La morphologie Anti Mio-Pliocène.

Ces mouvements ont permis l'individualisation de trois zones, marquées par de nombreuses culminations et dépressions d'ampleur variable;

- **Zone Sud**, affectée par de nombreuses failles de rejet parfois important (100 m)
- **Partie Centre**, apparaît comme un plateau faiblement ondulé pour les formations mésozoïques,
- **Partie Nord**, est fortement affectée par les mouvements tectoniques particulièrement pour les formations post jurassique.

Des failles assez profondes ont donné naissance à des horsts et grabens et favorisant le dépôt du Miopliocène. L'étude a discerné l'existence de trois principales nappes :

- **Une nappe superficielle libre d'âge du Turonien;** Calcaire dolomitique et dolomie vacuolaire profondeur (0 à 150 m).
- **Une nappe captive d'âge Albien;** Grès fins friables à ciment argileux, profondeur de (150 à 450 m).
- **Une nappe captive Barrémien;** Grès moyens à ciment carbonaté et argileux, profondeur de (480 à 540 m). (*Gaci.N, 2020*)

#### **I.4.3.1. La nappe superficielle du Sénono-Turonien**

L'analyse géo-structurale portée dans la zone d'étude nous a permis de distinguer que cette dernière est compartimentée en trois zones du Nord vers le Sud, il s'agit des creux d'effondrements, surtout dans la partie nord ce qui a favorisé l'accumulation de forte épaisseur de dolomie et des formations calcaire-dolomitique.

Le complexe calcaire-dolomitique qui constitue la nappe phréatique ne se produit qu'à la faveur des karsts, liés au développement d'une fissuration et la présence de grandes fractures, pouvant facilement atteindre la surface du sol. Les dolomies massives de ce niveau sont très peu perméables.

##### **a- Zone nord:**

Zone à structure complexe, représentée par plusieurs blocs de grabens, de direction Est-Ouest et dont le plus favorable est en production au niveau des puits HRH 126, HRH 127, et HRH 145, HRH 139, HRH 160, HRH 161, où la nappe est plus profonde de 150 à 220 m en moyenne. La hauteur moyenne d'eau est de 100 m. Le niveau statique de plan d'eau se trouve à cote absolue de + 638 m (par rapport au niveau de la mer).

##### **b- Zone centrale:**

Cette zone se présente sous forme d'une grande gouttière s'étendant de puits HRH 114 à l'Est au HRH 107 à l'Ouest sur environ 15 km. La hauteur moyenne initiale d'eau était de 40 m et le niveau piézométrique à la côte absolue (+ 700 m). Cette zone est productive au niveau des puits (HRH 106, 137, 147, 152, 132, 114, 137).

##### **c- Zone sud :**

Peu connue, cette zone est localisée dans l'axe HRH 148 - HRH 122 -HRH 123. Sa longueur est très limitée, la hauteur moyenne initiale d'eau était de 40 m, avec une profondeur moyenne de (25 à 75 m). Le niveau piézométrique est à la côte absolue (+ 700 m). La zone

sud et la zone centrale, ayant les mêmes côtes piézométriques, ne semblent pas présenter une limite qui les sépare. (Gaci.N, 2020)

## **I.5. Conclusion**

La région du Hassi R'mel est située au Nord de la plate-forme saharienne au sud d'Algérie, elle est caractérisée par un climat désertique dont l'aridité est importante; et une faible pluviométrie moyenne annuelle soit 84 mm, la température moyenne annuelle est de 19,95°C. La période sèche s'étale sur toute l'année.

Sur le plant structurel la région d'étude est représentée par des formations tertiaires et quaternaires, constituées par des grès fins, des calcaires et argiles d'âge Cénomaniens, et des dolomies vacuolaires et calcaires. La nappe phréatique du Senono-Turonien est l'exploitable, cette dernière a une épaisseur qui varie de 25 à 220 m, elle est compartimentée en trois zones (nord, centre et sud), caractérisée par une forte production au niveau de la zone nord.

Examiner la façon dont l'eau voyage au cours de son cycle, dans notre région d'étude, nous permet de mieux comprendre ses interactions avec l'environnement et de mieux évaluer sa quantité et notamment sa qualité pour la consommation.

# **Chapitre II**

## **Présentation des données et méthodes de calcul**

## II.1. Introduction

La composition physico-chimique de l'eau joue un rôle très important dans la détermination de sa qualité et sa classification.

Dans ce chapitre nous allons présenter les paramètres physiques les plus importants de l'étude (précisément la conductivité électrique), le fonctionnement d'un conductimètre, les exemples des échantillons sur lesquels nous allons travailler ainsi que les modèles de calcul théorique de la conductivité utilisés par la suite.

## II.2. Les Paramètres Physiques

### II.2.1. Température

Bien que la température puisse être de peu d'intérêt dans l'évaluation de la qualité d'une eau souterraine elle peut s'avérer être une mesure très utile à certains moments, Par exemple, les dépotoirs municipaux engendrent des réactions exothermiques qui augmentent la température des eaux souterraines dans les milieux qui reçoivent les lixiviats de ces sites (*Nielsen, 1991*).

Outre l'infiltration d'eaux de surface, des variations de température dans l'eau d'un aquifère peuvent s'expliquer par d'autres phénomènes. (*Michalski, 1989*) mentionne, comme autres causes possible, les différences de conductivité hydraulique dans l'aquifère, la présence de lits confinants, ou encore la présence de fractures dans le roc aquifère. La température peut aussi servir à déterminer l'importance des échanges verticaux à l'intérieur d'un puits.

De façon générale, la température affecte les quantités de minéraux et de gaz dissous. La solubilité des solides augmente avec la température (*Driscoll.F.G, 1986*), alors que la solubilité des gaz varie à l'inverse de la température. Même si les quantités d'oxygène dissous nécessaires à l'auto-épuration d'une eau diminuent avec une augmentation de température. L'accélération des vitesses d'oxydation qui résulte d'une telle hausse fait en sorte d'accélérer les processus d'autoépuration (*Rodier, 1978*), du moins tant qu'il y a suffisamment d'oxygène disponible. La température des eaux souterraines pour les trente premiers mètres de l'aquifère devrait dans la plupart des cas correspondre à la moyenne annuelle de la température de l'air ambiant. (*Nielsen, 1991*)

### II.2.2. pH

Le pH joue un rôle primordial dans les propriétés physicochimiques de l'eau (acidité, agressivité), dans les processus biologiques et dans l'efficacité de certains traitements de l'eau (adoucissement, contrôle de la corrosion, désinfection).

Le pH des eaux souterraines varie en fonction du terrain traversé. Ainsi, des eaux ayant percolé à travers des terrains calcaires auront un pH élevé alors que celles ayant rencontré des terrains à fortes proportions de silice auront un pH bas, soit de 7 ou moins (*Rodier, 1978*). Le pH de la majorité des eaux souterraines résulterait de l'équilibre entre le CO<sub>2</sub>, provenant de l'atmosphère et de l'activité biologique, et les carbonates et bicarbonates provenant des roches carbonatées (*Driscoll.F.G, 1986*). Ce paramètre peut aussi servir à détecter la pollution provenant de solutions tamponnées tels les lixiviats de dépotoirs municipaux, qui amènent les valeurs de pH faibles (acides) et élevés (alcalins) à des valeurs de pH voisines de la neutralité. (*Nielsen, 1991*)

### II.2.3. Conductivité électrique

La mesure de la conductivité électrique d'une eau permet de déterminer de façon rapide mais approximative sa minéralisation globale (*Rodier, 1978*). C'est en fait la mesure de la teneur globale en électrolyte d'une solution (*Tardat-Henri 1985*). Elle peut donc servir à estimer la concentration en sel dissous, mais elle ne donne toutefois aucun renseignement quant à la pollution organique et ses variations (*Nielsen, 1991*). La conductivité électrique est mesurée en micro-siemens/cm. Sa valeur sera grandement affectée par la température de l'eau; une augmentation de un degré celcius causant une augmentation de la conductivité de 2% (*Nielsen, 1991*).

De façon générale, on peut dire que pour un aquifère donné, l'eau située à plus grande profondeur sera plus vieille et plus riche en solides dissous, donc de conductivité électrique plus élevée, que l'eau plus jeune située à une profondeur moindre (*MillerJ, 1982*). Cela est logique puisqu'un temps de percolation plus grand permet la mise en solution d'une plus grande quantité de matière. La conductivité électrique peut aussi servir à déterminer la provenance de la recharge dans un aquifère, étant donné la conductivité relativement faible des eaux de recharge (*Michalski, 1989*).

### II.2.3.1. La conductivité mesurée

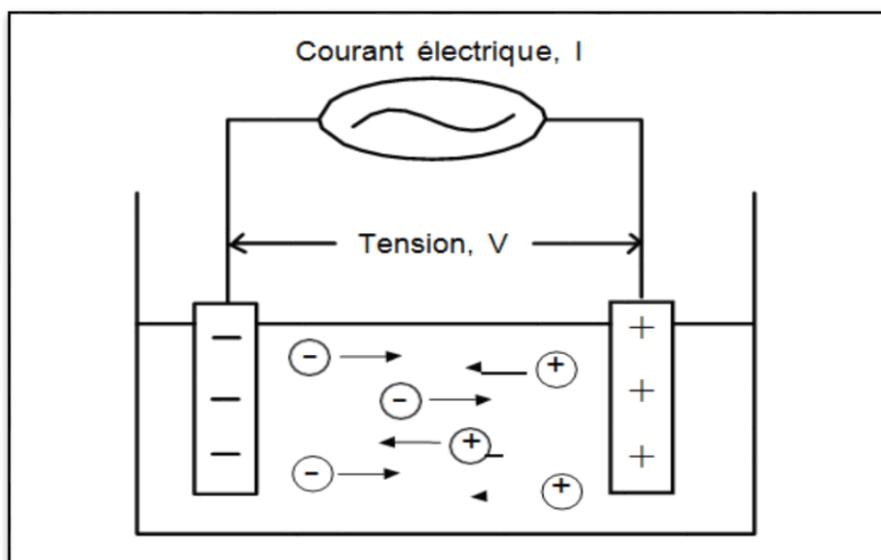
La conductivité est la capacité d'une solution, d'un métal ou d'un gaz, autrement dit de tous les matériaux à faire passer un courant électrique. Dans une solution, ce sont les anions et les cations qui transportent le courant alors que dans un métal ce sont les électrons.

Un certain nombre de facteurs entre en jeu pour qu'une solution conduise l'électricité :

- la concentration
- la mobilité des ions
- la valence des ions
- la température

Chaque substance possède un certain degré de conductivité. Pour les solutions aqueuses, le niveau de la force ionique s'étend des très faibles conductivités pour les eaux ultra pures jusqu'aux très fortes conductivités pour des échantillons chimiques concentrés.

La conductivité se mesure en appliquant un courant électrique alternatif (I) à deux électrodes immergées dans une solution et en mesurant la tension (V) qui en résulte. Lors de cette expérience, les cations migrent en direction de l'électrode négative, les anions se dirigent vers l'électrode positive et la solution se comporte comme un conducteur électrique. (SAS, 2004)



**Figure II.1:** Migration des ions en solution (SAS, 2004)

### II.2.3.2. Le fonctionnement de Conductimètre

Un conductimètre applique un courant alternatif ( $I$ ) à une fréquence optimale à deux électrodes actives, puis il mesure le potentiel ( $V$ ) qui en résulte. Le courant et le potentiel vont tous deux être utilisés pour déterminer la conductance ( $I/V$ ).

En se servant de la conductance obtenue et de la constante de cellule, le conductimètre va afficher la conductivité. (SAS, 2004)

$$\text{Conductivité} = \text{Constante de cellule} \times \text{Conductance}$$

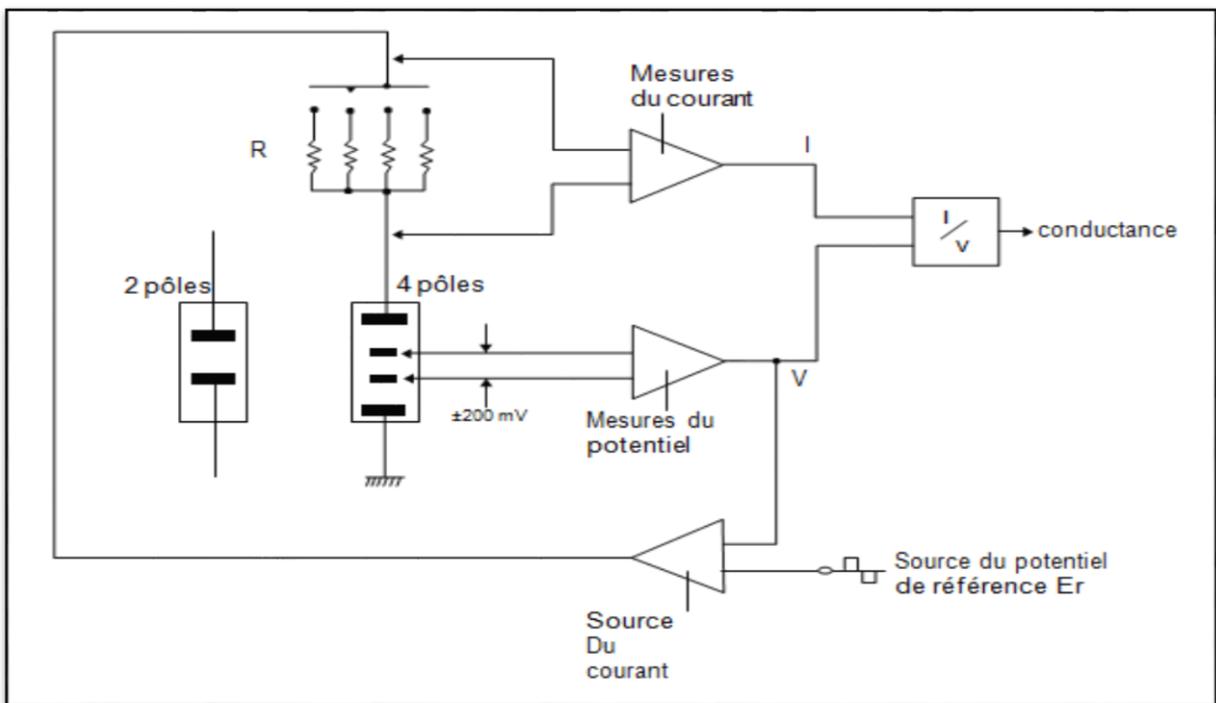


Figure II.2: Diagramme simplifié d'un conductimètre (SAS, 2004)

#### ▪ Conductivité

La conductivité d'un échantillon varie avec la température.

$$k = G \times K \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- $k$  : Conductivité (S/cm)
- $G$  : Conductance (S), avec  $G = 1/R$
- $K$  : Constante de cellule ( $\text{cm}^{-1}$ )

#### ▪ Résistance

La résistance d'une solution  $R$  se calcule à partir de la loi d'Ohm:

$$(V = R \times I)$$

$$R = V/I \quad (\text{II.2})$$

Avec :

- **V** : Tension (volts)
- **I** : Courant (ampères)
- **R** : Résistance de la solution ( $\Omega$ )

#### ▪ **Conductance**

La conductance  $G$  est définie comme étant l'inverse de la résistance électrique  $R$  d'une solution entre deux électrodes.

$$G = 1/R \text{ (S)} \quad (\text{II.3})$$

Dans la pratique, les conductimètres mesurent la conductance et affichent la conductivité après avoir effectué les opérations de conversion.

#### ▪ **La constante de cellule**

C'est le rapport de la distance ( $d$ ) entre les électrodes sur la surface des électrodes ( $a$ )

$$K = d/a \quad (\text{II.4})$$

Avec :

- **K** : Constante de cellule ( $\text{cm}^{-1}$ )
- **a** : Surface réelle des électrodes ( $\text{cm}^2$ )
- **d** : distance entre les électrodes (cm)

#### ▪ **Résistivité**

La résistivité est l'inverse de la conductivité et s'exprime en  $\Omega \cdot \text{cm}$ . Dans les mesures sur des eaux ultra pures où la valeur de la conductivité est extrêmement faible, on préférera utiliser la résistivité.

#### ▪ **Étalonnage**

L'étalonnage sert à déterminer la constante de cellule, qui est nécessaire pour convertir la valeur de conductance d'un échantillon en conductivité.

#### ▪ **Étalon de conductivité**

Une solution de conductivité connue est utilisée pour étalonner la chaîne de mesure de conductivité.

**▪ Température de référence**

Pour être comparables entre elles, les mesures de conductivité sont souvent ramenées à une température spécifique, en général 20 °C ou 25 °C.

**▪ Correction automatique de la température**

Il s'agit d'un algorithme qui va automatiquement calculer la conductivité d'un échantillon à une température de référence.

**▪ Correction du câble**

La correction du câble prend en compte la résistance et la capacitance du câble.

$$G_m = \frac{G_s}{1+(R_s \times G_s)} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- $G_m$  : Conductance mesurée (siemens)
- $G_s$  : Conductance de la solution (siemens)
- $R_c$  : Résistance du câble ( $\Omega$ )

**II.2.3.3. Les paramètres qui influencent la mesure**

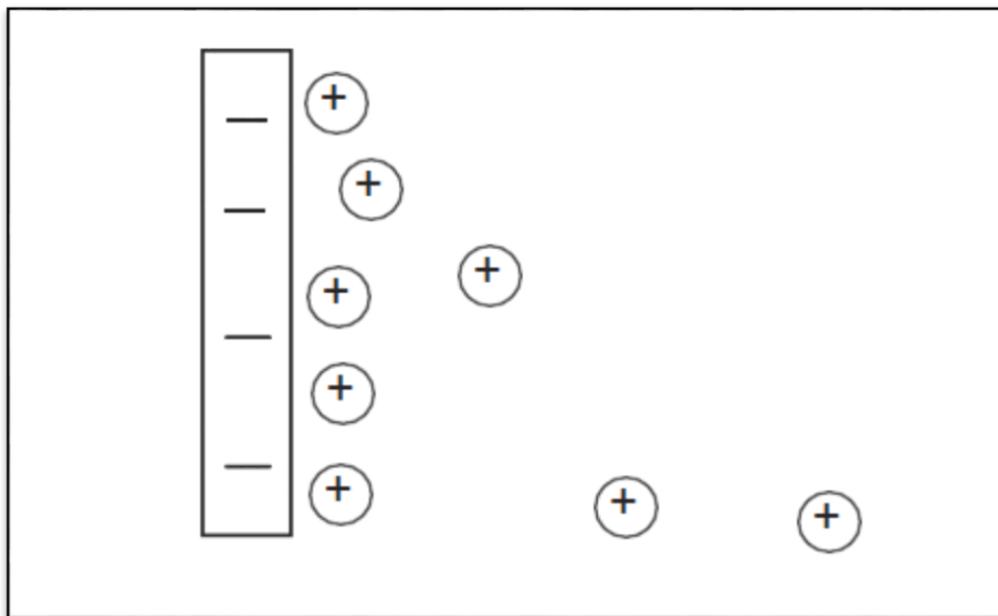
L'exactitude d'une mesure de conductivité peut être influencée par les paramètres ci-dessous :

- Polarisation
- Contamination
- Géométrie
- Résistance du câble
- Capacitance du câble
- Changement de fréquence
- Température

**II.2.3.3.1. Polarisation**

Imposer un courant électrique à des électrodes en solution risque de provoquer une accumulation d'espèces ioniques à proximité de la surface de l'électrode et d'entraîner des réactions à la surface. Ceci va augmenter la résistance de polarisation à la surface de l'électrode, laquelle peut être considérée comme un élément parasite puisque l'on cherche à

mesurer uniquement la résistance de la solution. Cette résistance de polarisation est responsable d'une erreur sur les résultats. (SAS, 2004)



**Figure II.3:** Accumulation d'espèces ioniques à la surface de l'électrode (SAS, 2004)

#### II.2.3.3.2. Contamination de la surface des électrodes

Un dépôt à la surface des électrodes d'une cellule à 2 pôles aura le même effet qu'une erreur de polarisation, soit une lecture de conductivité plus faible que la normale. Ces effets peuvent aussi être évités lorsqu'on travaille avec une cellule à 4 pôles. (SAS, 2004)

#### II.2.3.3.3. Les erreurs dues à la géométrie - Effets de champ

Certaines erreurs sont dues aux effets de champ – c'est la partie du champ qui se trouve en dehors de l'espace géométrique défini par les 2 pôles de la cellule. Ces lignes de champ peuvent affecter la mesure si elles rencontrent un élément avec lequel elles vont interférer, par exemple les parois du bécher.

Les cellules à 3 et 4 pôles ont une construction qui minimise cet effet. Lorsque l'intégralité du champ est contenue à l'intérieur du corps de la cellule, il n'y a plus de risque d'interférence avec les parois du bécher. (SAS, 2004)

#### II.2.3.3.4. La résistance du câble

Un câble d'une longueur donnée a une certaine résistance. La résistance du câble induit une erreur sur le résultat, il faut donc la prendre en compte.

Il faut compenser la résistance du câble dans les cas suivants :

- Solution de faible résistance (en dessous de  $50\Omega$ ), c'est-à-dire pour les mesures de forte conductivité,
- Mesures réalisées avec des cellules à 2 ou 3 pôles.

La valeur de la résistance du câble est généralement indiquée par le fabricant. (SAS, 2004)

#### **II.2.3.3.5. La capacitance du câble**

Un câble blindé d'une longueur donnée a une certaine capacité. Lorsqu'on mesure des conductances faibles (inférieures à  $4\ \mu\text{S}$ ), la capacitance du câble n'est pas négligeable et doit être prise en considération.

Il faut compenser la capacitance du câble dans les cas suivants :

- Utilisation d'une cellule à 4 pôles,
- Mesures de faibles conductivités. (SAS, 2004)

### **II.3. Données de l'étude**

L'étude est basée sur trois séries d'échantillons de 17 Forages d'eau, du champ de Hassi R'mel, donc une totalité de (51 échantillons), Les données sont des résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques réalisées sur ces forages. L'ensemble des analyses ont été faites dans le cadre de campagnes, réalisées par laboratoire de CRD-SONATRACH (Boumerdés).

Les paramètres étudiés en question sont: Les paramètres physiques: (Température, pH et Conductivité Electrique). Les paramètres chimiques correspondant aux éléments majeurs ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ).

Les tableaux suivants présentent les résultats des analyses des trois séries d'échantillons des années (2018, 2019 et 2020).

**Tableau II.1:** Données d'analyses physico-chimique de la série des forages du champ Hassi R'mel (Année 2018)

	Nom du forage	CE (µs/cm)	T (°C)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	NA <sup>+</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)
<b>NORD</b>	HRH 126	1024.21	19.8	98.998	33.562	4.013	73.86	295.24	76.233	195	1.5
	HRH 127	1124.74	20.2	100.601	36.48	4.068	100.4	265.35	96.266	250	4.9
	HRH 138	1029.60	20.8	164.98	44.49	19.45	48.5	170.8	142.64	256	8
	HRH 139	919.68	20.7	95.39	33.075	3.462	48.52	326.716	60.454	130	8
	HRH 145	1019.50	19.4	104.609	35.021	3.749	64.18	304.39	78.892	182.5	3
	HRH 151	1124.95	20.6	106.94	28.8	10	88.5	342.21	68.07	208	3.3
<b>CENTRE</b>	HRH 105	773.19	19.6	74.228	26.266	4.75	49.72	247.05	69.496	115	1.5
	HRH 106	1148.57	19.5	128.256	39.301	6.42	64.41	250.1	151.756	231	1.8
	HRH 107	502.59	19	41.34	17.12	5.8	39	151.89	66.09	60	3.4
	HRH 114	1288.05	19.2	102.605	39.885	7.7	147.9	183	143.955	352	11.5
	HRH 132	1501.07	21	79.954	28.698	5.29	252.2	195.2	177.285	403	5.7
	HRH 137	711.24	20.8	70.06	24.806	5.69	42.62	219.6	56.731	120	1.6
	HRH 147	1322.81	20.7	145.09	46.208	8.53	107.8	268.4	262.382	165	1.8
<b>SUD</b>	HRH 122	1139.29	19.4	92.986	33.075	6.75	106.9	269.01	130.482	225	4.5
	HRH 123	760.67	20.6	68	38	6	45	269	63	88	3.8
	HRH 142	1155.28	19.6	114.468	39.496	7.14	91.29	268.4	102.542	253	1.2
	HRH 148	1103.39	19.9	102.925	35.313	6.19	79.05	268.4	85.097	260	1.3

**Tableau II.2:** Données d'analyses physico-chimique de la série des forages du champ Hassi R'mel (Année 2019)

	Nom du forge	CE (µs/cm)	T (°C)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	NA <sup>+</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)
<b>NORD</b>	HRH 126	1103.43	19	94.01	34.72	3.04	84.21	301.2	79.11	233.5	4.5
	HRH127	1103.43	19.2	101.03	36.75	3.64	97.78	277	62	285.47	43
	HRH 138	929.41	19.8	177.29	37.59	20.3	48	169.58	186.32	218	43
	HRH 139	936.19	20.8	100.52	34.56	2.8	49.64	374.07	53.55	95	43
	HRH 145	985.53	20.7	78.47	36.05	3.08	71.19	308.58	70.47	179.73	3
	HRH 151	962.02	19.4	104.2	33.66	3.52	52.85	308.66	61.84	165	1.6
<b>Centre</b>	HRH 105	754.52	20.6	78.557	25.293	5.46	53.14	207.4	69.496	133	1.5
	HRH 106	942.38	19.6	97.795	35.215	5.871	61.26	244	120.696	150	4.1
	HRH 107	925.40	21.3	61.91	28.94	21.5	100.5	238.51	146.08	104.52	3.7
	HRH 114	1372.05	19.4	97.314	40.177	7.74	175.1	183	157.429	380	6.8
	HRH 132	1501.07	20.6	76.954	28.698	5.29	152.2	195.2	177.285	303	1.4
	HRH 137	744.79	19.6	82.885	16.829	5.4	49.59	221.43	63.823	125	3.9
	HRH 147	1205.14	21	110.621	41.052	7.96	102.3	277.245	199.977	175	3.4
<b>SUD</b>	HRH 122	1287.65	19.8	125.05	29.184	6.45	105	269.62	130.482	298.763	3.3
	HRH 123	748.80	21.2	66	31	7	43	232	60	129	3.8
	HRH 142	1220.02	20.8	123.927	32.492	6.68	102.4	276.94	100.698	282.302	0.9
	HRH 148	1098.44	20.7	106.452	32.686	6.103	84.99	270.84	89.352	242.796	1.8

**Tableau II.3:** Données d'analyses physico-chimique de la série des forages du champ Hassi R'mel (Année 2020)

	Nom du forage	CE (µs/cm)	T (°C)	Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	K <sup>+</sup> (mg/l)	NA <sup>+</sup> (mg/l)	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	Cl <sup>-</sup> (mg/l)	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)
<b>NORD</b>	HRH 126	1103.43	19.4	104	49	4.00	67	284.00	85.00	280	4.5
	HRH 127	1103.43	20.6	126	47	4.00	46	342.00	62.00	210	43
	HRH 138	851.16	19.6	86.73	32.97	3.31	48.23	292.80	53.61	128	43
	HRH 139	1103.43	19.3	126	47	4.00	46	342.00	62.00	210	43
	HRH 145	1244.49	19.4	100	11	4.00	170	342.00	74.00	244	40
	HRH 151	981.12	20.6	107.04	35	5.72	54.9	323.30	63.47	155	1.6
<b>Centre</b>	HRH 105	769.78	19.6	78.076	23.25	5.19	55.91	207.40	76.59	137.5	1.5
	HRH 106	1029.69	19.9	114.428	38.912	5.82	56.56	248.27	132.08	185	1.4
	HRH 107	697.79	19.8	67.495	26.655	4.89	35	262.91	56.73	75	1.6
	HRH 114	1308.76	21	108.817	40.493	6.81	141.2	186.66	143.78	365	6.8
	HRH 132	1694.23	20.8	174.548	59.827	8.70	113.6	382.17	211.32	335	1.4
	HRH 137	761.35	20.7	70.34	25.171	5.67	43.04	217.16	56.73	120	3.9
	HRH 147	1448.99	19	135.486	42.464	8.14	119.7	283.04	294.29	200	3.4
<b>SUD</b>	HRH 122	1264.29	19.2	121.442	43.776	6.22	103.7	271.45	132.43	280	3.3
	HRH 123	1298.54	21	125	44	7.00	109	281.00	137.00	282	3.5
	HRH 142	1175.72	20.8	113.627	39.034	6.57	91.77	276.03	99.81	265	0.9
	HRH 148	1054.49	20.7	101.002	35.507	6.13	78.71	272.37	86.16	220	1.8

**Remarque :**

Les données relatives au paramètre de potentiel hydrogène (pH) ne sont pas mentionnés dans la présente étude.

## II.4. Modélisation de la conductivité électrique

Dans cette étude nous allons travailler avec plusieurs modèles de calcul de conductivité électrique, une totalité de 23 modèles. Chaque modèle fait intervenir des paramètres spécifiques et différents.

### II.4.1. Conductivité électrique d'une solution aqueuse ionique

$$\sigma = \sum \sigma_i \quad (\text{II.6})$$

Avec:

- $\sigma_i$ : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i.
- S: Siemens; où  $1\text{S}=1 \text{ A}\cdot\text{V}^{-1}=1 \text{ A}^2 \cdot \text{s}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### ▪ Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques

$$\sigma_i = \lambda_{i/z} \times C_i \quad (\text{II.7})$$

Avec:

- $\sigma_i$ : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i en  $\left(\frac{\text{S}}{\text{m}}\right)$ .
- $C_i$ : Concentration de l'ion i; en  $\left(\frac{\text{eq}}{\text{m}^3}\right)$ .
- $\lambda_{i/z}$ : Conductivité molaire ionique de l'ion i;  $\left(\frac{\text{S}\cdot\text{m}^2}{\text{eq}\cdot\text{mol}\times Z(-)}\right)$
- $Z_i(-)$ : Valence de l'ion i (nombre de charges)

#### ▪ Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques

$$\sigma_i = \lambda_{i/z} \times a_i \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- $\sigma_i$ : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i en  $\left(\frac{\text{S}}{\text{m}}\right)$ .
- $\lambda_{i/z}$ : Conductivité molaire ionique de l'ion i  $\left(\frac{\text{S}\times\text{m}^2}{\text{eq}\cdot\text{mol}\times Z(-)}\right)$ .
- $a_i$ : Activité l'ion i en  $\left(\frac{\text{eq}}{\text{m}^3}\right)$  où  $a_i = \gamma_i \times C_i$ .

▪ **Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques**

$$\sigma_i = \frac{\lambda_{i/z} \times C_i}{\sum C_i^{0.03}} \quad (\text{II.9})$$

Avec :

- $\sigma_i$ : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i en ( $\frac{S}{m}$ ).
- $\lambda_{i/z}$ : Conductivité molaire ionique de l'ion i en ( $\frac{S \cdot m^2}{eq}$ ).
- $C_i$ : Concentration de l'ion i; en ( $\frac{eq}{m^3}$ ).

▪ **Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques**

$$\sigma_i = \frac{\lambda_{i/z} \times a_i}{\sum a_i^{0.03}} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

- $\sigma_i$ : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i en ( $\frac{S}{m}$ ).
- $\lambda_{i/z}$ : Conductivité molaire ionique de l'ion i en ( $\frac{S \cdot m^2}{eq}$ ).
- $a_i$ : Activité l'ion i en ( $\frac{eq}{m^3}$ ).

▪ **Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques**

$$\sigma_i = \frac{D_i \times Z \times N_A \times e^2 \times C_i}{K_B \times T(^{\circ}K)} \quad (\text{II.11})$$

Avec :

- $\sigma_i$ : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i en ( $\frac{S}{m}$ ).
- $D_i$ : Coefficient de diffusion de l'ion i ; ( $m^2/s$ ).
- $Z_i(-)$ : Valence de l'ion i (nombre de charges).
- $N_A$ : Nombre d'Avogadro ;  $6,022140857 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .
- $1 e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ .
- $C_i$ : Concentration de l'ion i; en ( $\frac{eq}{m^3}$ ).
- $T$ : température.
- $k_B = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ .

▪ **Modèle de Nernst-Einstein basé sur les activités ioniques**

$$\sigma_i = \frac{D_i \times Z \times N_A \times e^2 \times a_i}{K_B \times T(^{\circ}K)} \quad (\text{II.12})$$

Avec :

- $\sigma_i$  : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i en  $(\frac{S}{m})$ .
- $D_i$  : Coefficient de diffusion de l'ion i ;  $(m^2/s)$ .
- $Z_i(-)$  : Valence de l'ion i (nombre de charges).
- $N_A$  : Nombre d'Avogadro ;  $6,022140857 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ .
- $1 e = 1,602.10^{-19} \text{ C}$ .
- $a_i$  : Activité de l'ion i ; en  $(\frac{eq}{m^3})$ .
- $T$  : température.
- $k_B = 1,3806 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

▪ **Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau  $\sigma$  (en fonction desteneurs ioniques)**

$$\sigma = 10 \times \frac{\sum \text{Cations} + \sum \text{Anions}}{2} \quad (\text{II.13})$$

Avec :

- $\sigma$  : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i en  $(\frac{mS}{m})$ .
- $\sum \text{Cations}$  : La somme des concentrations des cations en  $(\frac{meq}{l})$ .
- $\sum \text{Anions}$  : La somme des concentrations des anions en  $(\frac{meq}{l})$ .

▪ **Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau  $\sigma$  en fonction de laforce ionique**

$$\sigma = \frac{0.5 \times \sum (C_i \times Z_i)}{0.017} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

- $\sigma$  : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion i en  $(\frac{mS}{cm})$ .
- $C_i$  : Concentration de l'ion i ; en  $(\frac{eq}{l})$ .
- $Z_i(-)$  : Valence de l'ion i (nombre de charges).

- **Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau  $\sigma$  en fonction de  $TDS_{\max}$**

$$\sigma = 0.55 \times TDS_{\max} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

- $\sigma$  : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion  $i$  en  $\left(\frac{\text{mS}}{\text{m}}\right)$ .
- $TDS_{\max}$  : Résidus Secs en (ppm); ou  $TDS_{\max} = \sum [\text{ions (ppm)}] + [\text{SiO}_2 \text{ (ppm)}]$

- **Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau ( $\sigma$  en fonction de  $TDS_{\min}$ )**

$$\sigma = 0.75 \times TDS_{\min} \quad (\text{II.16})$$

Avec :

- $\sigma$  : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion  $i$  en  $\left(\frac{\text{mS}}{\text{m}}\right)$ .
- $TDS_{\min}$  : Résidus Secs en en (ppm);  $TDS_{\min} = \sum [\text{ions (ppm)}] + [\text{SiO}_2 \text{ (ppm)}] - \text{pertes}$  ou les pertes (mg/l) = 31.  $[\text{HCO}_3^- \text{ (meq/l)}]$

- **Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau ( $\sigma$  en fonction de  $TDS_{\text{moy}}$ )**

$$\sigma = 0.65 \times TDS_{\text{moy}} \quad (\text{II.17})$$

Avec :

- $\sigma$  : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion  $i$  en  $\left(\frac{\text{mS}}{\text{m}}\right)$ .
- $TDS_{\text{moy}}$  : Résidus Secs en en (ppm);  $TDS_{\text{moy}} = \frac{TDS_{\max} + TDS_{\min}}{2}$

- **Activité ionique**

$$a_i = \gamma_i \times C_i \quad (\text{II.18})$$

Avec :

- $a_i$  : Activité ionique
- $C_i$  : Concentration de l'ion
- $\gamma_i$  : coefficient ionique de l'ion  $i$

▪ **Coefficient ionique**

➤ **Selon Debye-Hückel limité (DHL)**

$$\log (\gamma_i) = -0.509 \times Z_i^2 \times \sqrt{I} \quad (\text{II.19})$$

Avec :

- I : Force ionique de la solution.

Et :

$$I = 0.5 \times \sum (C_i \times Z_i^2) \quad (\text{II.20})$$

➤ **Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)**

$$\text{Log} (\gamma_i) = -0.509 \times Z_i^2 \times \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad (\text{II.21})$$

➤ **Selon Legrand-Poirier**

$$\text{Log} (\gamma_i) = -0.509 \times Z_i^2 \times \frac{\sqrt{I}}{1 + 1.4 \times \sqrt{I}} \quad (\text{II.22})$$

➤ **Selon Debye-Hückel étendu (DHE)**

$$\text{Log} (\gamma_i) = -0.509 \times Z_i^2 \times \left( \frac{\sqrt{I}}{1 + 3.3 \times d_{e_i} \times \sqrt{I}} \right) \quad (\text{II.23})$$

Avec :

- $d_{e_i}$  : Diamètre effectif moyen de l'ion hydraté i.

➤ **Selon Debye-Hückel-Davies**

$$\text{Log} (\gamma_i) = -0.509 \times Z_i^2 \times \left( \frac{\sqrt{I}}{1 + 3.3 \times d_{e_i} \times \sqrt{I}} - 0.3 \times I \right) \quad (\text{II.24})$$

➤ **Conductivités molaires ioniques en ( $\text{Sm}^2 \cdot \text{eq}^{-1}$ ) à 25 °C**

**Tableau II.4:** Conductivités molaires ioniques en ( $\text{Sm}^2 \cdot \text{eq}^{-1}$ ) à 25 °C  
(Michalski, A. (1989))

Ion	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
$\lambda_{i/z}$	5,95.10 <sup>-3</sup>	5,31.10 <sup>-3</sup>	5,01.10 <sup>-3</sup>	7,35.10 <sup>-3</sup>	4.45.10 <sup>-3</sup>	8,0.10 <sup>-3</sup>	7,63.10 <sup>-3</sup>	7,142.10 <sup>-3</sup>

➤ **Coefficients de diffusion dans l'eau à 25°C de certains ions en (m<sup>2</sup>/s)**

**Tableau II.5:** Coefficients de diffusion dans l'eau à 25°C de certains ions en (m<sup>2</sup>/s)  
(Michalski, A. (1989))

Ion	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
D <sub>i</sub>	7,9.10 <sup>-10</sup>	7,04.10 <sup>-10</sup>	13,3.10 <sup>-10</sup>	19,6.10 <sup>-10</sup>	11,8.10 <sup>-10</sup>	10,6.10 <sup>-10</sup>	20,3.10 <sup>-10</sup>	19,0.10 <sup>-10</sup>

➤ **Diamètre effectif moyen de certains ions**

**Tableau II.6:** Diamètre effectif moyen de certains ions en (nm)  
(Michalski, A. (1989))

Ion	d <sub>ei</sub> (nm)
Mg <sup>2+</sup>	0,800
Ca <sup>2+</sup>	0,600
Na <sup>+</sup> , HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0,425
F <sup>-</sup> , Cl <sup>-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,300

➤ **Effet de la température**

$$\sigma_{25^{\circ}\text{C}} = \frac{\sigma_t}{1 + 0.02 \times (t - 25)} \quad (\text{II.25})$$

Avec :

- $\sigma_{25^{\circ}\text{C}}$ : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion à T= 25°C
- $\sigma_t$ : Conductivité électrique ionique engendrée par l'ion à T mesuré

## II.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les échantillons sur lesquels nous allons travailler, ainsi que les modèles de calcul théorique de la conductivité électrique qu'on va utiliser pour cette étude comparative.

Le prochain chapitre sera consacré pour la présentation des résultats et la discussion de ces derniers.

# **Chapitre III**

## **Calculs et interprétation des résultats**

### III.1. Introduction

La mesure de la conductivité est une méthode extrêmement répandue et utile, tout particulièrement dans des applications de contrôle de qualité. Cette étude est pour vérifier ce paramètre physique souvent donnée par les laboratoires des analyses physico-chimiques, sous forme de valeurs fixe (mesurées par un conductimètre). Pour cela nous avons suggéré des différents modèles de calcul théorique de la conductivité électrique, pour vérifier la validité de ces résultats, mais aussi la fiabilité des modèles que nous avons proposés.

On s'est fondé dans ce chapitre sur l'étude et l'interprétation des résultats que nous avons obtenus.

### III.2. Vérification de la fiabilité des données

#### II.2.1. Balance ionique

Avant de traiter et d'interpréter les données d'analyses des échantillons d'eaux prélevées au niveau des différentes forages du champ de Hassi R'mel, il faut analyser la fiabilité de ces derniers on utilisant la méthode de la Balance Ionique (BI). Le tableau ci-dessous présente les résultats trouvés pour les trois séries des échantillons d'eaux ; des années (2018, 2019 et 2020).

$$BI = \frac{\sum(\text{Cations}) - \sum(\text{Anions})}{\sum(\text{Cations}) + \sum(\text{Anions})} \times 100 \quad (\text{III.1})$$

**Tableau III.1:** Résultats de la balance ionique

Nom de Forage	IB (%) Séries d'année 2018	IB (%) Séries d'année 2019	IB (%) Séries d'année 2020
HRH 126	-0.2	-3.4	-2.8
HRH 127	0.5	-2.0	-0.6
HRH 138	8.2	4.5	-2.3
HRH 139	-1.09	-1.0	-0.6
HRH 145	-0.3	-3.7	0.0
HRH 151	-0.4	0.4	1.9
HRH 105	-1.6	1.8	-0.4
HRH 106	-2.3	-0.0	-0.6
HRH 107	-3.1	0.6	-1.9
HRH 114	1.5	1.6	0.8
HRH 132	2.2	-5.7	-1.1
HRH 137	-1.2	-1.7	-0.7
HRH 147	2.1	-1.2	-4.5
Nom de	IB (%)	IB (%)	IB (%)

Forage	Séries d'année 2018	Séries d'année 2019	Séries d'année 2020
<b>HRH 122</b>	-2.6	-3.6	0.9
<b>HRH 123</b>	3.2	-2.1	1.3
<b>HRH 142</b>	2.0	0.7	0.6
<b>HRH 148</b>	-2.4	-0.7	0.1

➤ **Interprétation des résultats d'indice de Balance:**

Les résultats montrent que les valeurs de l'indice de Balance ne dépassent pas les 10 %, donc les résultats des analyses des échantillons d'eaux à étudier sont acceptables.

### II.3. Modélisation de la conductivité électrique

Les résultats de calcul sont regroupés par série dans des tableaux, puis représentés sur des graphiques (courbes).

Nous avons évalué l'erreur relative commise sur le calcul de la conductivité électrique de l'eau avec la formule suivante :

$$\Delta\sigma(\%) = 100. \frac{|\sigma_{th \text{ à } T} - \sigma_{mes \text{ à } T}|}{\sigma_{mes \text{ à } T}}$$

Où :

- $\sigma_{th \text{ à } T}$  : Conductivité électrique théorique de l'eau (calculée), à la température de mesure.
- $\sigma_{mes \text{ à } T}$  : Conductivité électrique de l'eau (mesurée), à la température de mesure.

#### II.3.1. Résultats de calcul

**Tableau III.2:** Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S/cm}$ ) à 25°C (Année 2018)

Nom du puits	Conductivité mesurée	Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques		Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel-Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1024.21	1467.59	43	889.08	13	949.36	7	970.11	5	985.87	4	1011.53	1
HRH 127	1124.74	1667.32	48	983.87	13	1057.83	6	1083.16	4	1100.19	2	1131.89	1
HRH 138	1029.6	1848.94	79	983.75	4	1075.18	4	1106.40	7	1133.97	10	1183.47	15
HRH 139	919.68	1240.79	34	780.69	15	826.81	10	842.76	8	856.93	7	876.25	5
HRH 145	1019.5	1474.90	44	889.97	13	951.09	7	972.12	5	988.83	3	1014.77	0
HRH 151	1124.95	1536.52	36	932.41	17	994.31	12	1015.56	10	1031.65	8	1061.03	6
HRH 105	773.19	1093.53	41	725.95	6	760.17	2	772.09	0	782.29	1	797.06	3
HRH 106	1148.57	1798.62	56	1040.00	9	1122.82	2	1151.12	0	1171.41	2	1208.60	5
HRH 107	502.59	738.97	47	551.43	10	565.50	13	570.50	14	575.18	14	582.07	16
HRH 114	1288.05	2102.38	63	1194.12	7	1296.41	1	1331.19	3	1350.48	5	1397.07	8
HRH 132	1501.07	2308.74	53	1383.86	8	1492.09	1	1528.66	2	1541.00	3	1588.02	6
HRH 137	711.24	986.81	38	651.01	8	681.25	4	691.82	3	701.19	1	714.69	0
HRH 147	1322.81	2101.71	58	1285.56	3	1378.61	4	1410.09	7	1431.74	8	1474.52	11
HRH 122	1139.29	1715.30	50	1062.28	7	1131.66	1	1155.40	1	1170.34	3	1201.14	5
HRH 123	760.67	1052.60	38	698.89	8	731.54	4	742.90	2	755.12	1	769.87	1
HRH 142	1155.28	1753.35	51	1008.81	13	1089.33	6	1116.86	3	1136.98	2	1173.52	2
HRH 148	1103.39	1622.73	47	938.54	15	1011.19	8	1036.11	6	1053.63	5	1085.97	2

Tableau III.3: Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S/cm}$ ) à 25°C (Année 2018) (suite)

Nom du puits	Conductivité mesuré	Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques		Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel-Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1024.21	1337.45	131	821.78	20	875.88	14	882.52	14	909.22	11	931.53	9
HRH 127	1124.74	1514.12	135	906.91	19	973.08	13	902.76	20	1016.36	10	1039.16	8
HRH 138	1029.6	1675.28	163	908.13	12	989.90	4	1001.28	3	1043.23	1	1086.43	6
HRH 139	919.68	1134.87	123	723.47	21	764.96	17	775.54	16	792.19	14	809.34	12
HRH 145	1019.5	1344.18	132	822.79	19	877.64	14	1081.53	6	901.46	12	934.65	8
HRH 151	1124.95	1397.28	124	859.84	24	915.27	19	872.37	22	952.18	15	974.89	13
HRH 105	773.19	1005.18	130	675.13	13	706.03	9	728.47	6	725.34	6	739.27	4
HRH 106	1148.57	1631.48	142	958.49	17	1032.52	10	1043.64	9	1076.62	6	1108.94	3
HRH 107	502.59	557.92	111	517.55	3	530.37	6	526.05	5	539.58	7	545.45	9
HRH 114	1288.05	1587.88	123	1096.23	15	1187.36	8	1205.95	6	1236.11	4	1276.73	1
HRH 132	1501.07	1844.61	123	1262.69	16	1358.59	9	1168.31	22	1417.16	6	1443.34	4
HRH 137	711.24	700.08	98	607.04	15	634.41	11	644.69	9	652.37	8	664.63	7
HRH 147	1322.81	1470.49	111	1176.51	11	1259.04	5	1306.14	1	1304.82	1	1343.86	2
HRH 122	1139.29	1275.07	112	977.71	14	1039.68	9	1054.74	7	1074.49	6	1101.60	3
HRH 123	760.67	763.88	100	649.86	15	679.32	11	803.22	6	694.99	9	713.85	6
HRH 142	1155.28	1244.99	108	929.70	20	1001.71	13	1026.52	11	1044.17	10	1076.79	7
HRH 148	1103.39	1165.99	106	866.64	21	931.75	16	953.41	14	969.71	12	998.59	9

**Tableau III.4:** Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2018) (suite)

Nom du puits	Conductivité mesurée	Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques		Modèle de Nernst-Einstein sur la base des activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel-Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1024.21	1488.22	30	901.73	12	962.84	6	983.87	4	999.86	2	1025.88	0
HRH 127	1124.74	1688.48	36	996.58	11	1071.45	5	1097.09	2	1114.33	1	1146.43	2
HRH 138	1029.6	1869.14	66	994.83	3	1087.19	6	1118.73	9	1146.60	11	1196.66	16
HRH 139	919.68	1254.41	25	789.36	14	835.97	9	852.09	7	866.41	6	885.94	4
HRH 145	1019.5	1497.72	30	903.89	11	965.93	5	987.29	3	1004.25	1	1030.59	1
HRH 151	1124.95	1553.88	26	943.10	16	1005.67	11	1027.14	9	1043.42	7	1073.15	5
HRH 105	773.19	1109.82	28	736.87	5	771.58	0	783.68	1	794.02	3	809.02	5
HRH 106	1148.57	1826.25	42	1056.26	8	1140.32	1	1169.04	2	1189.64	4	1227.40	7
HRH 107	502.59	751.72	32	561.02	12	575.33	14	580.40	15	585.16	16	592.18	18
HRH 114	1288.05	2136.52	47	1213.90	6	1317.80	2	1353.12	5	1372.72	7	1420.07	10
HRH 132	1501.07	2331.96	43	1398.21	7	1507.49	0	1544.41	3	1556.87	4	1604.34	7
HRH 137	711.24	997.36	28	658.06	7	688.61	3	699.28	2	708.75	0	722.41	2
HRH 147	1322.81	2126.10	47	1300.84	2	1394.93	5	1426.75	8	1448.63	10	1491.91	13
HRH 122	1139.29	1742.13	36	1079.15	5	1149.58	1	1173.69	3	1188.85	4	1220.14	7
HRH 123	760.67	1064.61	28	706.96	7	739.97	3	751.46	1	763.81	0	778.73	2
HRH 142	1155.28	1779.31	37	1023.98	11	1105.65	4	1133.58	2	1153.99	0	1191.08	3
HRH 148	1103.39	1644.91	34	951.57	14	1025.18	7	1050.43	5	1068.19	3	1100.99	0

Tableau III.5: Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2018) (suite)

Nom du puits	Conductivité mesuré	Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction desteneurs ioniques)		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la force ionique)		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDS <sub>max</sub> )		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDS <sub>min</sub> )		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDS <sub>moy</sub> )	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1024.21	123.27	89	995.61	3	4281.23	318	4713.11	360	4572.17	346
HRH 127	1124.74	137.39	89	1119.62	0	4719.36	320	5424.44	382	5139.30	357
HRH 138	1029.6	146.19	87	1294.25	26	4701.73	357	5760.66	460	5274.58	412
HRH 139	919.68	107.09	89	875.38	5	3880.89	322	4047.27	340	4047.07	340
HRH 145	1019.5	124.16	89	998.58	2	4269.88	319	4662.76	357	4543.64	346
HRH 151	1124.95	130.06	89	1051.75	7	4707.01	318	5114.75	355	4997.81	344
HRH 105	773.19	92.92	89	730.47	6	3234.06	318	3468.76	349	3414.16	342
HRH 106	1148.57	145.04	89	1184.12	3	4801.74	318	5594.88	387	5261.84	358
HRH 107	502.59	62.35	89	461.59	8	2115.52	321	2306.06	359	2249.37	348
HRH 114	1288.05	167.45	89	1333.40	4	5437.00	322	6716.82	421	6123.39	375
HRH 132	1501.07	185.54	89	1437.64	4	6310.30	320	7861.20	424	7135.33	375
HRH 137	711.24	83.29	89	685.14	4	2976.09	318	3221.58	353	3154.61	344
HRH 147	1322.81	170.75	88	1343.83	2	5528.66	318	6516.41	393	6090.71	360
HRH 122	1139.29	140.93	89	1090.46	4	4777.87	319	5490.28	382	5202.41	357
HRH 123	760.67	91.61	89	737.09	3	3194.40	320	3331.05	338	3331.05	338
HRH 142	1155.28	144.02	89	1174.17	2	4826.45	318	5558.86	381	5260.83	355
HRH 148	1103.39	132.91	89	1097.82	1	4610.51	318	5264.40	377	5005.63	354

Tableau III.6: Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2019)

Nom du puits	Conductivité mesuré	Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques		Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel-Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1103.43	1595.52	45	953.30	14	1021.77	7	1045.29	5	1061.45	4	1090.12	1
HRH 127	1103.43	1743.11	58	999.74	9	1080.96	2	1108.76	0	1126.92	2	1161.69	5
HRH 138	929.41	1976.22	113	1103.61	19	1196.32	29	1227.89	32	1253.66	35	1303.96	40
HRH 139	936.19	1264.95	35	816.20	13	861.69	8	877.40	6	891.96	5	910.70	3
HRH 145	985.53	1346.75	37	841.84	15	893.55	9	911.40	8	925.15	6	946.58	4
HRH 151	962.02	1366.08	42	825.79	14	881.20	8	900.32	6	916.53	5	939.92	2
HRH 105	754.52	1089.79	44	707.74	6	743.42	1	755.84	0	766.19	2	781.87	4
HRH 106	942.38	1436.12	52	903.32	4	957.49	2	976.15	4	991.12	5	1014.99	8
HRH 107	925.4	1335.17	44	944.87	2	977.97	6	989.37	7	999.65	8	1020.98	10
HRH 114	1372.05	2222.57	62	1265.84	8	1375.27	0	1412.38	3	1431.18	4	1480.99	8
HRH 132	1501.068	1892.21	26	1173.99	22	1252.99	17	1279.92	15	1291.22	14	1325.15	12
HRH 137	744.79	1064.32	43	704.40	5	737.30	1	748.78	1	757.61	2	772.07	4
HRH 147	1205.14	1819.22	51	1142.35	5	1216.10	1	1241.21	3	1258.36	4	1291.81	7
HRH 122	1287.65	1918.09	49	1100.97	14	1191.61	7	1222.50	5	1240.42	4	1280.94	1
HRH 123	748.8	1034.44	38	674.59	10	707.34	6	718.75	4	729.39	3	744.53	1
HRH 142	1220.02	1785.53	46	1016.27	17	1100.61	10	1129.41	7	1148.30	6	1186.27	3
HRH 148	1098.44	1588.45	45	933.79	15	1003.18	9	1026.98	7	1043.56	5	1074.34	2

Tableau III.7: Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2019) (Suite)

Nom du puits	Conductivité mesuré	Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques		Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel-Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1103.43	1451.55	132	879.92	20	941.29	15	962.34	13	976.74	11	1002.38	9
HRH 127	1103.43	1582.02	143	921.62	16	994.32	10	1019.17	8	1035.31	6	1066.35	3
HRH 138	929.41	1788.58	192	1016.38	9	1099.07	18	1127.19	21	1150.03	24	1194.79	29
HRH 139	936.19	1155.53	123	754.95	19	795.79	15	809.88	13	822.91	12	839.71	10
HRH 145	985.53	1229.38	125	778.70	21	825.15	16	841.16	15	853.45	13	872.66	11
HRH 151	962.02	1247.52	130	764.92	20	814.75	15	831.92	14	846.43	12	867.42	10
HRH 105	754.52	1001.69	133	658.60	13	690.82	8	702.03	7	711.33	6	725.48	4
HRH 106	942.38	1310.42	139	835.41	11	884.00	6	900.72	4	914.09	3	935.46	1
HRH 107	925.4	1037.96	112	871.55	6	901.14	3	911.33	2	920.49	1	939.58	2
HRH 114	1372.05	1710.76	125	1159.81	15	1257.12	8	1290.07	6	1306.65	5	1350.82	2
HRH 132	1501.068	1486.33	99	1077.39	28	1147.77	24	1171.73	22	1181.70	21	1211.87	19
HRH 137	744.79	725.63	97	655.92	12	685.67	8	696.03	7	703.98	5	717.04	4
HRH 147	1205.14	1323.92	110	1048.46	13	1114.10	8	1136.43	6	1151.59	4	1181.31	2
HRH 122	1287.65	1361.04	106	1012.34	21	1093.22	15	1120.75	13	1136.63	12	1172.70	9
HRH 123	748.8	756.54	101	628.20	16	657.80	12	668.10	11	677.67	9	691.34	8
HRH 142	1220.02	1253.90	103	935.64	23	1011.00	17	1036.70	15	1053.48	14	1087.32	11
HRH 148	1098.44	1129.79	103	861.84	22	924.00	16	945.29	14	960.07	13	987.58	10

**Tableau III.8:** Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2019) (Suite)

Nom du puits	Conductivité mesurée	Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques		Modèle de Nernst-Einstein sur la base des activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel-Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1103.43	1622.28	29	969.47	12	1039.07	6	1062.98	4	1079.41	2	1108.56	0
HRH 127	1103.43	1771.07	42	1015.99	8	1098.49	0	1126.73	2	1145.17	4	1180.50	7
HRH 138	929.41	2005.15	93	1120.16	21	1214.16	31	1246.17	34	1272.30	37	1323.36	42
HRH 139	936.19	1278.53	25	825.05	12	871.01	7	886.89	5	901.60	4	920.55	2
HRH 145	985.53	1361.43	26	851.16	14	903.42	8	921.45	7	935.35	5	957.01	3
HRH 151	962.02	1387.14	28	838.64	13	894.89	7	914.30	5	930.76	3	954.51	1
HRH 105	754.52	1102.25	33	715.95	5	752.02	0	764.57	1	775.04	3	790.91	5
HRH 106	942.38	1457.74	38	917.12	3	972.08	3	991.00	5	1006.20	7	1030.42	9
HRH 107	925.4	1347.87	35	954.05	3	987.42	7	998.91	8	1009.28	9	1030.84	11
HRH 114	1372.05	2257.12	46	1285.94	6	1397.02	2	1434.69	5	1453.77	6	1504.35	10
HRH 132	1501.068	1914.05	16	1187.90	21	1267.77	16	1294.99	14	1306.41	13	1340.73	11
HRH 137	744.79	1080.20	29	715.01	4	748.38	0	760.03	2	768.99	3	783.67	5
HRH 147	1205.14	1838.15	40	1154.53	4	1229.02	2	1254.38	4	1271.68	6	1305.48	8
HRH 122	1287.65	1945.28	35	1116.86	13	1208.75	6	1240.07	4	1258.23	2	1299.33	1
HRH 123	748.8	1044.04	29	680.97	9	714.00	5	725.51	3	736.24	2	751.53	0
HRH 142	1220.02	1804.52	35	1027.31	16	1112.51	9	1141.61	6	1160.70	5	1199.07	2
HRH 148	1098.44	1605.88	34	944.23	14	1014.35	8	1038.40	5	1055.17	4	1086.28	1

Tableau III.9 : Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S/cm}$ ) à 25°C (Année 2019) (Suite)

Nom du puits	Conductivité mesuré	Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction des teneurs ioniques)		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la force ionique)		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDS <sub>max</sub> )		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDS <sub>min</sub> )		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDS <sub>moy</sub> )	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S/cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1103.43	132.90	89	1052.91	5	4588.60	316	5109.53	363	4925.57	346
HRH 127	1103.43	143.31	89	1157.21	5	4986.69	352	5744.59	421	5436.00	393
HRH 138	929.41	155.21	85	1302.70	40	4950.44	433	6104.46	557	5570.53	499
HRH 139	936.19	111.37	89	889.40	5	4142.27	342	4223.26	351	4277.78	357
HRH 145	985.53	114.29	89	926.93	6	4128.14	319	4453.52	352	4369.21	343
HRH 151	962.02	116.11	89	941.94	2	4022.32	318	4308.91	348	4244.02	341
HRH 105	754.52	91.03	89	746.31	1	3156.15	318	3513.60	366	3387.56	349
HRH 106	942.38	118.75	89	943.67	0	3954.15	320	4462.33	374	4270.22	353
HRH 107	925.4	111.54	89	832.45	10	3881.13	319	4383.67	374	4192.99	353
HRH 114	1372.05	177.01	89	1397.36	2	5761.58	320	7159.43	422	6506.99	374
HRH 132	1501.068	150.70	91	1176.39	22	5170.15	244	6306.45	320	5787.88	286
HRH 137	744.79	89.18	89	706.86	5	3128.71	320	3422.73	360	3331.97	347
HRH 147	1205.14	149.10	89	1175.73	2	5046.55	319	5825.30	383	5506.35	357
HRH 122	1287.65	154.83	89	1253.16	3	5323.17	313	6231.55	384	5845.85	354
HRH 123	748.8	87.31	89	725.43	3	3144.90	320	3404.53	355	3333.65	345
HRH 142	1220.02	146.03	89	1220.24	0	5094.86	318	5892.34	383	5563.95	356
HRH 148	1098.44	130.73	89	1086.86	1	4592.60	318	5230.68	376	4980.44	353

**Tableau III.10:** Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à  $25^\circ\text{C}$  (Année 2020)

Nom du puits	Conductivité mesuré	Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques		Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel-Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1103.43	1731.97	57	958.47	13	1043.29	5	1072.32	3	1094.47	1	1131.47	3
HRH 127	1103.43	1611.14	46	905.51	18	982.33	11	1008.64	9	1031.39	7	1064.93	3
HRH 138	851.16	1238.24	45	791.24	7	835.53	2	850.88	0	864.16	2	882.58	4
HRH 139	1103.43	1658.42	50	932.08	16	1011.15	8	1038.24	6	1061.66	4	1096.18	1
HRH 145	1244.49	1783.92	43	1142.17	8	1211.61	3	1235.35	1	1245.49	0	1274.47	2
HRH 151	981.12	1352.52	38	821.39	16	875.40	11	894.02	9	910.66	7	934.56	5
HRH 105	769.78	1134.33	47	741.91	4	778.71	1	791.51	3	801.48	4	817.49	6
HRH 106	1029.69	1580.19	53	945.43	8	1012.47	2	1035.47	1	1053.54	2	1083.20	5
HRH 107	697.79	940.74	35	645.20	8	671.28	4	680.41	2	689.64	1	701.14	0
HRH 114	1308.76	2045.49	56	1140.81	13	1243.54	5	1278.46	2	1297.96	1	1344.45	3
HRH 132	1694.23	2550.93	51	1351.72	20	1497.00	12	1545.88	9	1579.13	7	1648.64	3
HRH 137	761.35	993.55	30	654.83	14	685.39	10	696.07	9	705.56	7	719.20	6
HRH 147	1448.99	2319.08	60	1431.94	1	1534.58	6	1569.22	8	1588.99	10	1635.59	13
HRH 122	1264.29	1971.34	56	1118.25	12	1213.84	4	1246.39	1	1268.63	0	1311.62	4
HRH 123	1298.54	1943.02	50	1101.53	15	1196.22	8	1228.42	5	1250.37	4	1293.44	0
HRH 142	1175.72	1723.56	47	986.23	16	1066.39	9	1093.79	7	1113.28	5	1149.35	2
HRH 148	1054.49	1521.48	44	904.98	14	969.51	8	991.68	6	1008.27	4	1036.93	2

**Tableau III.11:** Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2020) (suite)

Nom du puits	Conductivité mesurée	Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques		Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel-Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1103.43	1572.18	142	884.79	20	960.78	13	986.75	11	1006.45	9	1039.50	6
HRH 127	1103.43	1463.40	133	836.08	24	904.91	18	928.45	16	948.73	14	978.69	11
HRH 138	851.16	1133.75	133	733.75	14	773.63	9	787.43	7	799.33	6	815.89	4
HRH 139	1103.43	1506.35	137	860.61	22	931.47	16	955.70	13	976.57	11	1007.41	9
HRH 145	1244.49	1616.31	130	1047.63	16	1109.52	11	1130.65	9	1139.65	8	1165.44	6
HRH 151	981.12	1234.29	126	760.23	23	808.77	18	825.48	16	840.36	14	861.80	12
HRH 105	769.78	1042.24	135	689.98	10	723.20	6	734.75	5	743.70	3	758.14	2
HRH 106	1029.69	1437.97	140	873.28	15	933.34	9	953.91	7	970.00	6	996.52	3
HRH 107	697.79	661.53	95	601.65	14	625.26	10	633.52	9	641.84	8	652.24	7
HRH 114	1308.76	1530.11	117	1047.53	20	1139.07	13	1170.13	11	1187.36	9	1228.66	6
HRH 132	1694.23	1779.90	105	1234.39	27	1363.03	20	1406.23	17	1435.45	15	1496.79	12
HRH 137	761.35	704.91	93	610.55	20	638.21	16	647.87	15	656.42	14	668.75	12
HRH 147	1448.99	1676.80	116	1308.04	10	1398.92	3	1429.55	1	1446.91	0	1488.09	3
HRH 122	1264.29	1414.12	112	1027.97	19	1113.23	12	1142.21	10	1161.92	8	1200.16	5
HRH 123	1298.54	1391.43	107	1011.80	22	1096.18	16	1124.84	13	1144.26	12	1182.55	9
HRH 142	1175.72	1229.18	105	908.77	23	980.45	17	1004.93	15	1022.25	13	1054.42	10
HRH 148	1054.49	1086.18	103	835.90	21	893.76	15	913.61	13	928.40	12	954.04	10

Tableau III.12: Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2020) (suite)

om du puits	Conductivité mesuré	Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques		Modèle de Nernst-Einstein sur la base des activités ioniques									
				Selon Debye-Hückel limité (DHL)		Selon Debye-Hückel- Güntelberg (AG)		Selon Legrand-Poirier		Selon Debye-Hückel étendu (DHE)		Selon Debye-Hückel- Davies	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1103.43	1758.51	42	973.38	12	1059.47	4	1088.94	1	1111.42	1	1148.98	4
HRH 127	1103.43	1629.30	35	915.87	17	993.54	10	1020.14	8	1043.14	5	1077.06	2
HRH 138	851.16	1256.62	32	803.10	6	848.03	0	863.60	1	877.07	3	895.77	5
HRH 139	1103.43	1684.56	35	946.94	14	1027.24	7	1054.74	4	1078.53	2	1113.59	1
HRH 145	1244.49	1811.60	29	1160.09	7	1230.59	1	1254.69	1	1264.99	2	1294.42	4
HRH 151	981.12	1367.81	27	830.79	15	885.39	10	904.22	8	921.04	6	945.22	4
HRH 105	769.78	1151.26	33	753.11	2	790.44	3	803.43	4	813.54	6	829.79	8
HRH 106	1029.69	1602.27	40	958.87	7	1026.82	0	1050.13	2	1068.44	4	1098.53	7
HRH 107	697.79	954.11	23	654.43	6	680.87	2	690.13	1	699.49	0	711.15	2
HRH 114	1308.76	2065.93	45	1152.58	12	1256.30	4	1291.55	1	1311.23	0	1358.18	4
HRH 132	1694.23	2578.56	39	1366.79	19	1513.58	11	1562.98	8	1596.57	6	1666.83	2
HRH 137	761.35	1004.51	21	662.15	13	693.04	9	703.83	8	713.42	6	727.21	4
HRH 147	1448.99	2359.66	43	1457.43	1	1561.81	8	1597.04	10	1617.13	12	1664.54	15
HRH 122	1264.29	2003.37	40	1136.72	10	1233.83	2	1266.89	0	1289.49	2	1333.17	5
HRH 123	1298.54	1962.54	39	1112.89	14	1208.49	7	1241.01	4	1263.17	3	1306.67	1
HRH 142	1175.72	1741.87	36	996.94	15	1077.92	8	1105.60	6	1125.29	4	1161.75	1
HRH 148	1054.49	1538.18	33	915.09	13	980.31	7	1002.71	5	1019.48	3	1048.46	1

Tableau III.13: Récapitulatif des résultats de calcul de la conductivité électrique en ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) à 25°C (Année 2020) (suite)

Nom du puits	Conductivité mesuré	Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction des teneurs ioniques)		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la force ionique)		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDSmax)		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDSmin)		Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau $\sigma$ (en fonction de la TDSmoy)	
		$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)	$\sigma$ ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	$\Delta\sigma$ (%)
HRH 126	1103.43	141.85	89	1183.60	7	4826.25	337	5499.15	398	5234.84	374
HRH 127	1103.43	135.29	89	1153.04	4	4840.00	339	5296.90	380	5155.32	367
HRH 138	851.16	105.90	89	841.10	1	3787.58	345	4049.24	376	3992.78	369
HRH 139	1103.43	139.26	89	1153.04	4	4840.00	339	5296.90	380	5155.32	367
HRH 145	1244.49	150.95	89	1111.31	11	5417.50	335	6084.40	389	5837.82	369
HRH 151	981.12	115.66	89	957.20	2	4103.17	318	4363.38	345	4315.40	340
HRH 105	769.78	94.28	89	749.75	3	3219.79	318	3600.38	368	3462.77	350
HRH 106	1029.69	129.11	89	1057.41	3	4303.55	318	4922.52	378	4676.10	354
HRH 107	697.79	82.06	89	641.97	8	2916.55	318	2975.36	326	3012.74	332
HRH 114	1308.76	162.51	89	1360.65	4	5497.56	320	6785.45	418	6188.92	373
HRH 132	1694.23	207.52	89	1724.24	2	7076.10	318	8193.09	384	7731.67	356
HRH 137	761.35	83.80	90	688.17	10	2981.08	292	3237.68	325	3164.55	316
HRH 147	1448.99	186.52	89	1389.60	4	5975.86	312	7070.45	388	6595.05	355
HRH 122	1264.29	160.62	89	1290.87	2	5292.77	319	6183.13	389	5806.90	359
HRH 123	1298.54	158.56	89	1320.70	2	5436.75	319	6343.08	388	5961.29	359
HRH 142	1175.72	141.44	89	1185.61	1	4910.06	318	5643.82	380	5347.05	355
HRH 148	1054.49	126.07	89	1046.67	1	4409.22	318	4974.81	372	4761.20	352

III.3.2. Représentation graphique des résultats

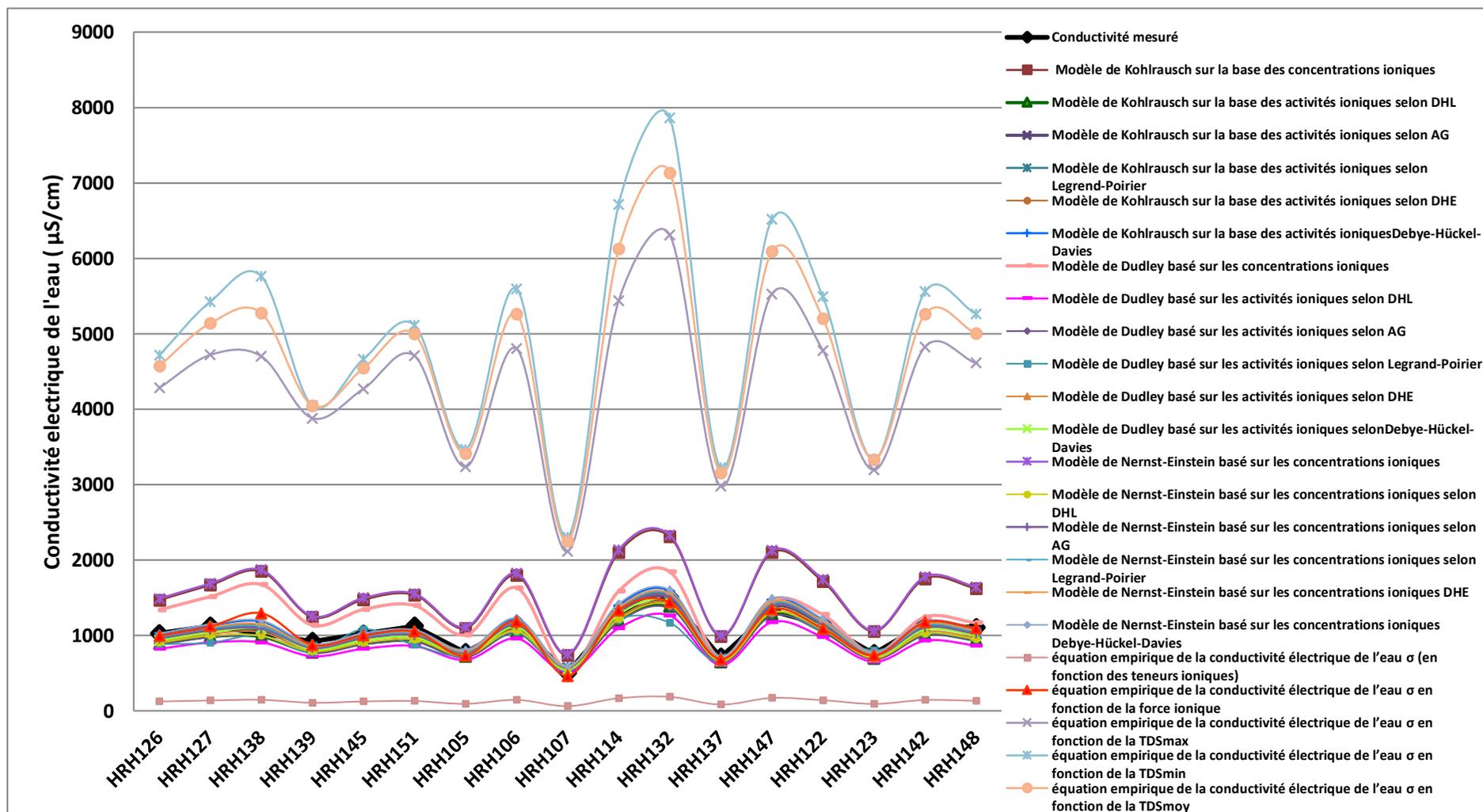


Figure III.1: Représentation graphique des résultats (Année 2018)

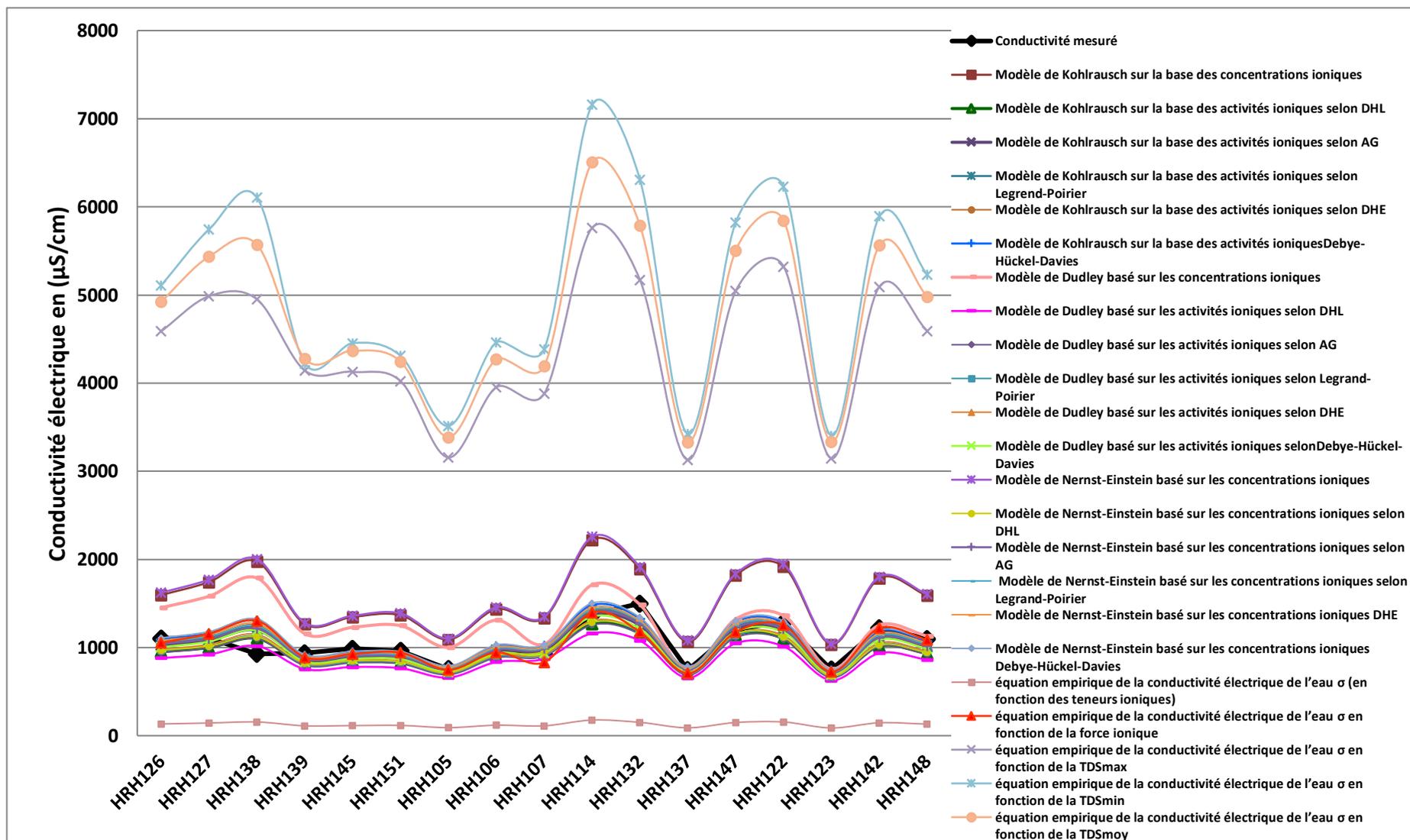


Figure III.2: Représentation graphique des résultats (Année 2019)

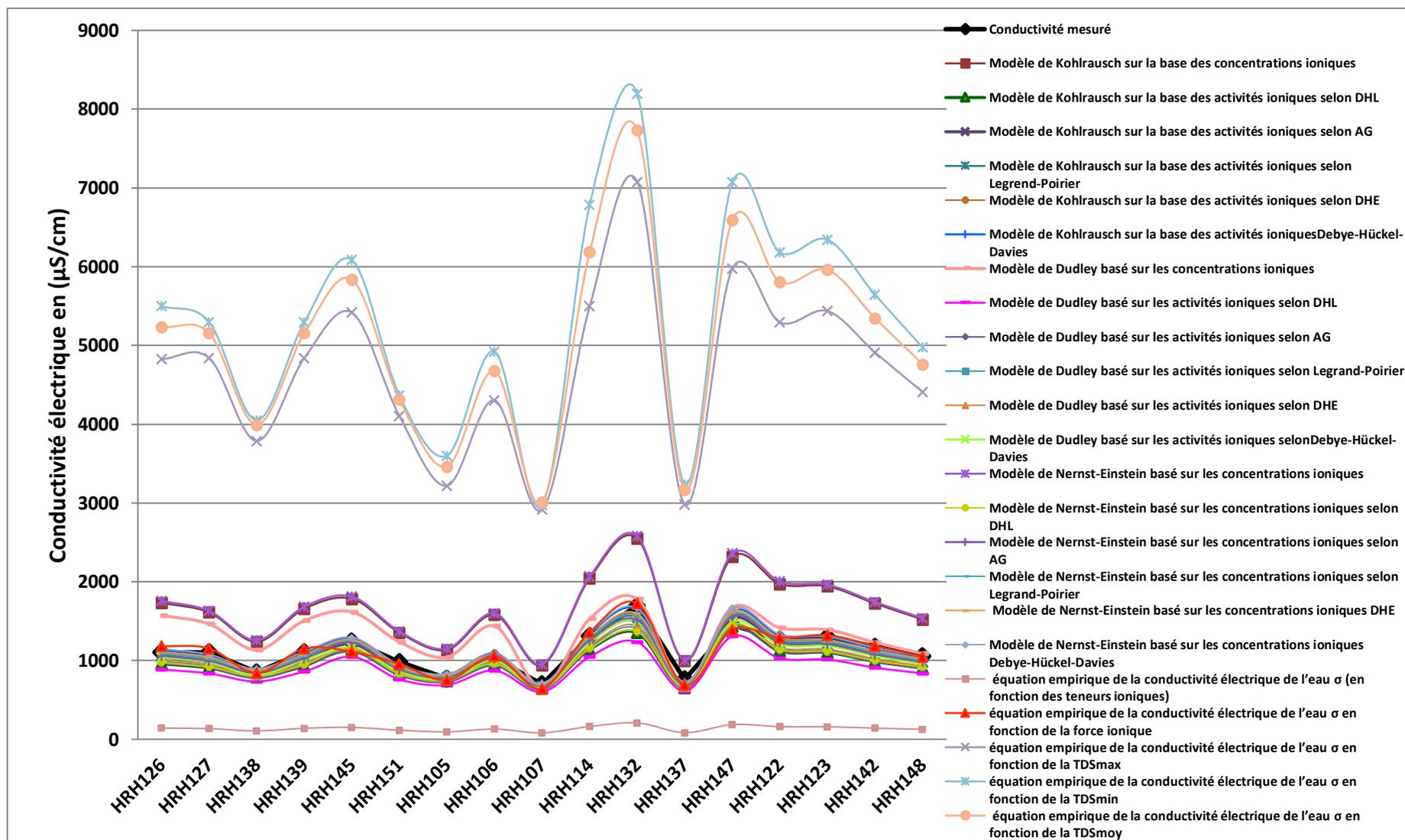


Figure III.3: Représentation graphique des résultats (Année 2020)

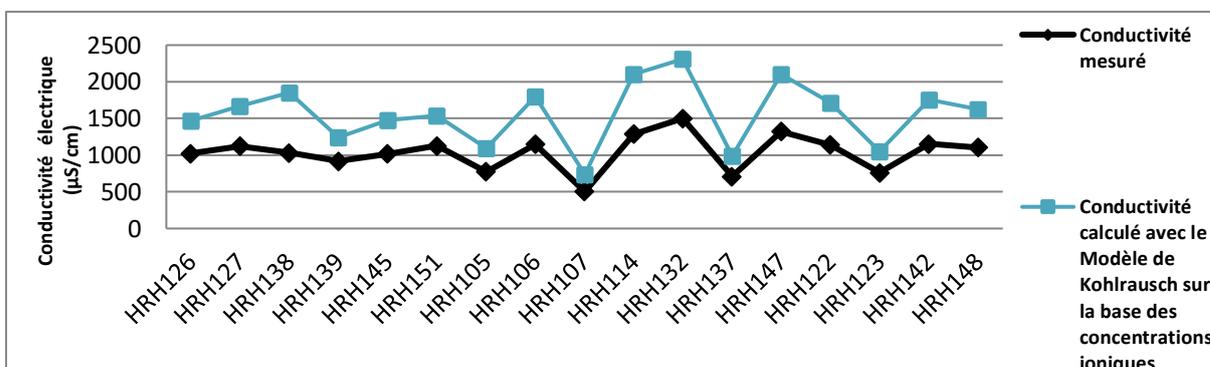
## II.4. Interprétation des résultats

L'analyse des résultats repose sur la superposition des courbes, relatives aux valeurs obtenues des modèles utilisés, dans le même graphe, pour chaque série de données, l'objectif est d'examiner les variations de la conductivité électrique calculée par rapport à la valeur de la conductivité électrique mesurée.

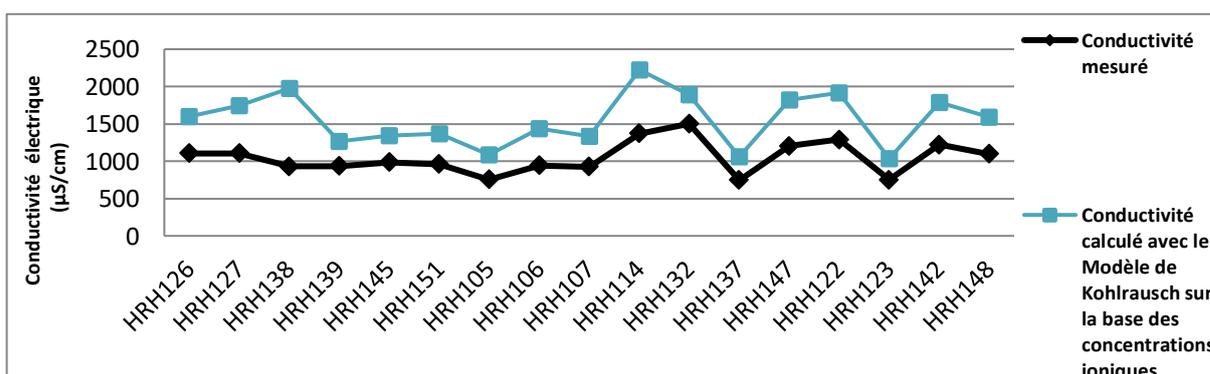
Communément, nous voyons une certaine convergence entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées par certains modèles, en revanche, on remarque une divergence dans les résultats obtenus par d'autres.

Dans ce qui suit, nous allons interpréter les résultats de chaque modèle de calcul séparément.

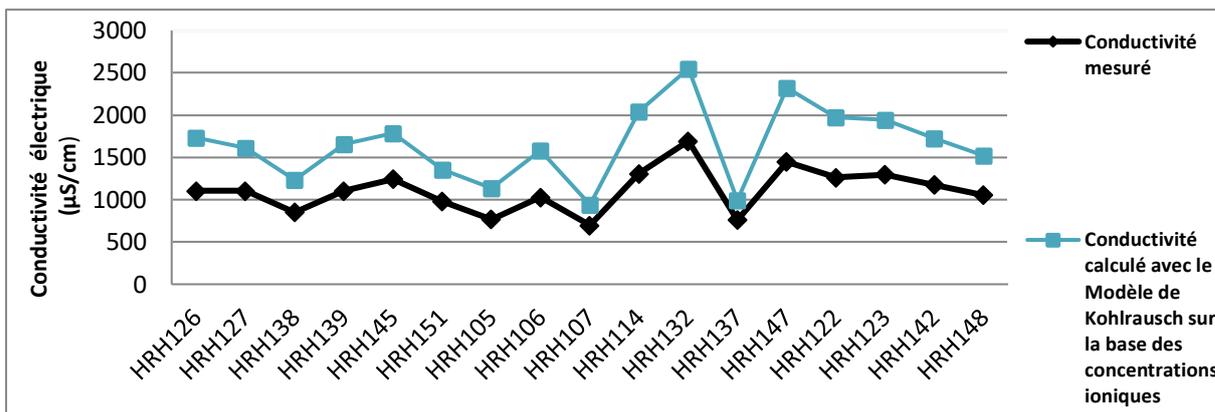
### II.4.1. Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques



**Figure III.4:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques (Année 2018)



**Figure III.5:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques (Année 2019)



**Figure II.6:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des concentrations ioniques (Année 2020)

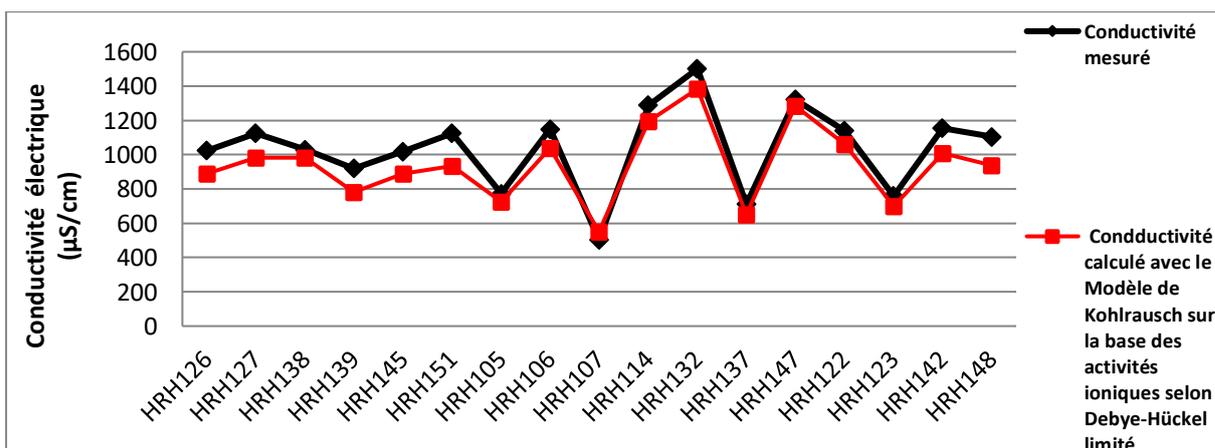
• **Interprétation des résultats**

D’après les figures (III.4, 5 et 6) on remarque que les résultats obtenus par le Modèle de Kohlrausch qui se base sur les concentrations ioniques, ne sont pas conformes avec celles mesurés.

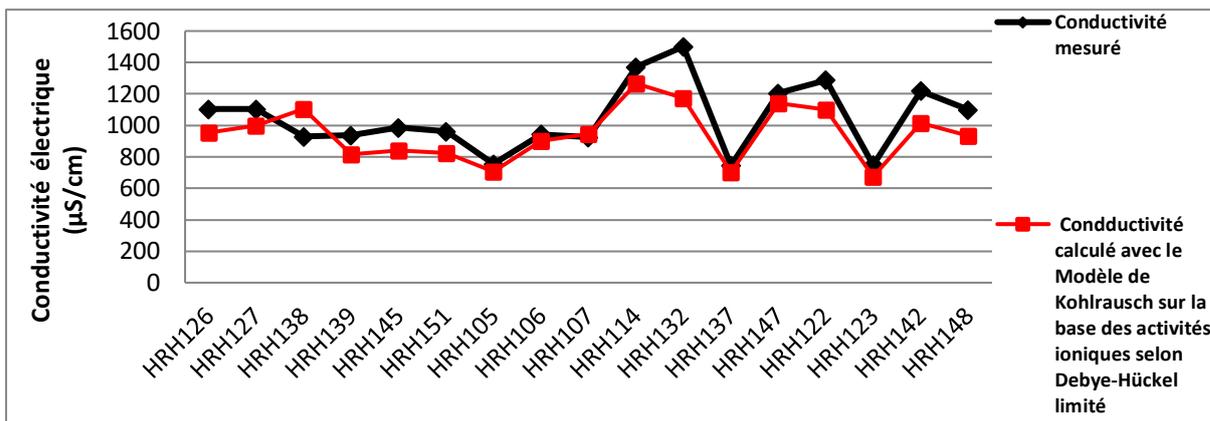
L’erreur relative commise sur le calcul de la conductivité électrique de l’eau par cette méthode dépasse les 34 % pour l’ensemble des échantillons.

Par conséquent, le Modèle de Kohlrausch basé sur les concentrations ioniques ne donne pas une estimation proche à la valeur réelle de la conductivité électrique.

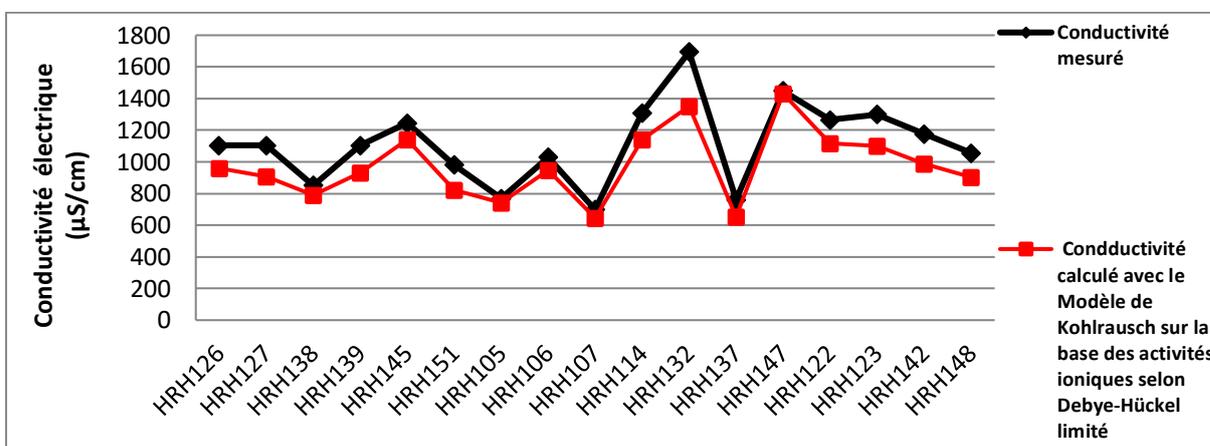
**II.4.2. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL)**



**Figure III.7:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2018)



**Figure III.8:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2019)

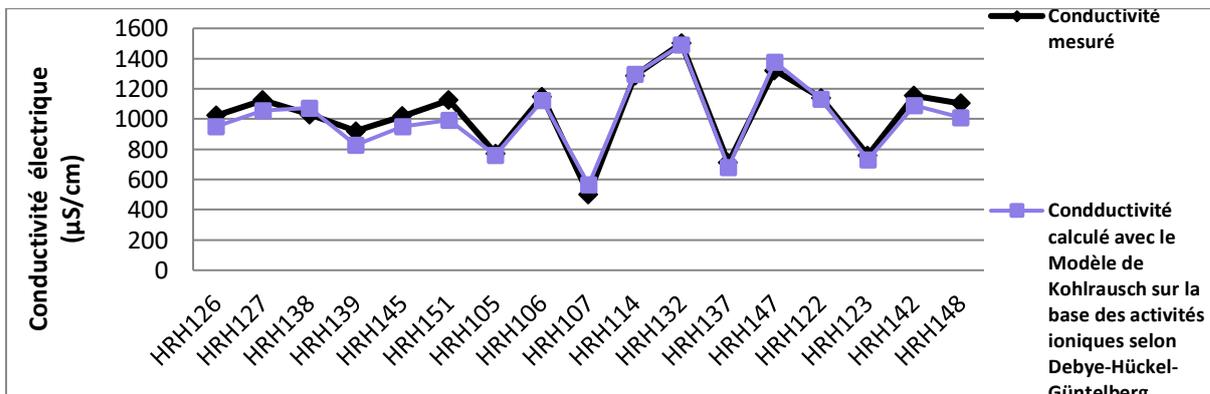


**Figure III.9:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2020)

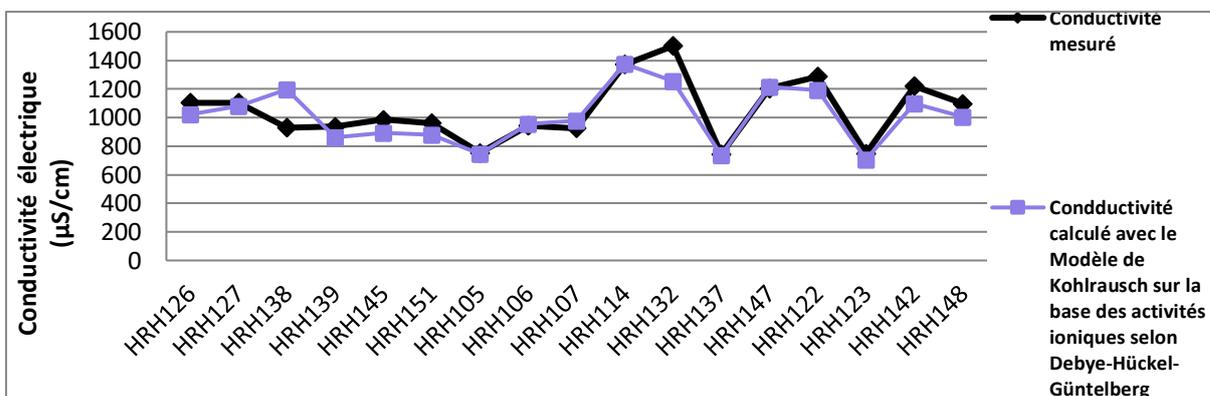
• **Interprétation des résultats**

D'après les figures (III.7, 8 et 9) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Kohlrausch qui se base sur les Activité ioniques, selon Debye-Hückel limité, sont proportionnellement proche aux valeurs mesurées par rapport au modèle de calcul précédent, mais ils ne sont pas conformes; car l'erreur relative dépasse les 10% pour 56% des échantillons. Donc on peut dire que ce modèle n'est pas valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l'eau.

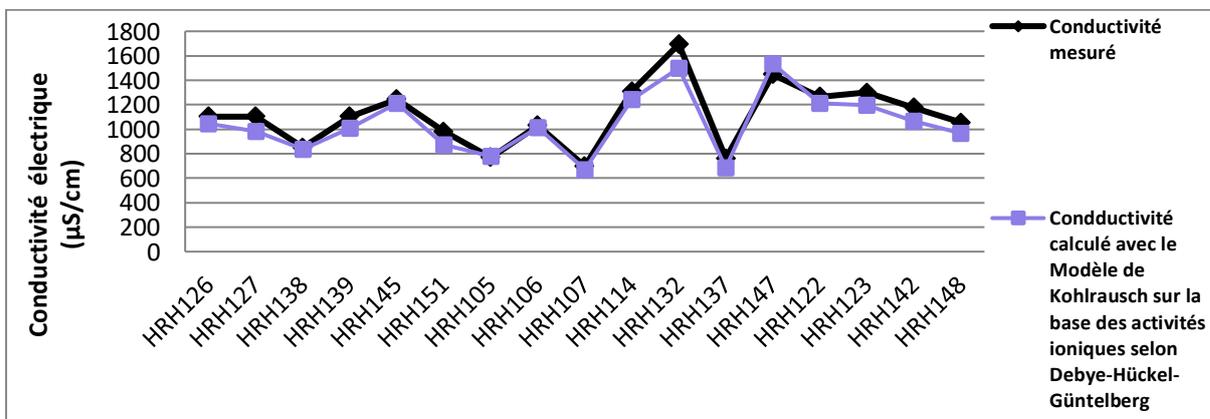
**II.4.3. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)**



**Figure III.10:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2018)



**Figure III.11:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2019)



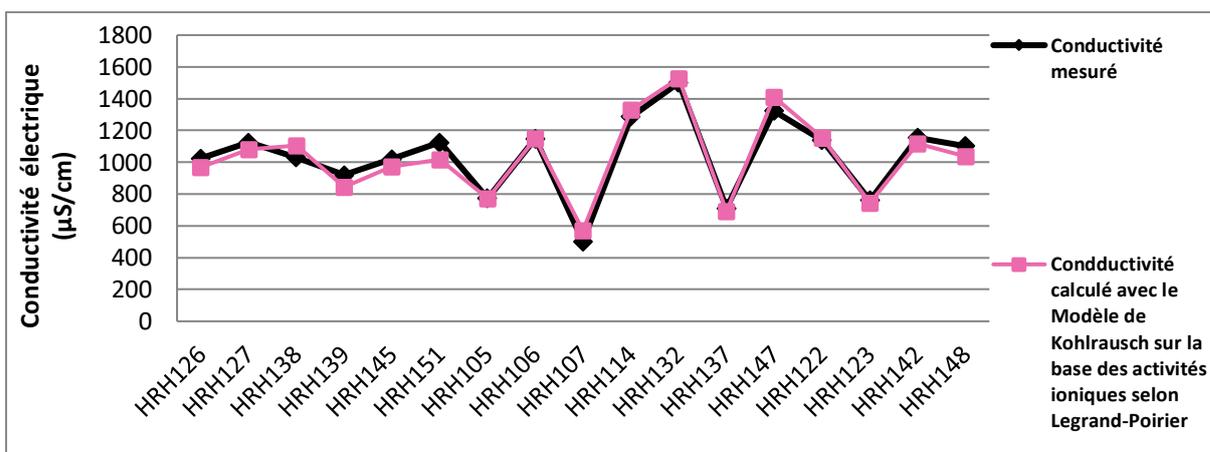
**Figure II.12:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2020)

• **Interprétation des résultats**

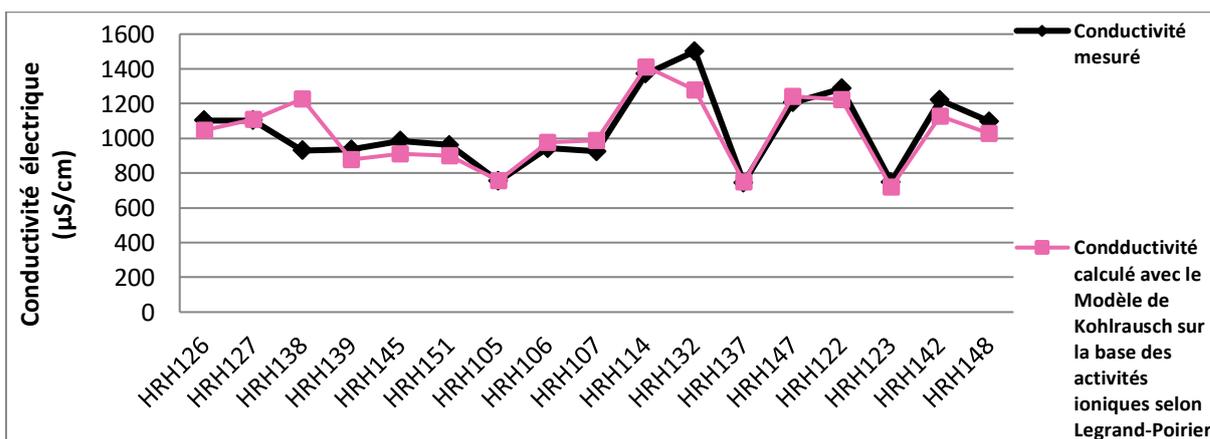
D'après les figures (III.10, 11 et 12) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Kohlrausch qui se base sur les Activité ioniques, selon Debye-Hückel-Güntelberg, sont très proches aux valeurs de la conductivité mesurés.

L'erreur relative pour 86% des échantillons ne dépasse pas 10%. Donc on peut dire que ce modèle de calcul est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l'eau.

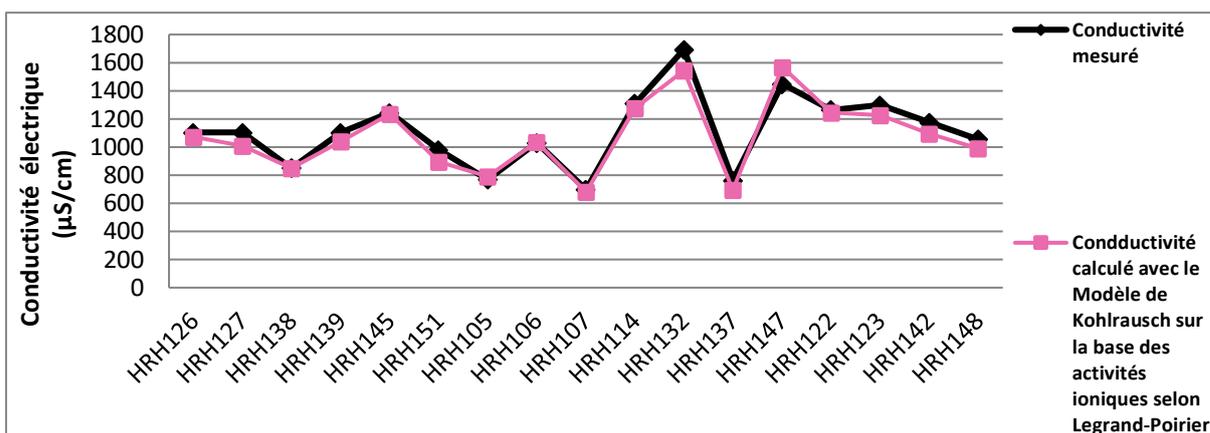
**III.4.4. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Legrand-Poirier**



**Figure III.13:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2018)



**Figure III.14:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2019)



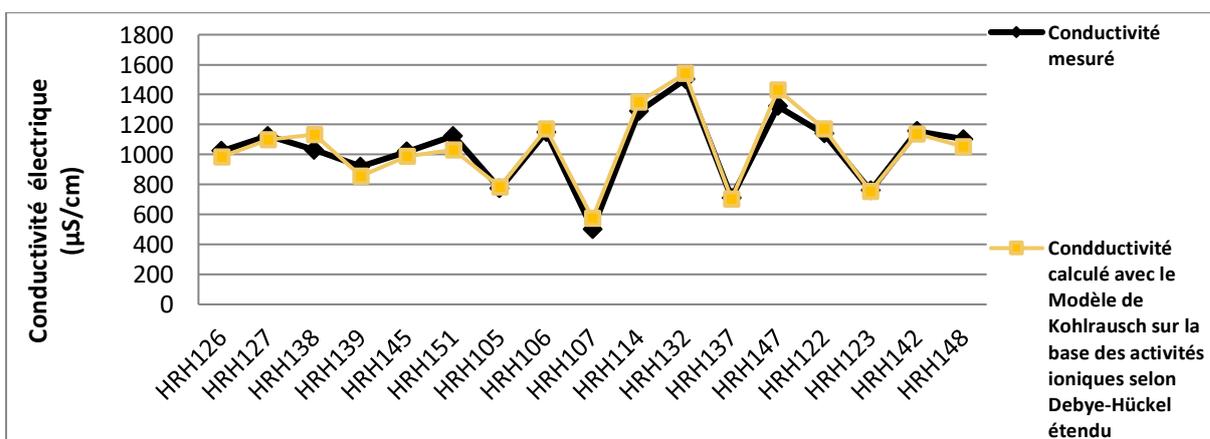
**Figure III.15:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2020)

• **Interprétation des résultats**

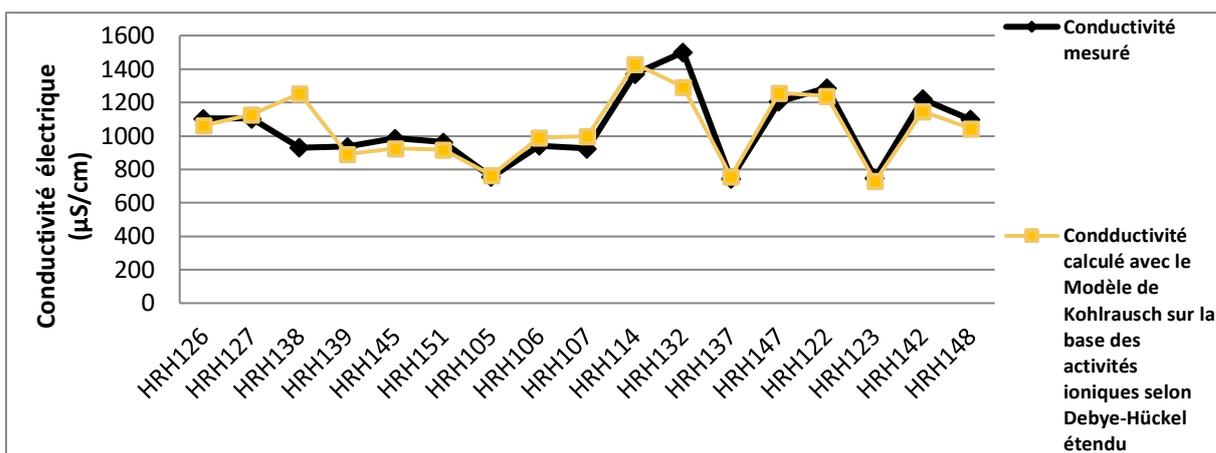
D’après les figures (III.13, III.14 et III.15) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Kohlrausch qui se base sur les Activité ioniques, selon Legrand-Poirier, sont très proches (approximativement identiques) aux valeurs de la conductivité mesurés. L’erreur relative commise ne dépasse pas 10% pour 94% des échantillons.

Donc le modèle Kohlrausch basé sur les Activité ioniques, selon Legrand-Poirier est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l’eau.

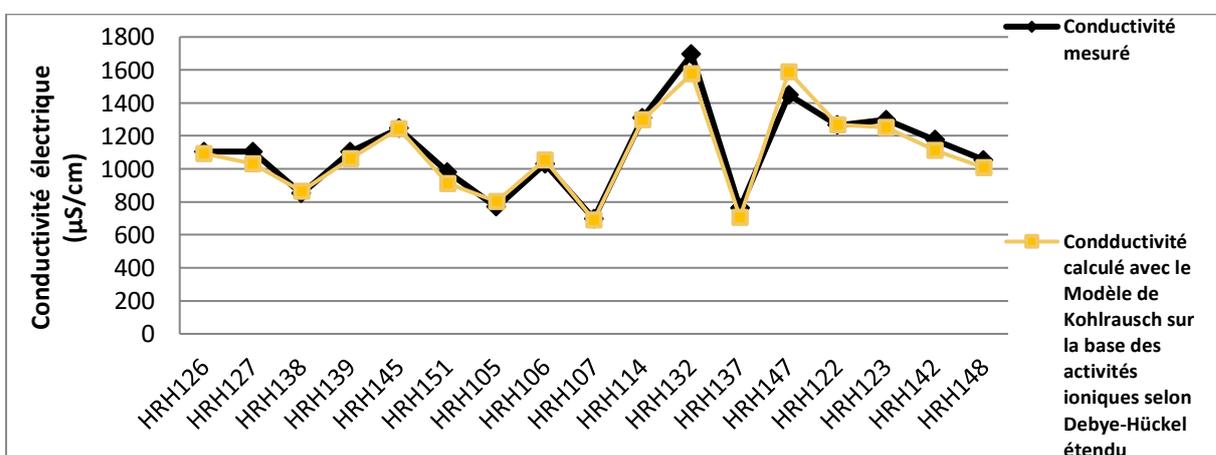
**III.4.5. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE)**



**Figure III.16:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2018)



**Figure III.17 :** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2019)



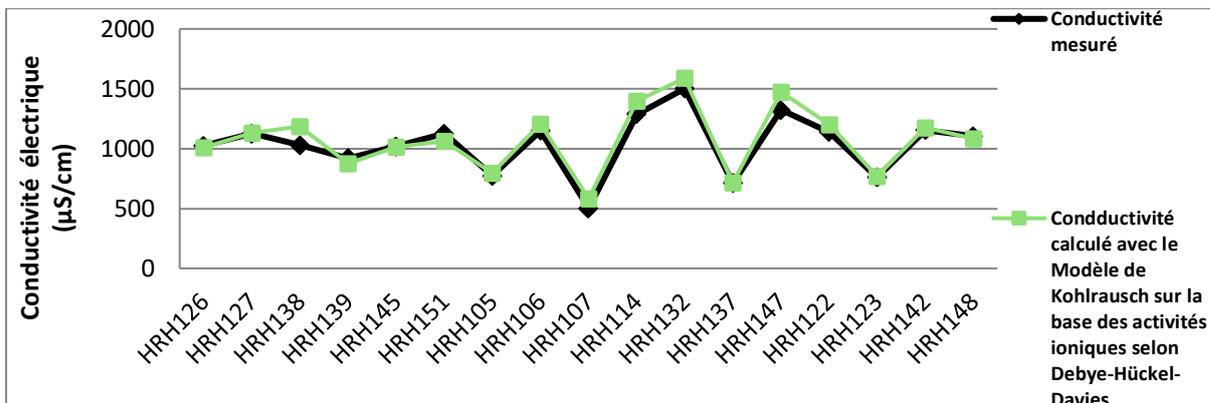
**Figure III.18:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2020)

- **Interprétation des résultats**

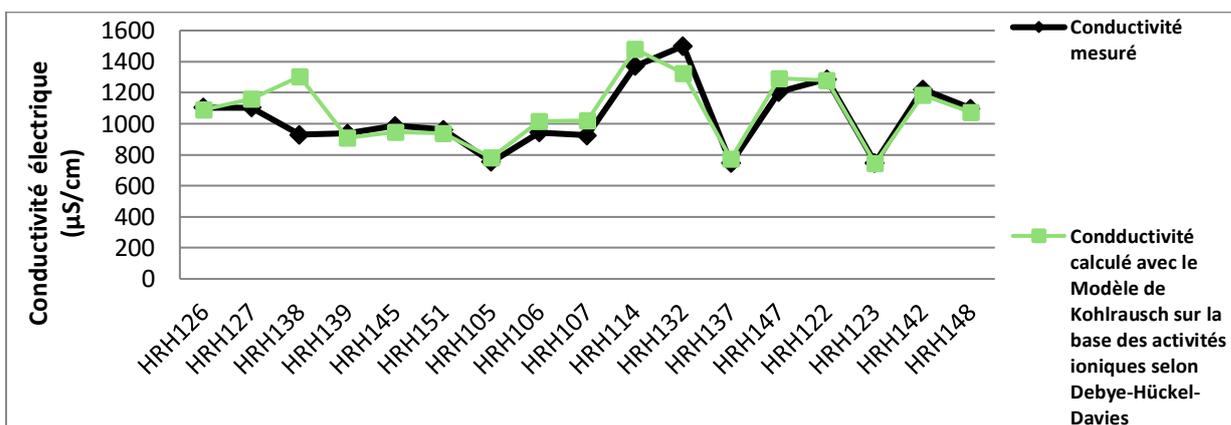
D'après les figures (III.16, 17 et 18) on remarque que les résultats donnés par le calcul de Modèle de Kohlrausch qui se base sur les Activité ioniques, selon Debye-Hückel étendu, sont très proches (approximativement identiques) aux valeurs de la conductivité mesurés. L'erreur relative commise ne dépasse pas 10% pour 94% des échantillons.

Donc le modèle Kohlrausch basé sur les Activité ioniques, selon Debye-Hückel étendu est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l'eau.

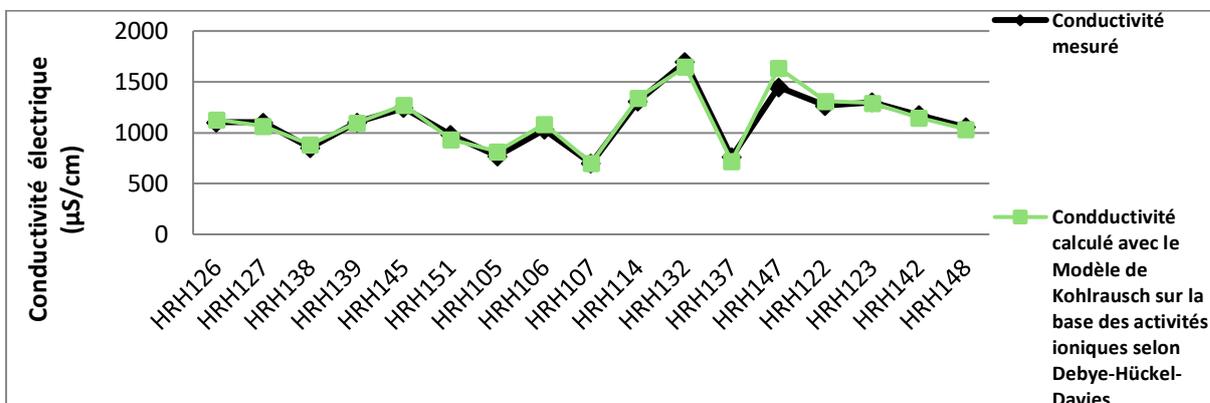
**III.4.6. Modèle de Kohlrausch sur la base des activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies**



**Figure III.19:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2018)



**Figure III.20:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2019)



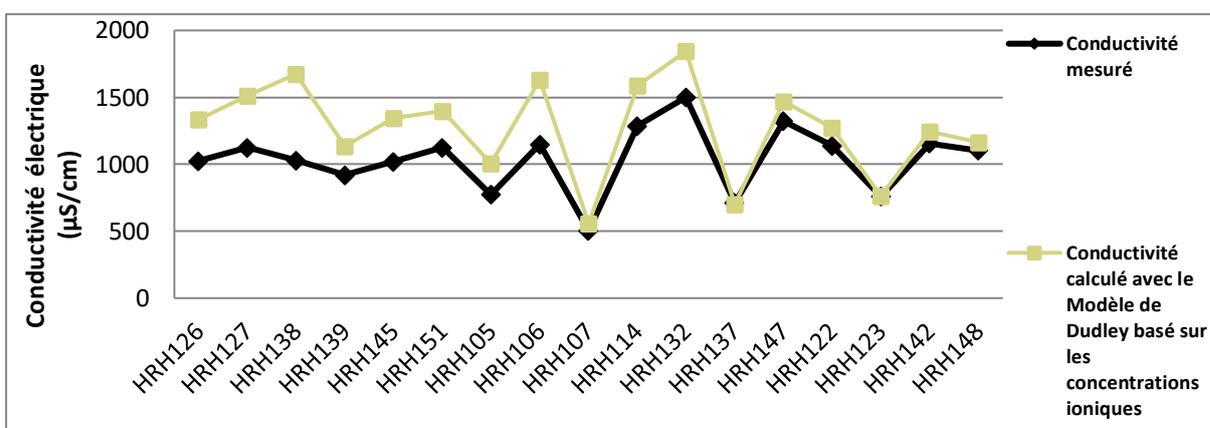
**Figure III.21:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Kohlrausch sur la base des Activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2020)

• **Interprétation des résultats**

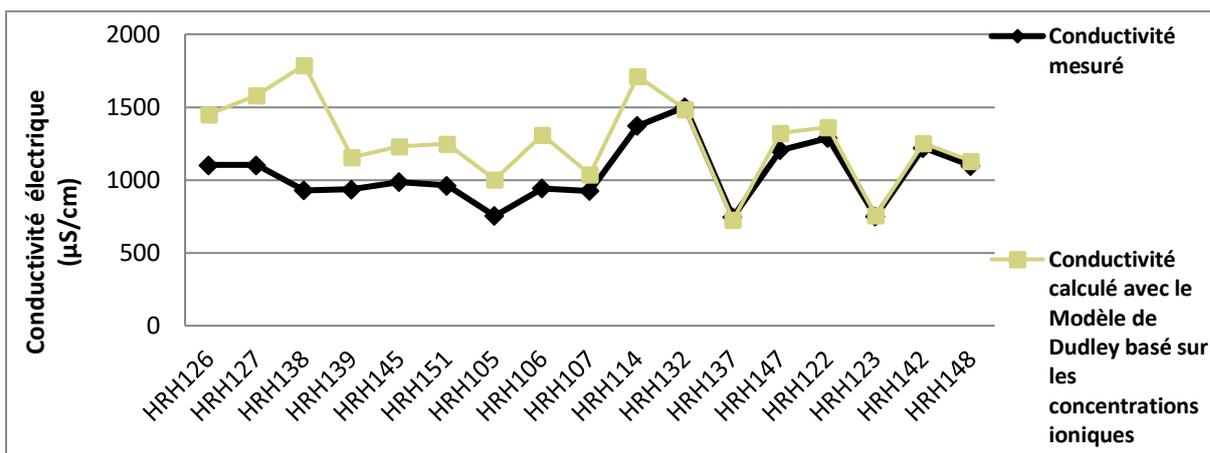
D'après les figures (III.19, 20 et 21) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Kohlrausch qui se base sur les Activité ioniques, selon Debye-Hückel-Davies, sont très proches aux valeurs de la conductivité mesurés. L'erreur relative ne dépasse pas 10% pour 88% de l'ensemble des échantillons.

Donc on peut dire que ce modèle de calcul est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l'eau.

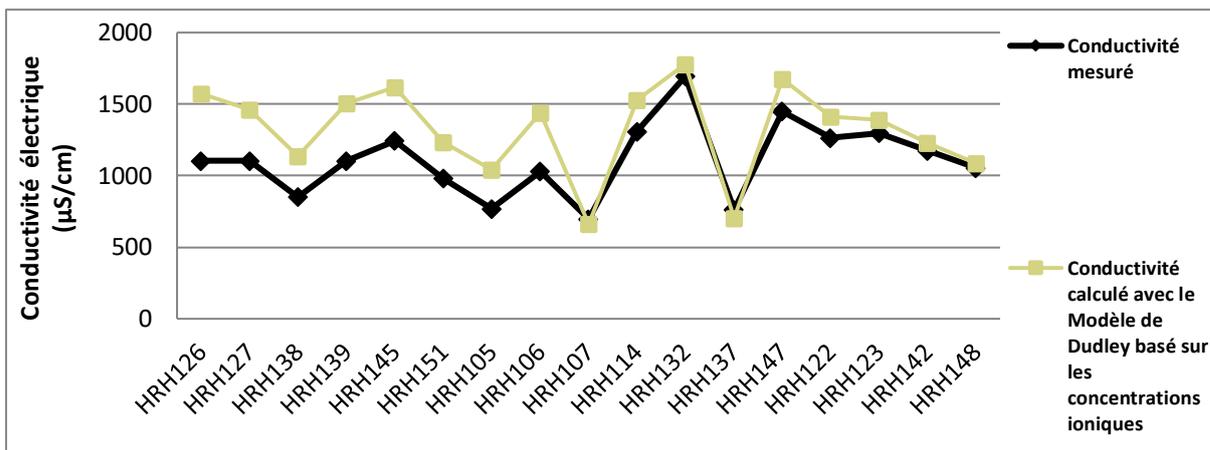
**III.4.7. Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques**



**Figure III.22:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques (Année 2018)



**Figure III.23:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques (Année 2019)

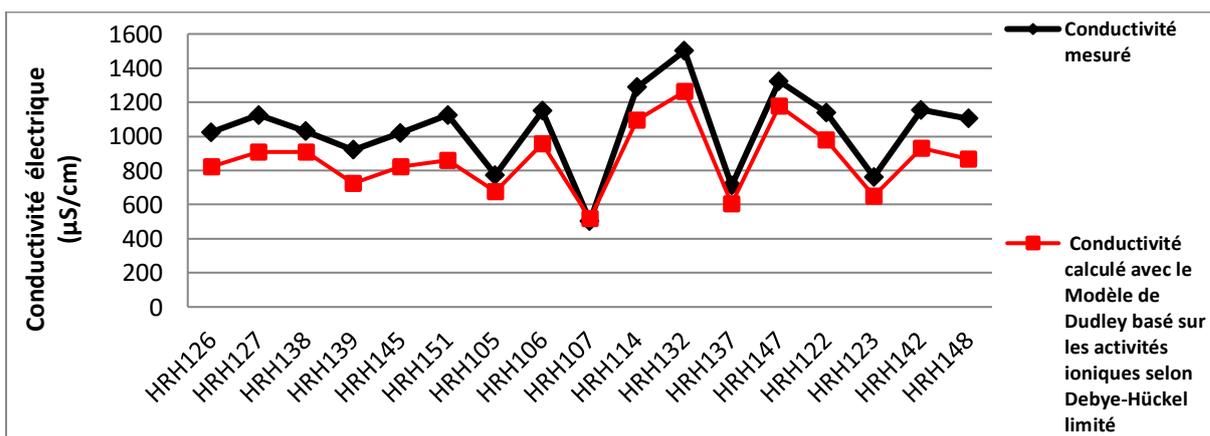


**Figure III.24:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques (Année 2020)

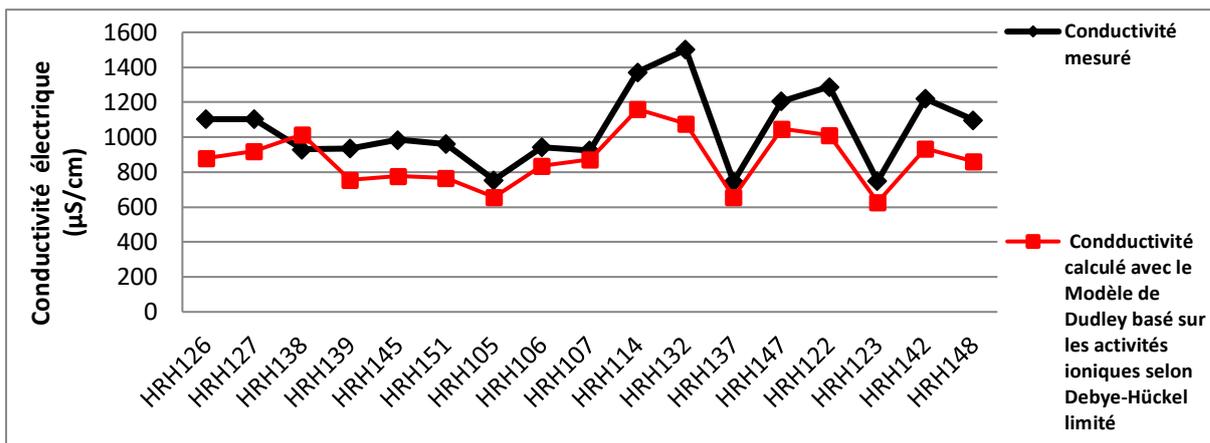
• **Interprétation des résultats**

D’après les figures (III.22, 23 et 24) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Dudley basé sur les concentrations ioniques, ne sont pas conformes à celles mesurés. L’erreur relative dépasse les 100% pour 92% des échantillons. Donc ce modèle n’est pas valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l’eau.

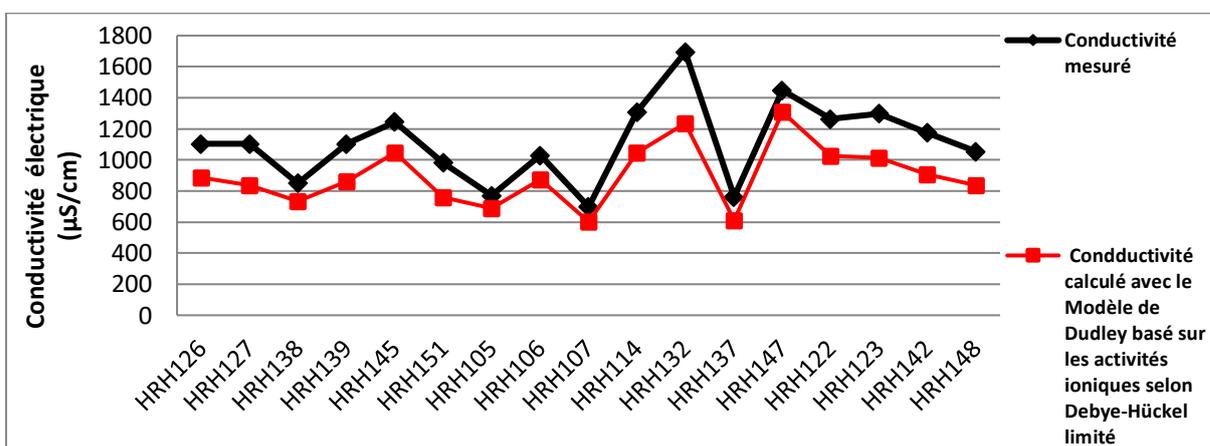
**III.4.8. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL)**



**Figure III.25:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2018)



**Figure III.26:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2019)

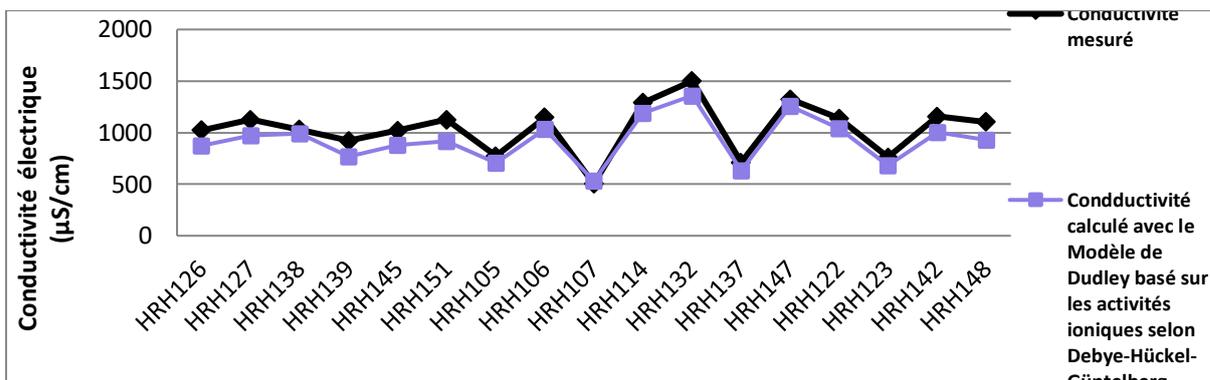


**Figure III.27:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL) (Année 2020)

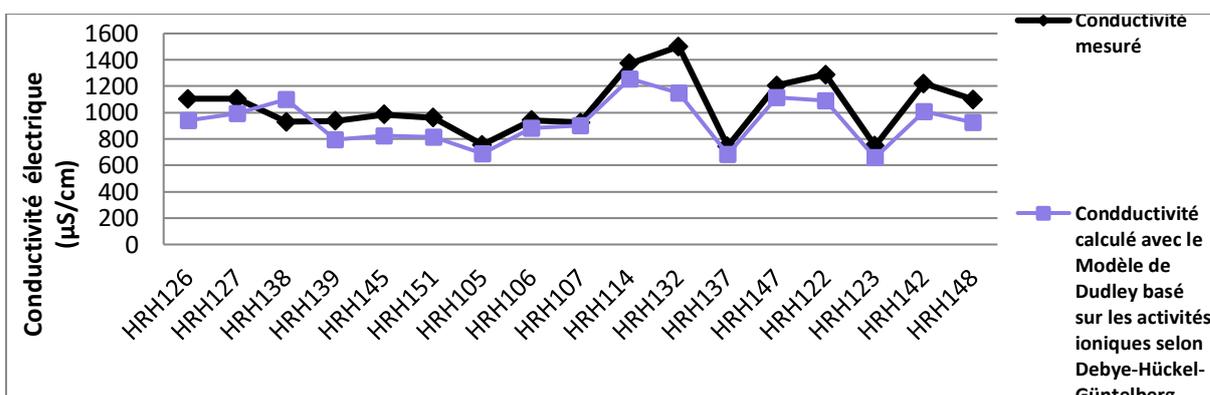
• **Interprétation des résultats**

D’après les figures (III.25, 26 et 27) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL), ne sont pas conformes à celles mesurés. L’erreur relative dépasse les 20% pour 58% des échantillons. Donc ce modèle n’est pas valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l’eau.

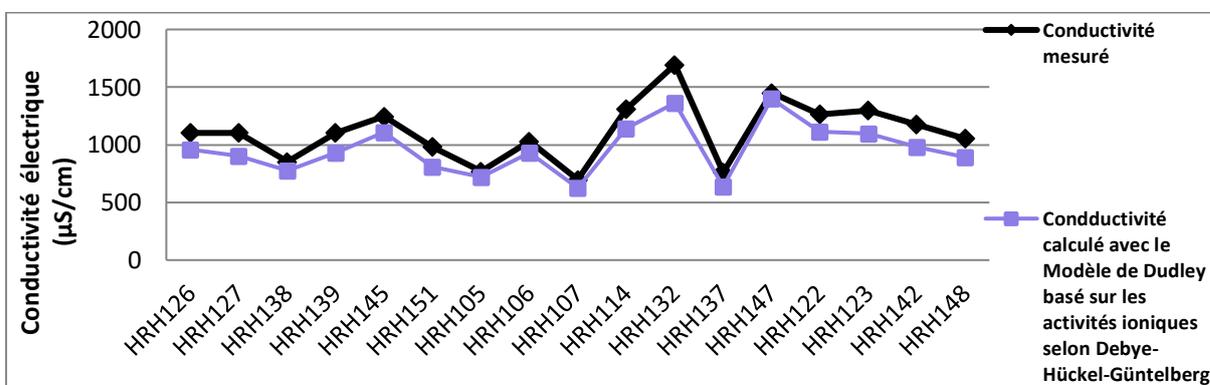
**III.4.9. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)**



**Figure III.28:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG) (Année 2018)



**Figure III.29:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG) (Année 2019)

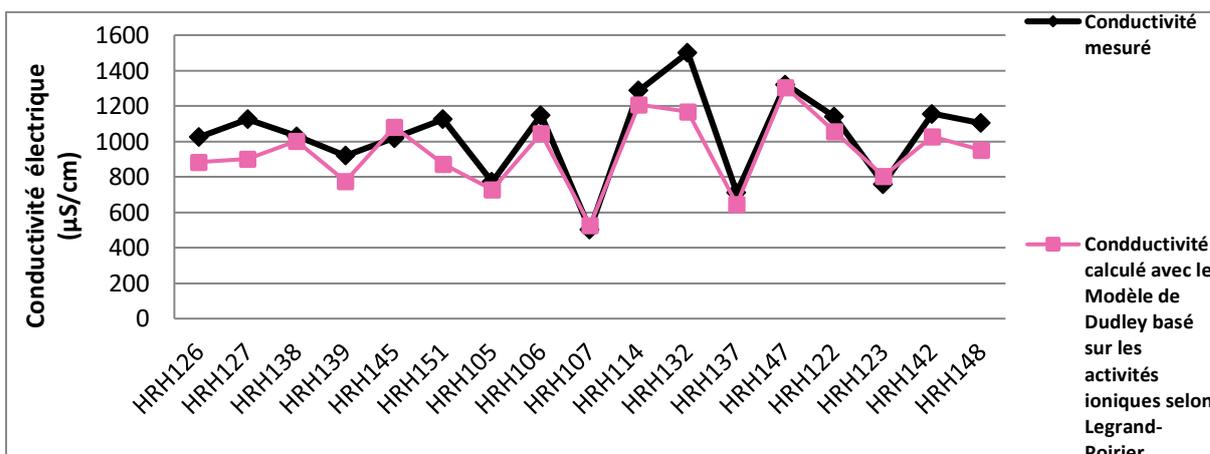


**Figure III.30:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG) (Année 2019)

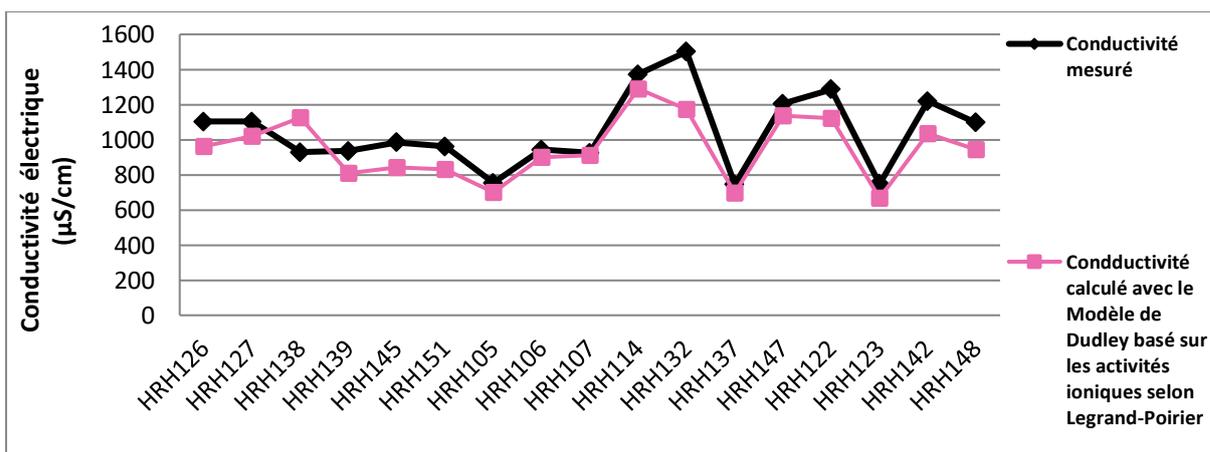
• **Interprétation des résultats**

D'après les figures (III.28, 29 et 30) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG), ne sont pas conformes à celles mesurés. L'erreur relative dépasse les 10% pour 58% des échantillons. Donc ce modèle n'est pas valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l'eau.

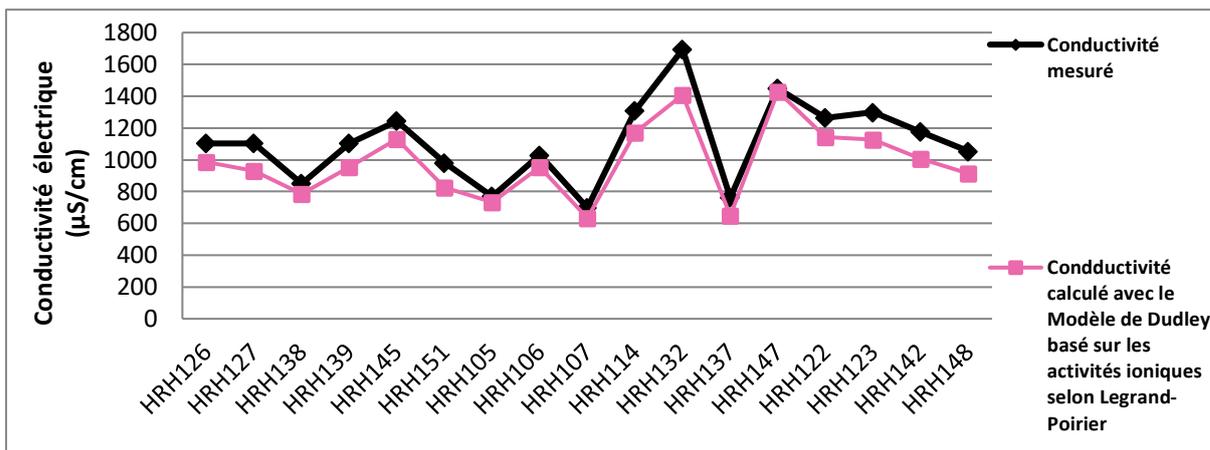
**III.4.10. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier**



**Figure III.31:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2018)



**Figure III.32:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2019)

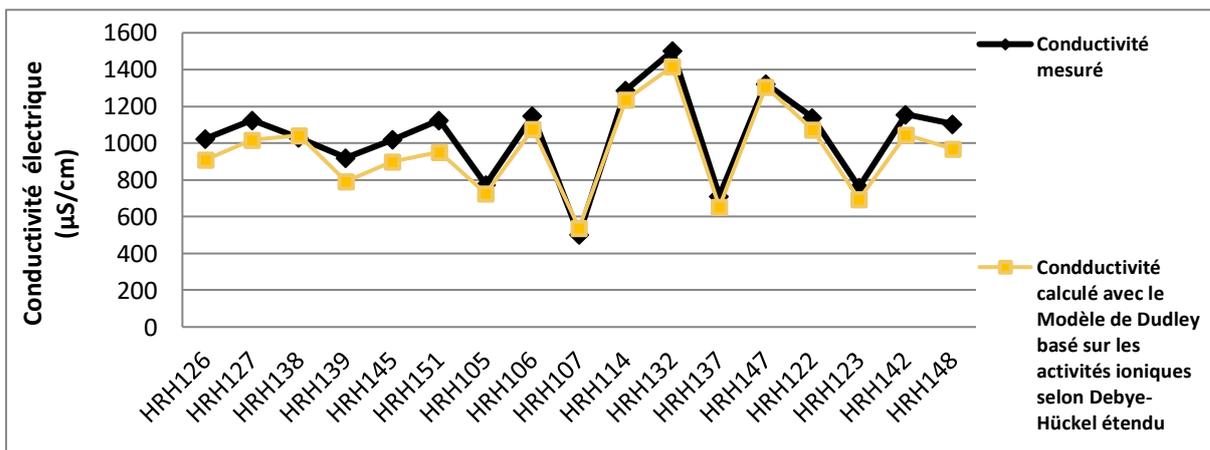


**Figure III.33:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2020)

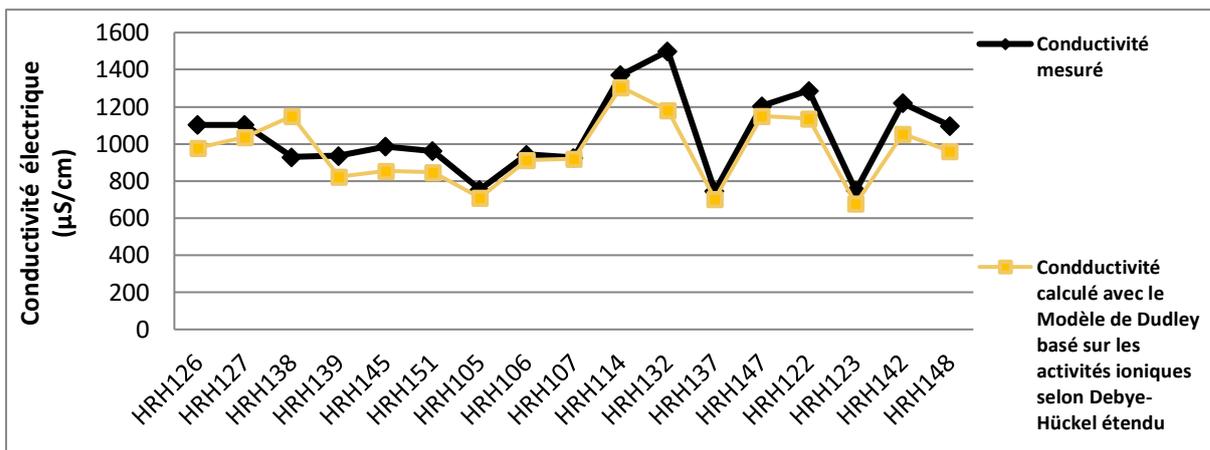
• **Interprétation des résultats**

D’après les figures (III.31, 32, et 33) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Legrand-Poirier, sont inférieures aux valeurs mesurés. L’erreur relative dépasse les 10% pour 52% des échantillons. Donc ce modèle n’est pas valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l’eau.

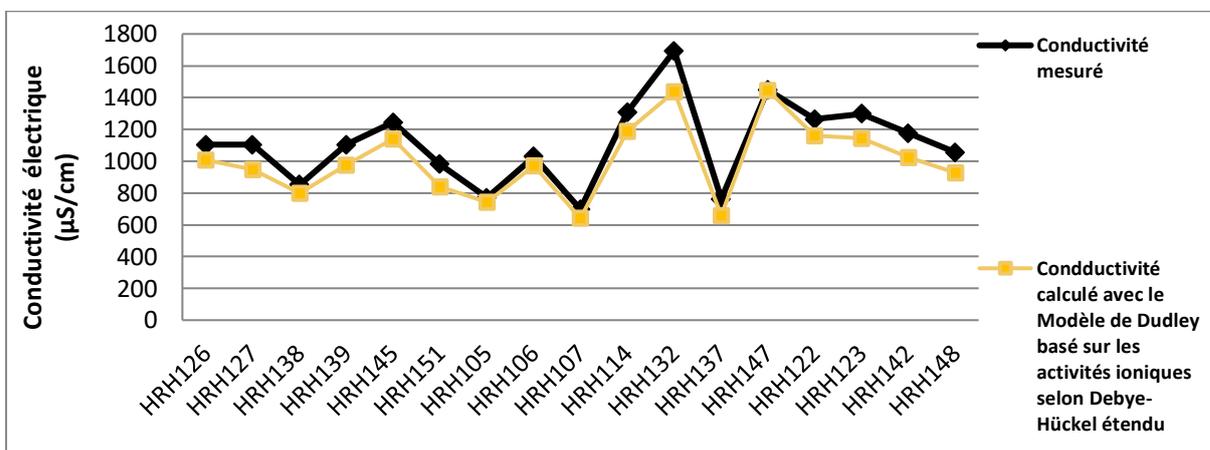
**III.4.11. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE)**



**Figure III.34:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2018)



**Figure III.35:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2019)

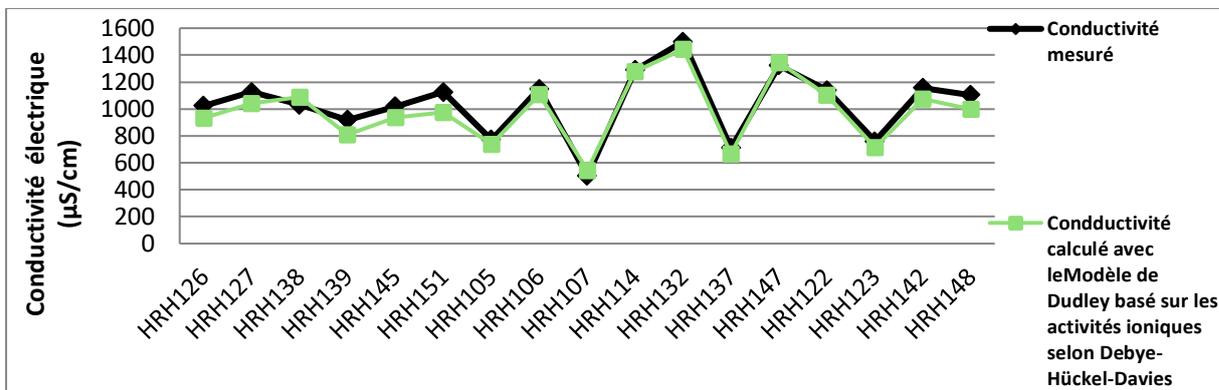


**Figure III.36:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE) (Année 2020)

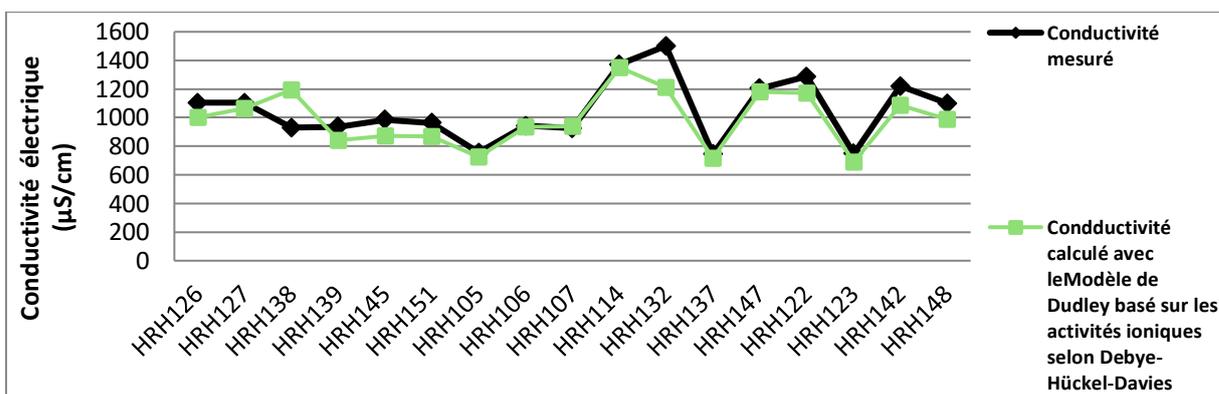
• **Interprétation des résultats**

D’après les figures (III.34, 35 et 36) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel étendu, sont inférieures aux valeurs mesurés. L’erreur relative dépasse les 10% pour 43% des échantillons. Donc ce modèle n’est pas valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l’eau.

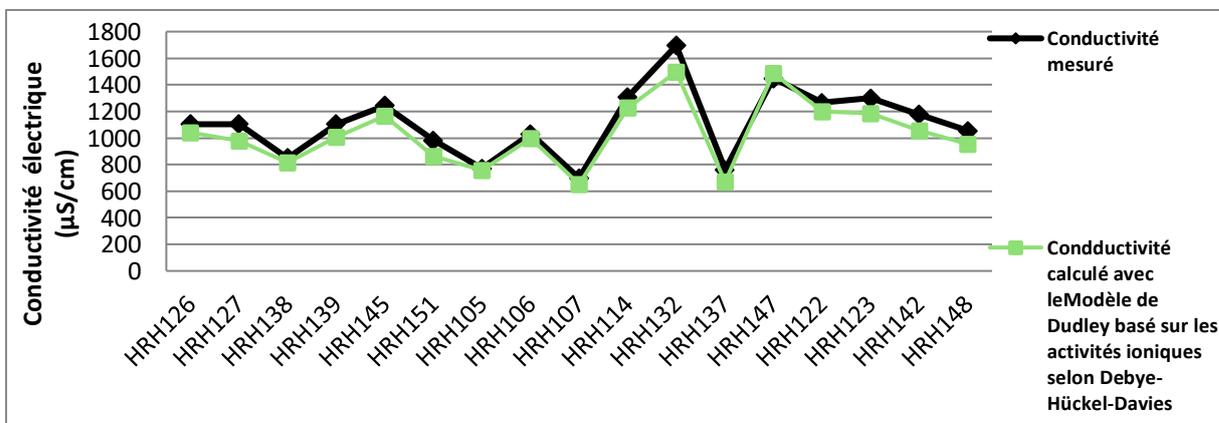
### III.4.12. Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies



**Figure III.37:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2018)



**Figure III.38:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2019)



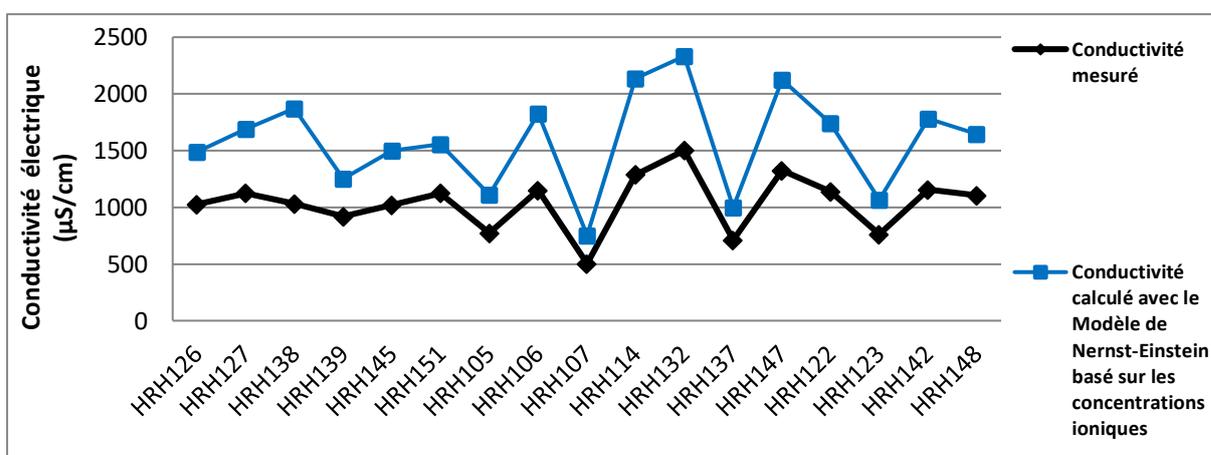
**Figure III.39:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2020)

• **Interprétation des résultats**

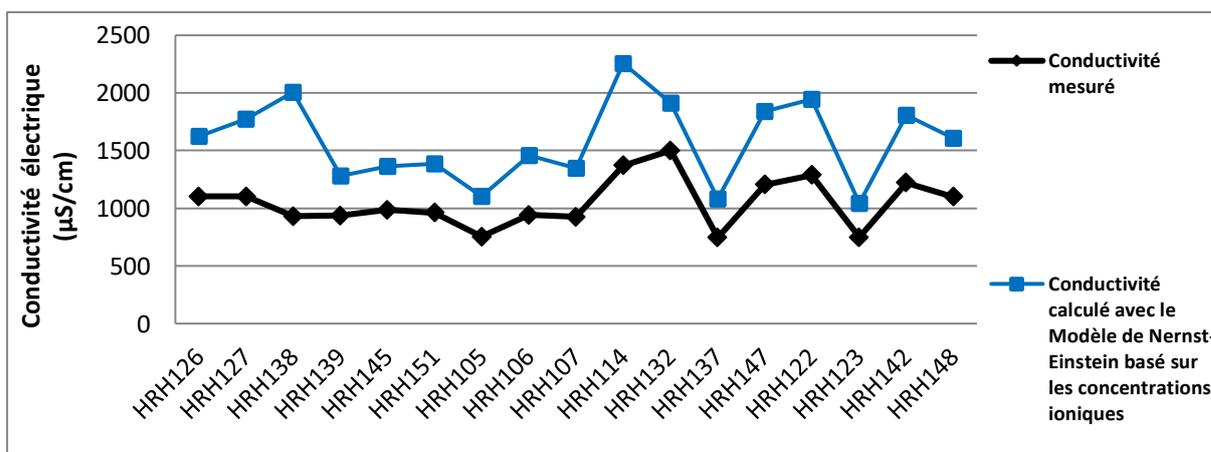
D'après les figures (III.37, 38 et 39) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies, sont proches aux valeurs de la conductivité mesurés. L'erreur relative ne dépasse pas 10% pour 84% de l'ensemble des échantillons.

Donc on peut dire que ce modèle de calcul est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l'eau.

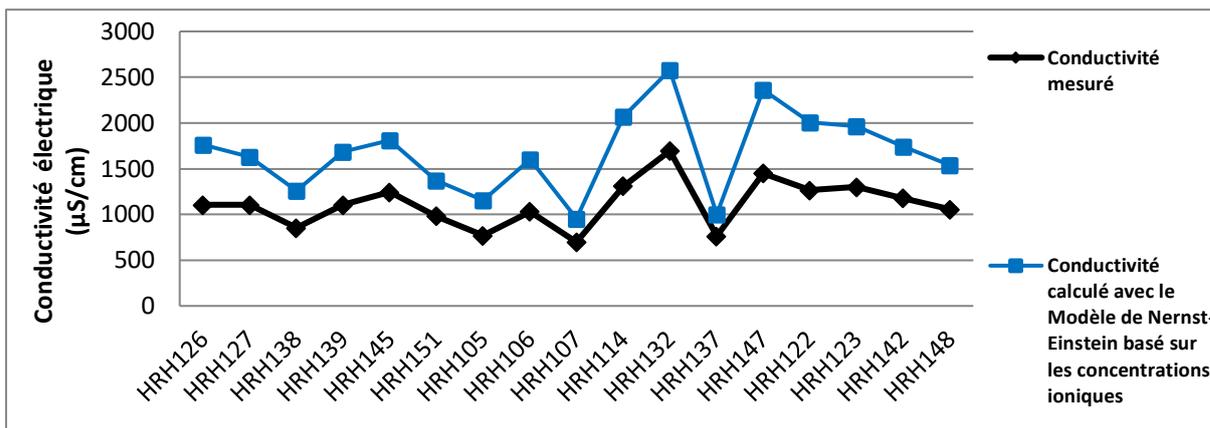
**III.4.13. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques**



**Figure III.40:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques (Année 2018)



**Figure III.41:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques (Année 2019)

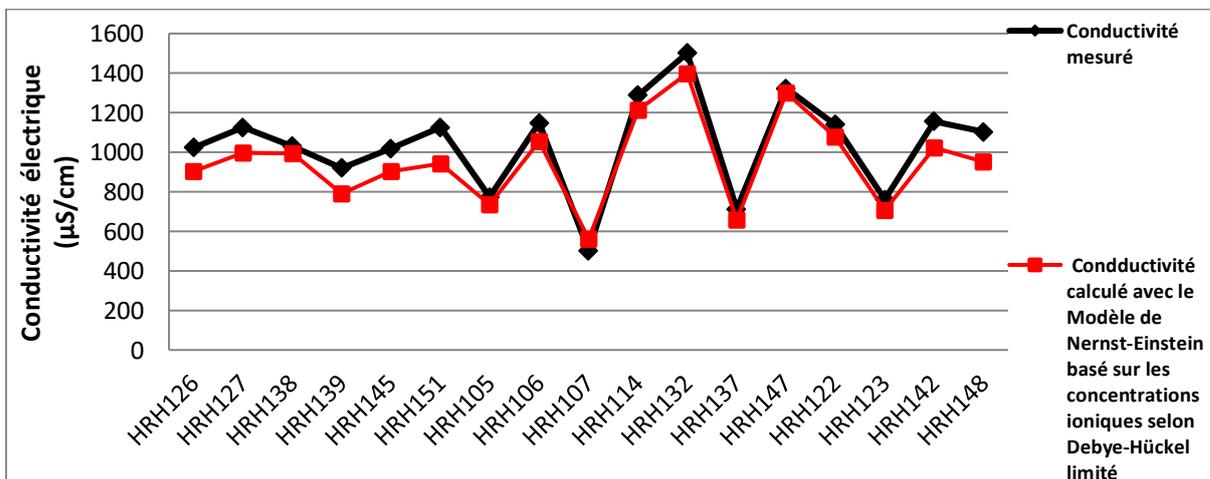


**Figure III.42:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques (Année 2020)

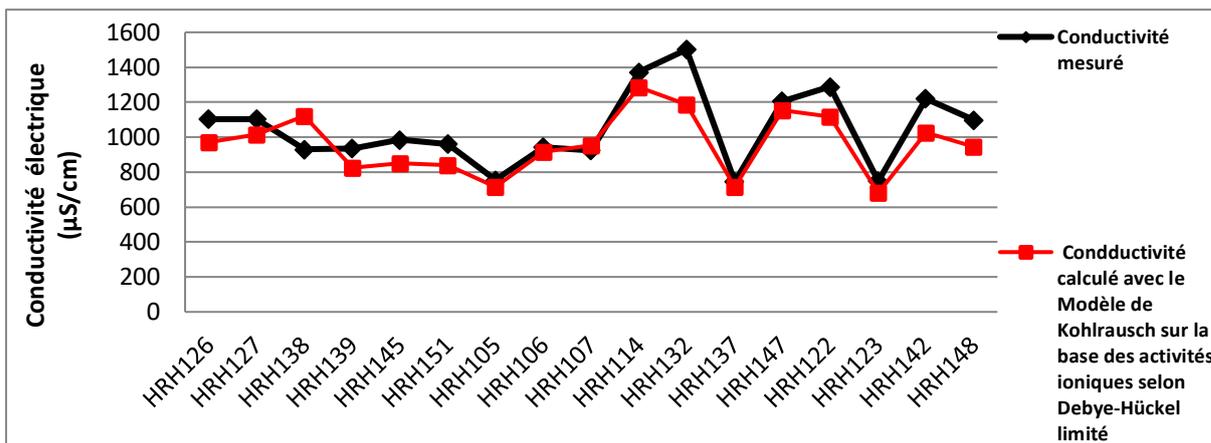
• **Interprétation des résultats**

D'après les figures (III.40, 41 et 42) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Nernst-Einstein basé sur les concentrations ioniques, sont supérieures aux valeurs mesurées. L'erreur relative dépasse les 25% pour 100% des échantillons. Donc ce modèle n'est pas valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l'eau.

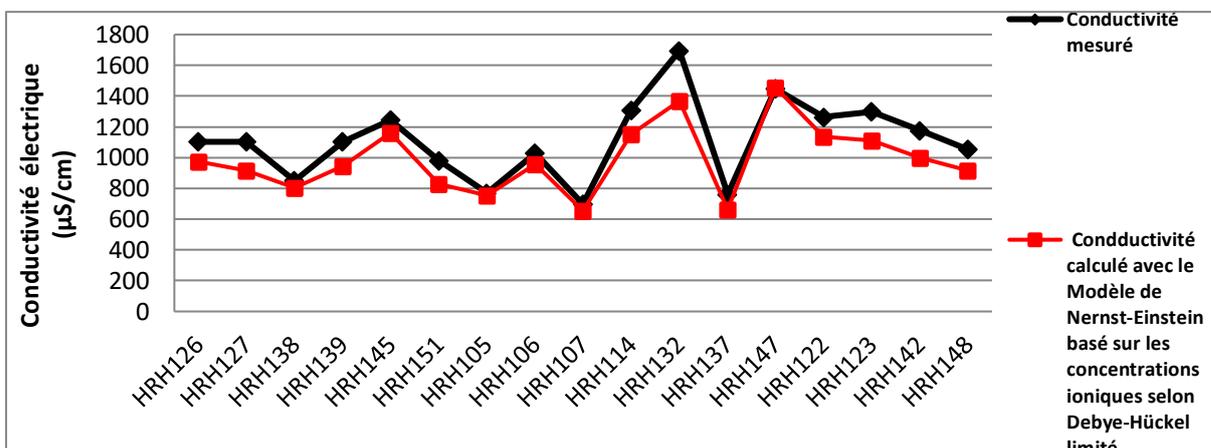
**III.4.14. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel limité (DHL)**



**Figure III.43:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel limité (Année 2018)



**Figure III.44:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel limité (Année 2019)

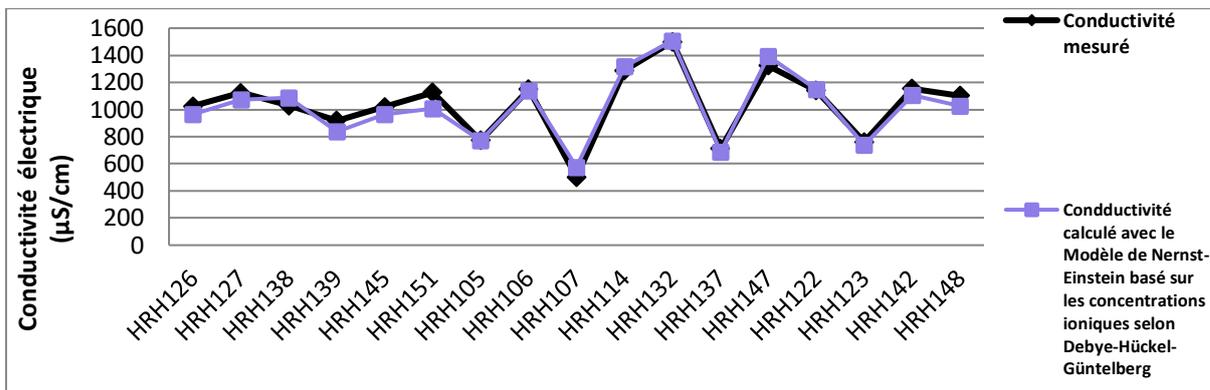


**Figure III.45:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel limité (Année 2020)

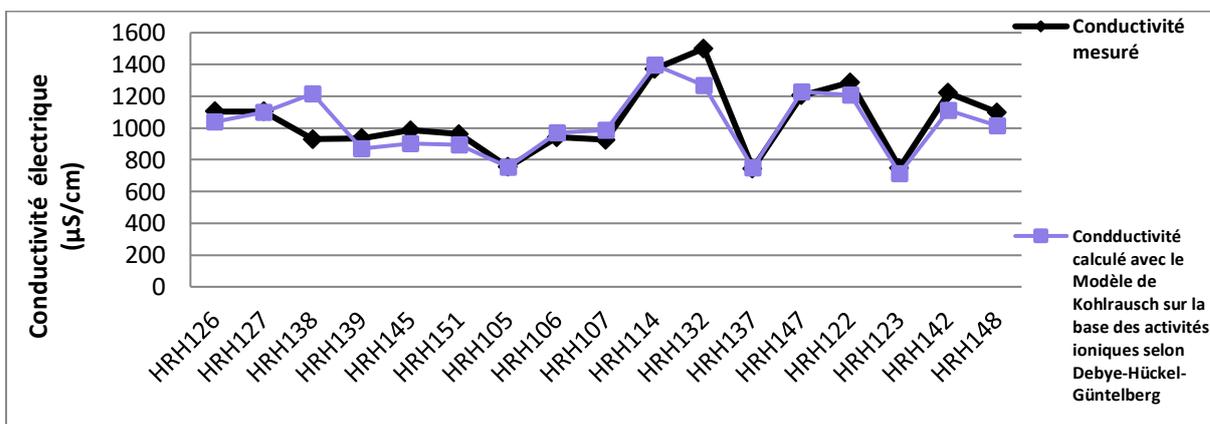
• **Interprétation des résultats**

D’après les figures (III.43, 44 et 45) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel limité, sont inférieures aux valeurs mesurés. L’erreur relative dépasse les 10% pour 52% des échantillons. Donc ce modèle n’est pas valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l’eau.

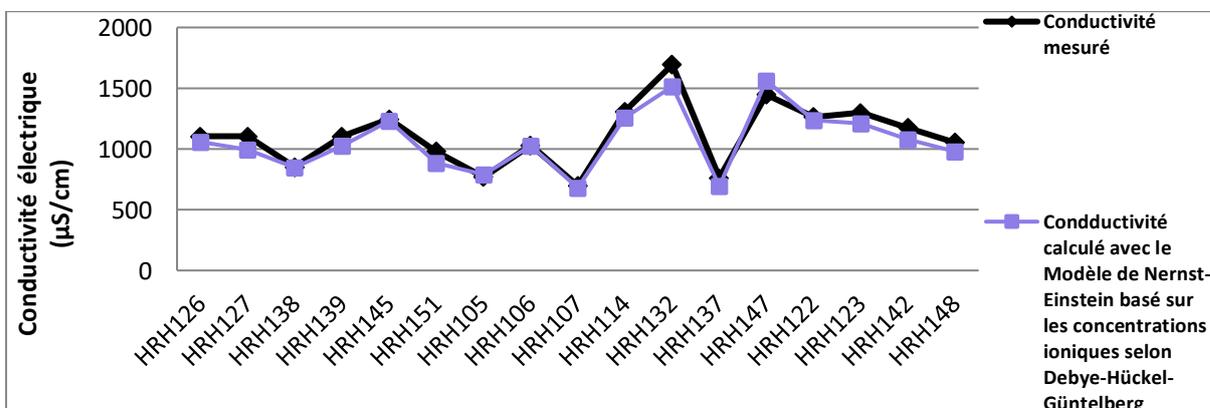
**III.4.15. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (AG)**



**Figure III.46:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2018)



**Figure III.47:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2019)



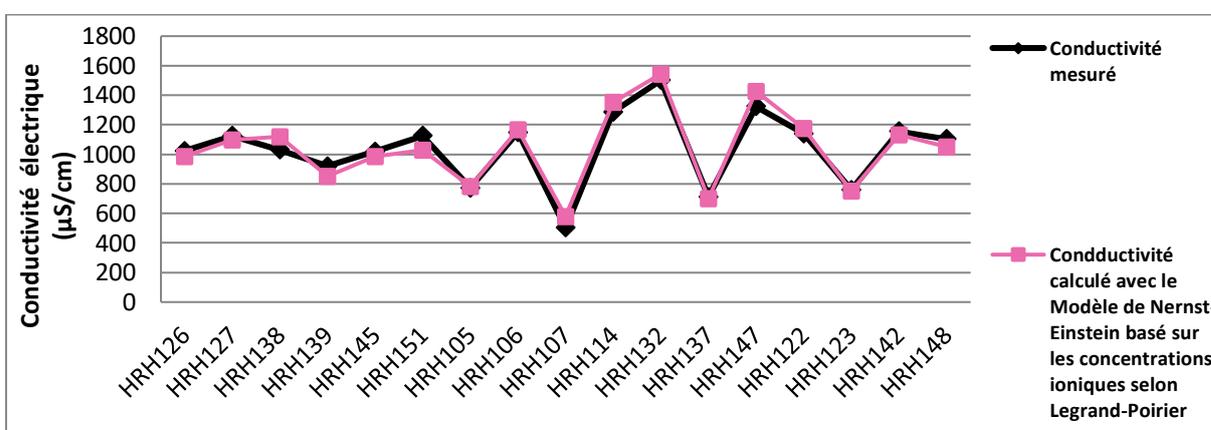
**Figure III.48 :** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg (Année 2020)

• **Interprétation des résultats**

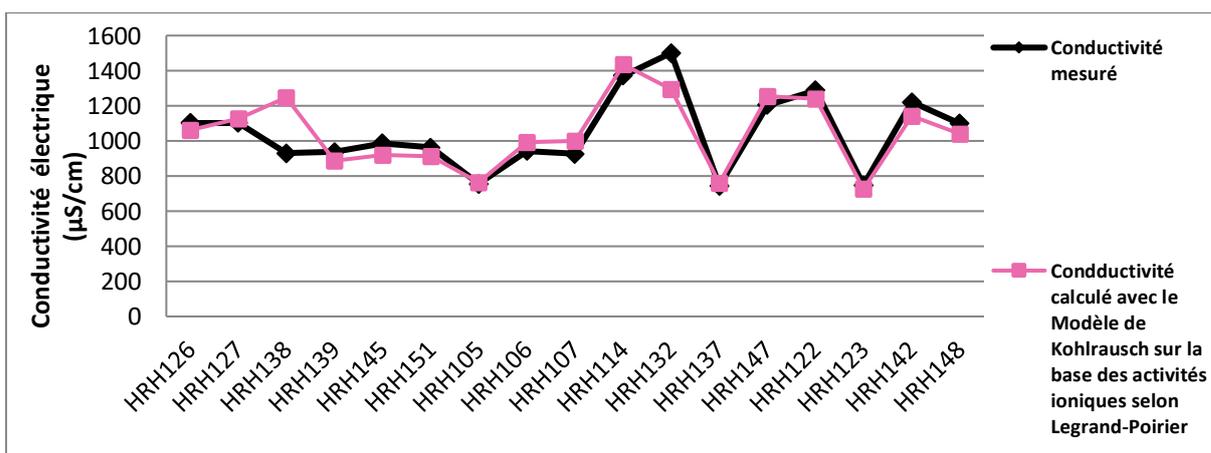
D'après les figures (III.46, 47 et 48) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg, sont proches aux valeurs de la conductivité mesurés. L'erreur relative ne dépasse pas 10% pour 88% de l'ensemble des échantillons.

Donc on peut dire que ce modèle de calcul est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l'eau.

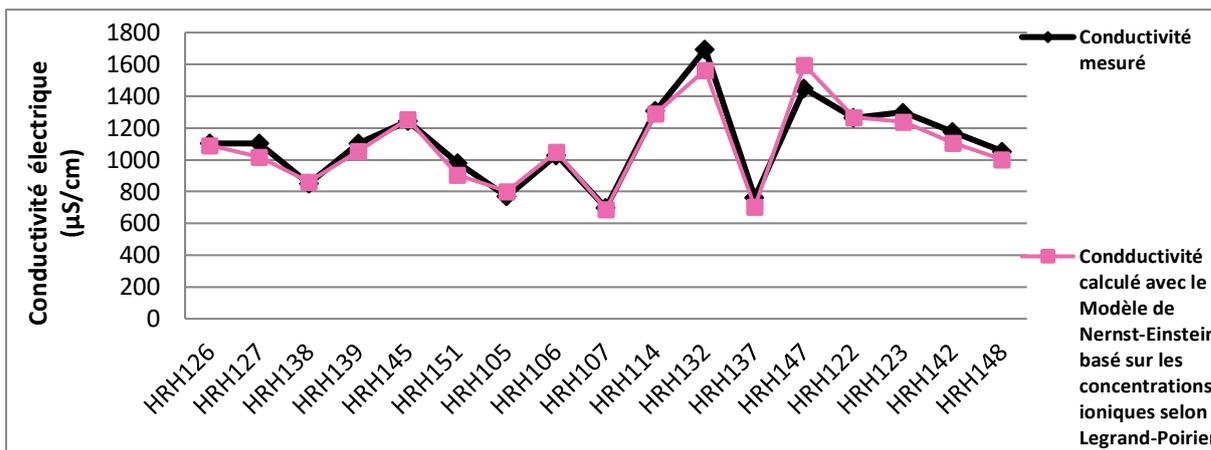
**III.4.16. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Legrand-Poirier**



**Figure III.49:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2018)



**Figure III.50:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2019)



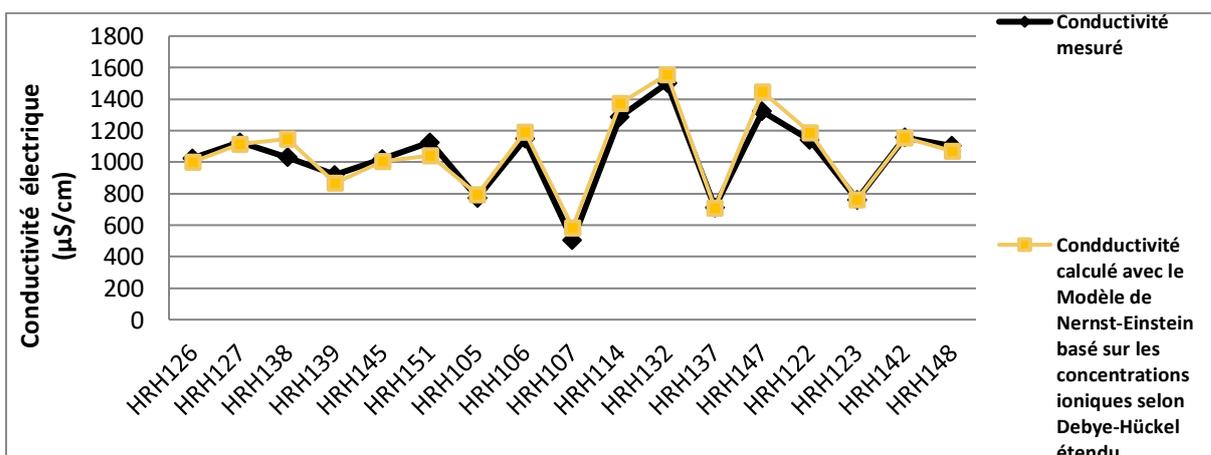
**Figure III.51:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Legrand-Poirier (Année 2020)

• **Interprétation des résultats**

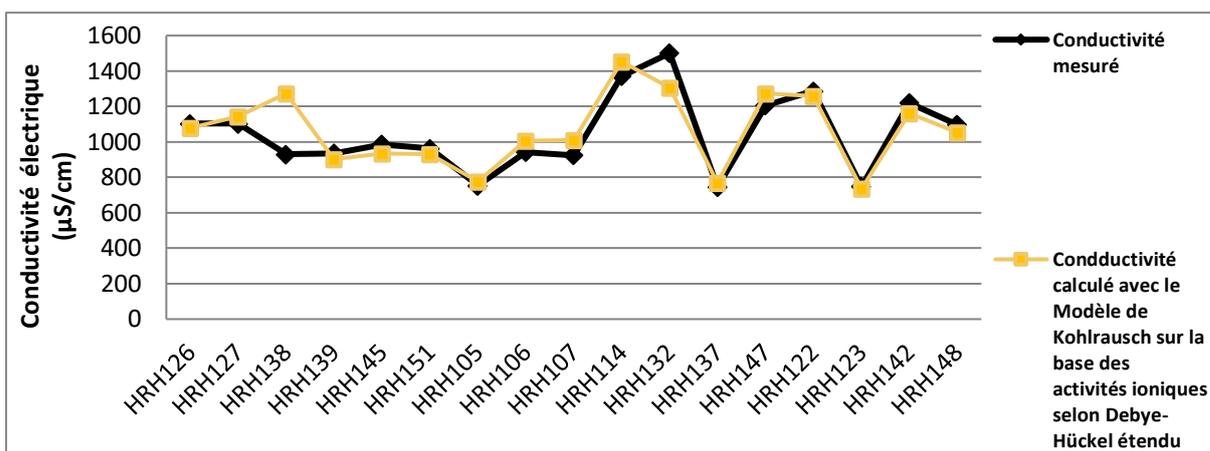
D’après les figures (III.49, 50 et 51) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Legrand-Poirier, sont très proches aux valeurs de la conductivité mesurés. L’erreur relative ne dépasse pas 10% pour 94% de l’ensemble des échantillons.

Donc le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Legrand-Poirier est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l’eau.

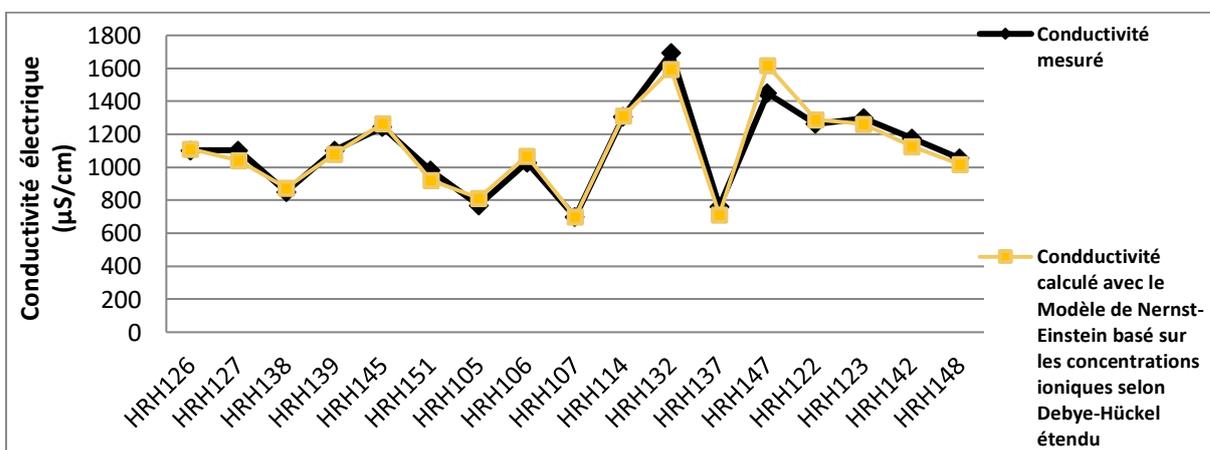
**III.4.17. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel étendu (DHE)**



**Figure III.52:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel étendu (Année 2018)



**Figure III.53:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (Année 2019)



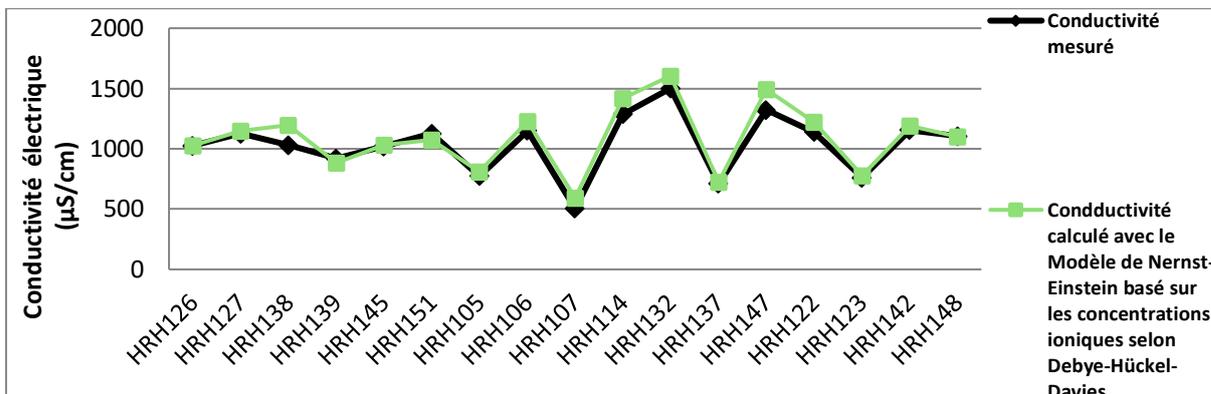
**Figure III.54:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu (Année 2020)

- **Interprétation des résultats**

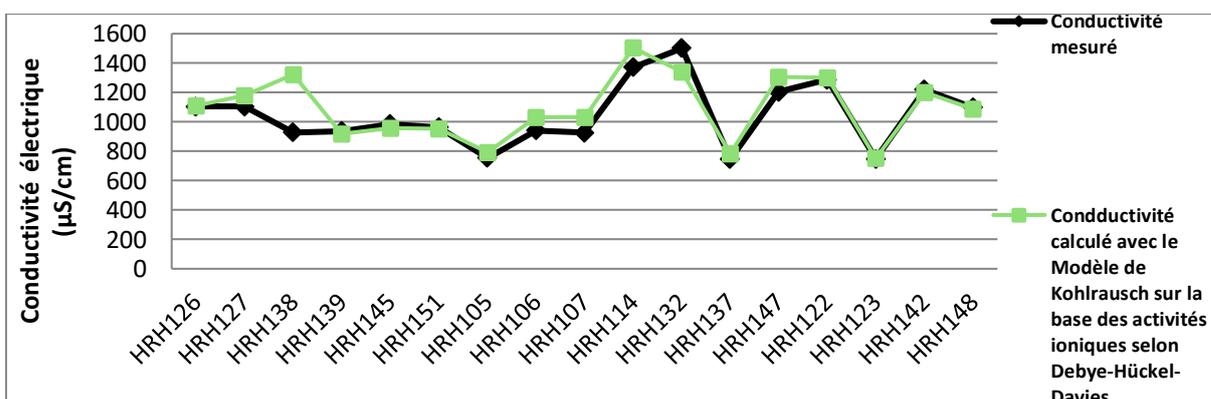
D'après les figures (III.52, 53 et 54) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu, sont très proches aux valeurs de la conductivité mesurés. L'erreur relative ne dépasse pas 10% pour 90% de l'ensemble des échantillons.

Donc le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l'eau.

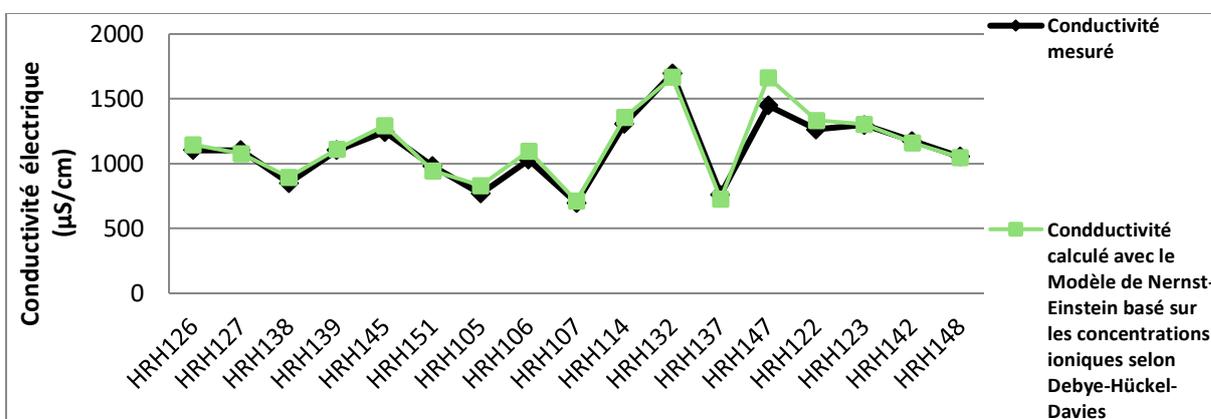
**III.4.18. Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies**



**Figure III.55:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2018)



**Figure III.56:** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2019)



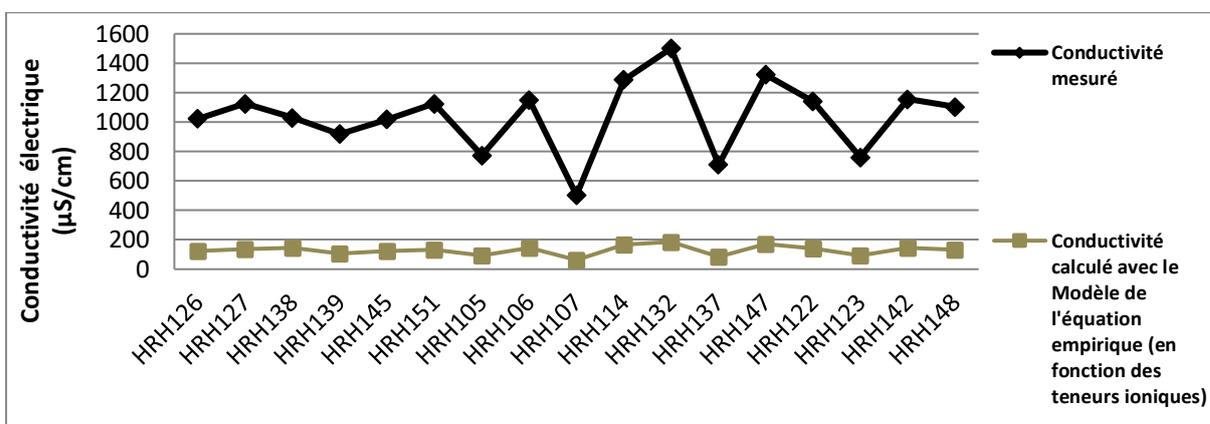
**Figure III.57 :** Simulation graphique des résultats de calcul de la conductivité électrique avec le Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies (Année 2020)

• **Interprétation des résultats**

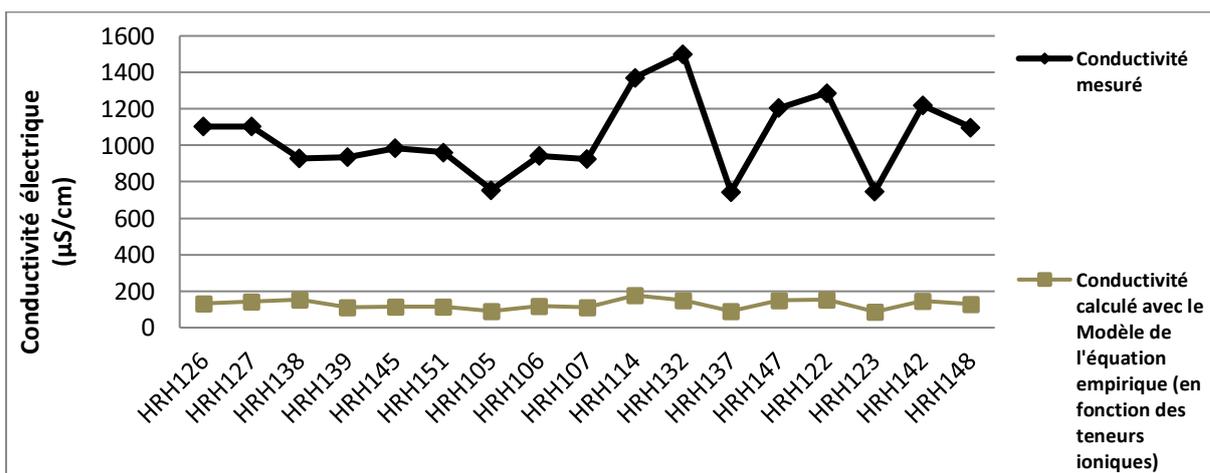
D'après les figures (III.55, 56 et 57) on remarque que les résultats obtenus par le calcul de Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies, sont proches aux valeurs de la conductivité mesurés.

L'erreur relative pour 86% des échantillons ne dépasse pas 10%. Donc on peut dire que ce modèle de calcul est valide pour estimer les valeurs de la conductivité électrique de l'eau.

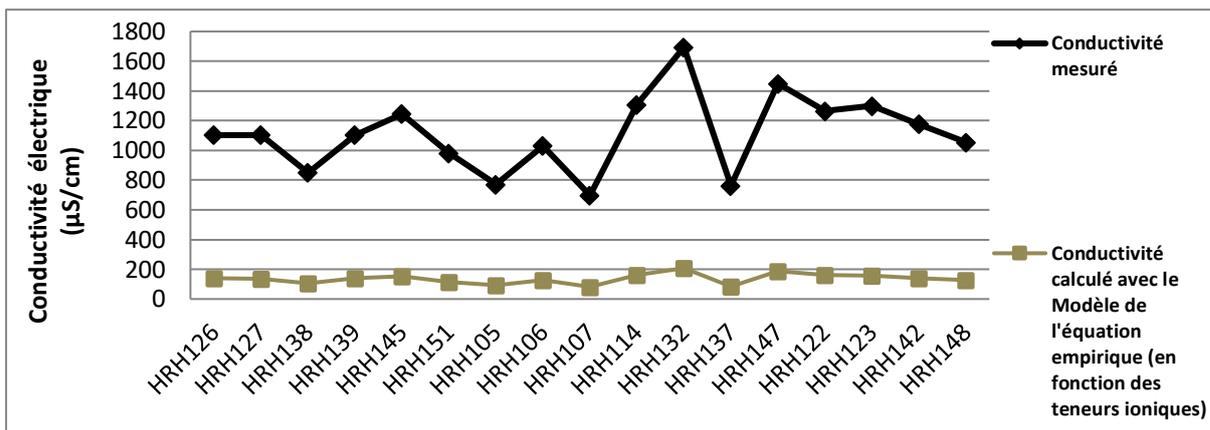
**III.4.19. Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction des teneurs ioniques)**



**Figure III.58:** Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique (en fonction des teneurs ioniques) (Année 2018)



**Figure III.59:** Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction des teneurs ioniques) (Année 2019)

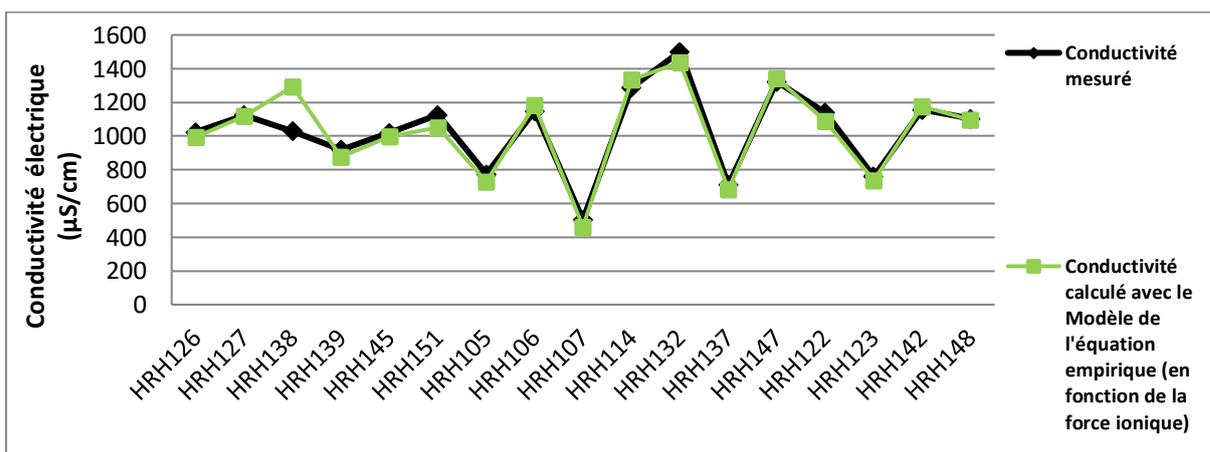


**Figure III.60:** Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction des teneurs ioniques) (Année 2020)

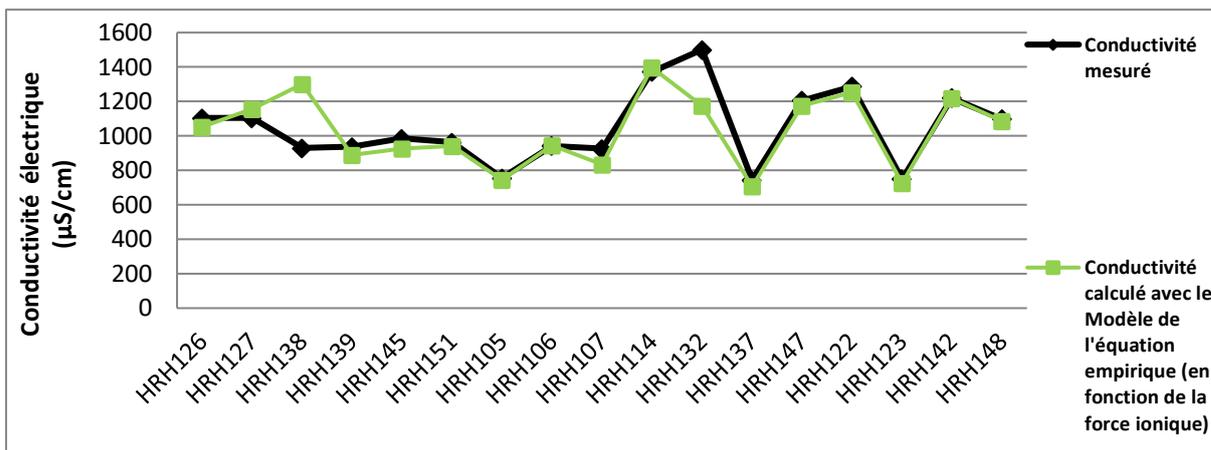
• **Interprétation des résultats**

D'après les figures (III.58, 59 et 60) on remarque que les résultats obtenus par le calcul, avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction des teneurs ioniques), ne sont pas conformes à celles mesurés. L'erreur relative varie entre 85% à 89% pour la totalité des échantillons. Donc ce modèle n'est pas valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l'eau.

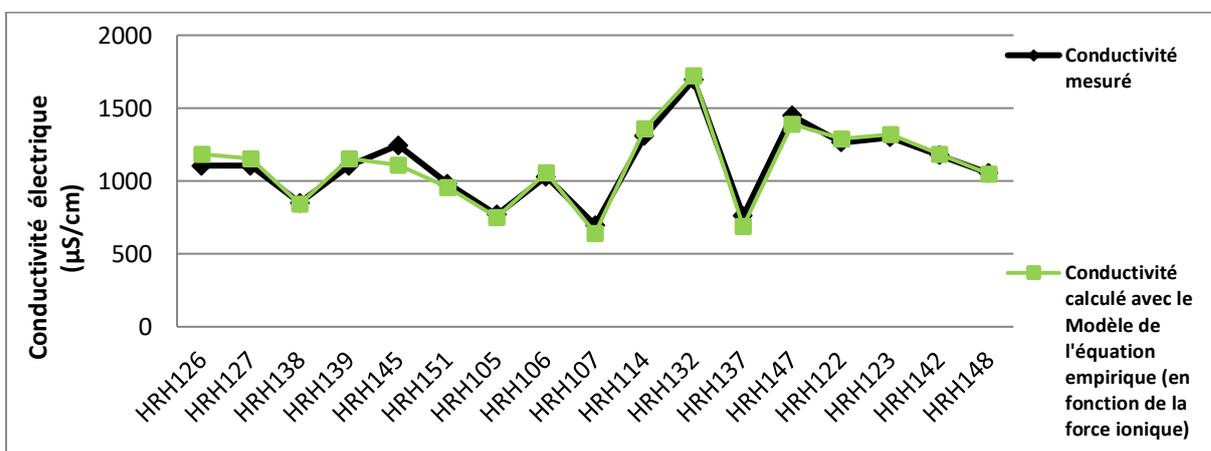
**III.4.20. Equation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique)**



**Figure III.61:** Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique) (Année 2018)



**Figure III.62:** Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique) (Année 2019)



**Figure III.63:** Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique) (Année 2020)

• **Interprétation des résultats**

D'après les figures (III.61, 62 et 63) on remarque que les résultats obtenus par le calcul avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique), sont très proches aux valeurs de la conductivité mesurés. L'erreur relative ne dépasse pas 10% pour 92% de l'ensemble des échantillons.

Donc l'équation empirique (en fonction de la force ionique) est valide pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l'eau.

III.4.21. Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{max}$ )

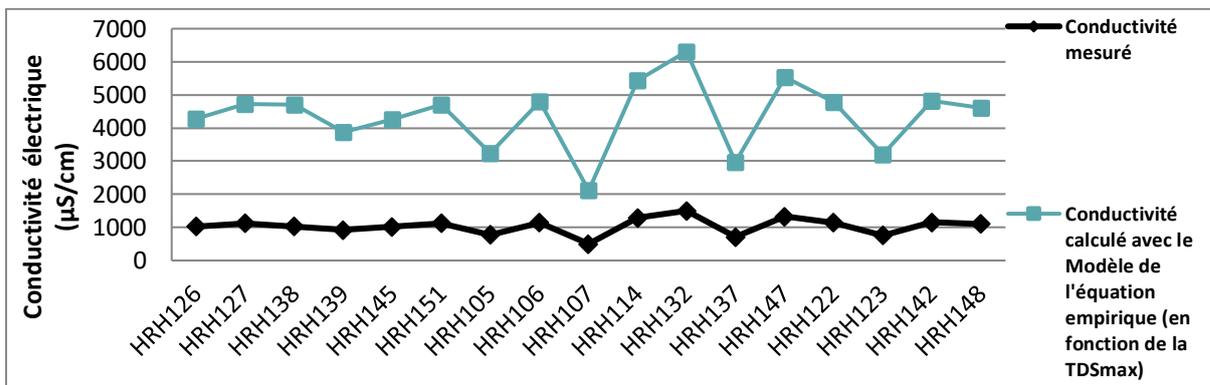


Figure III.64: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{max}$ ) (Année 2018)

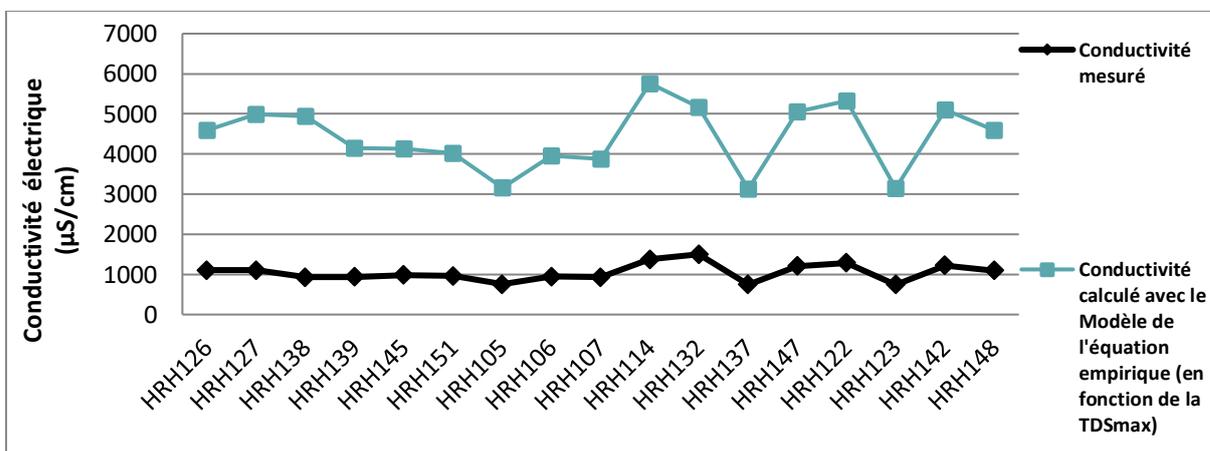


Figure III.65: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{max}$ ) (Année 2019)

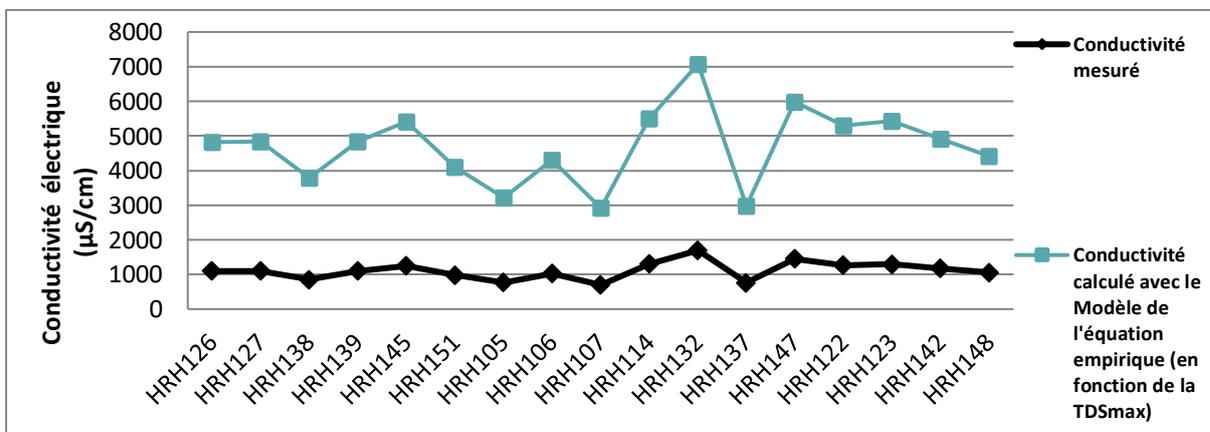


Figure III.66: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{max}$ ) (Année 2020)

III.4.22. Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{min}$ )

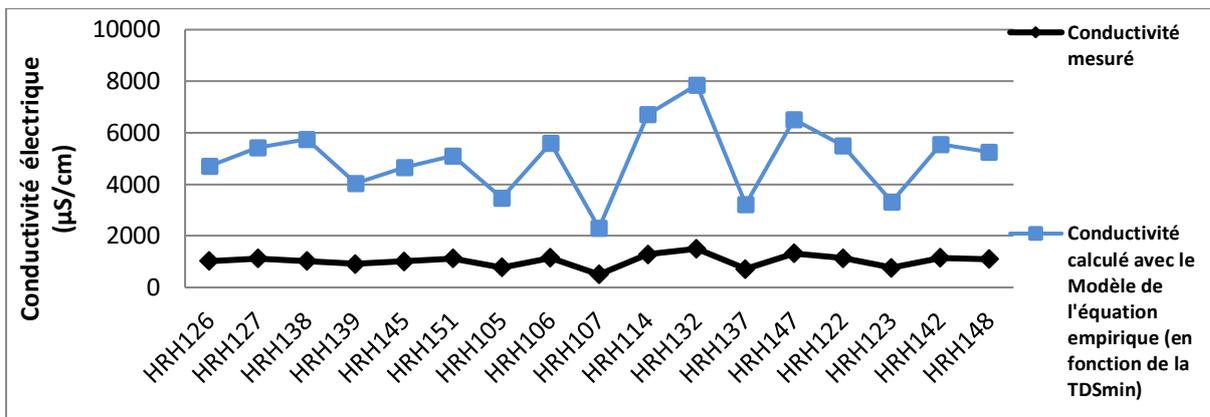


Figure III.67: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{min}$ ) (Année 2018)

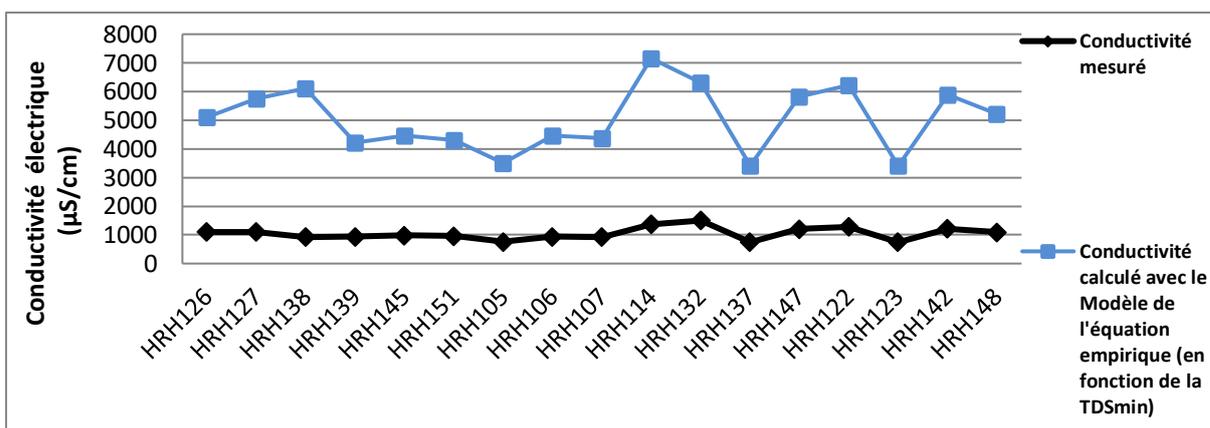


Figure III.68: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{min}$ ) (Année 2019)

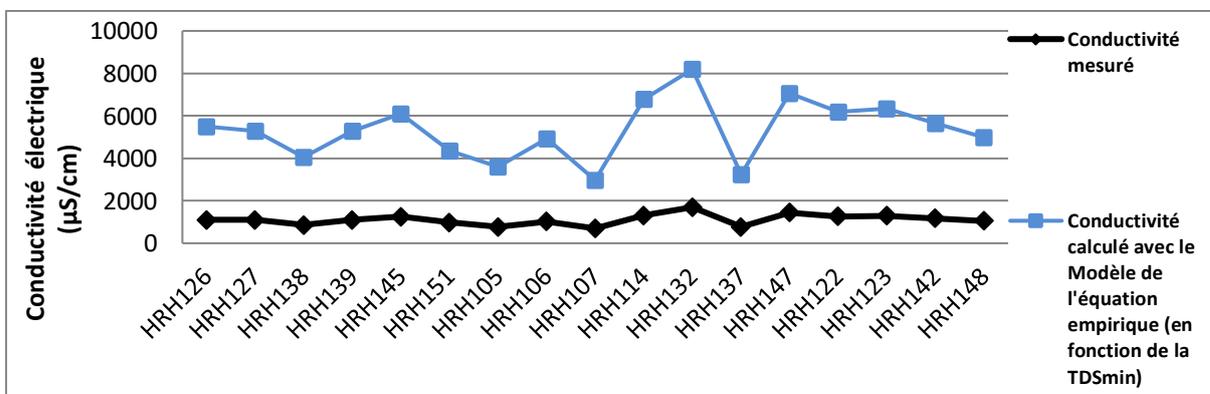


Figure III.69: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{min}$ ) (Année 2020)

III.4.22. Équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{moy}$ )

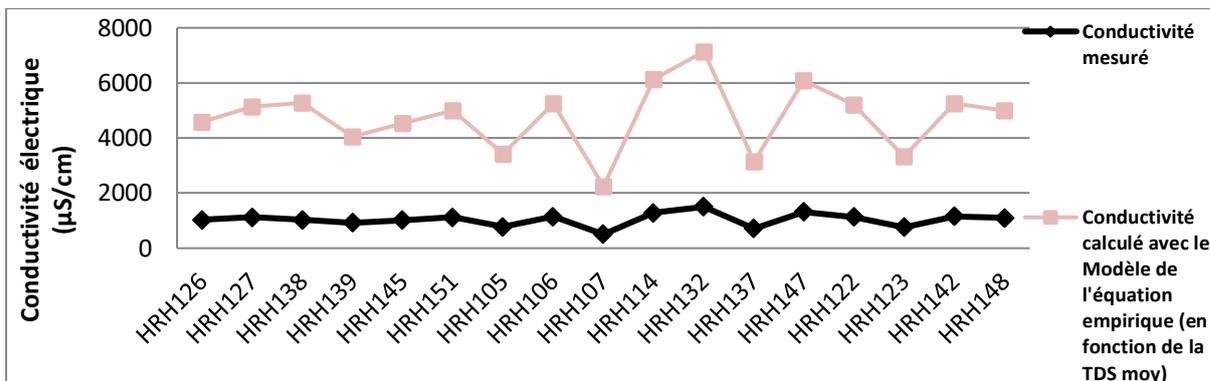


Figure III.70: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{moy}$ ) (Année 2018)

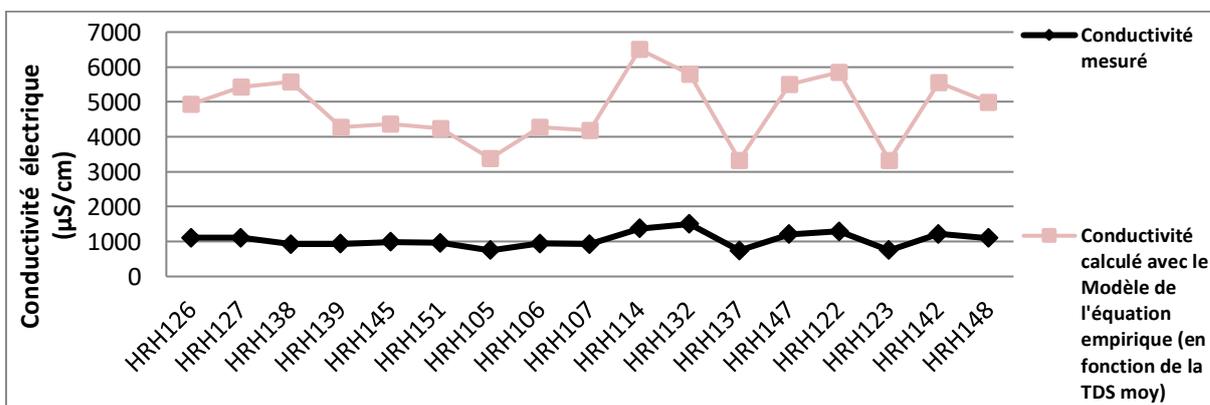


Figure III.71: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{moy}$ ) (Année 2019)

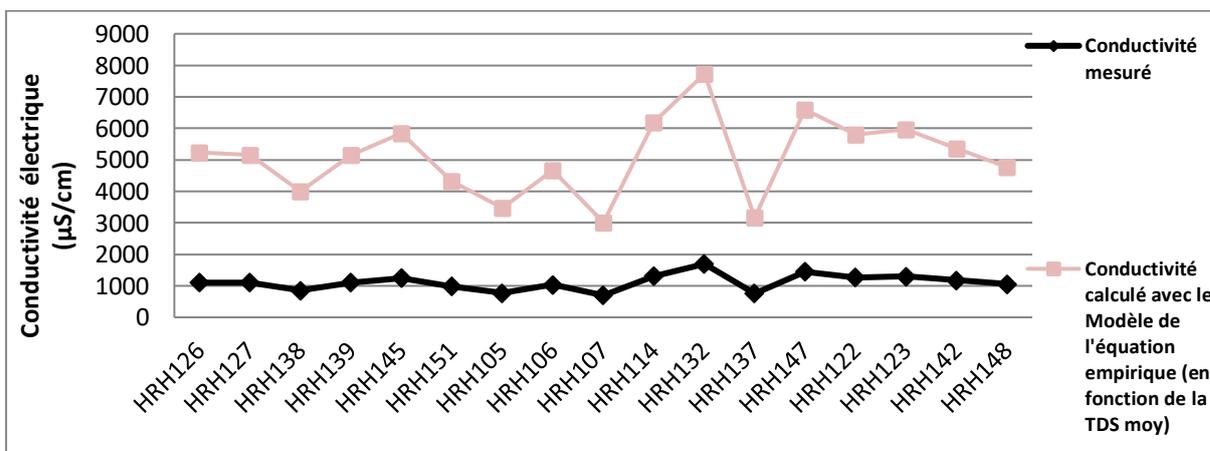


Figure III.72: Simulation graphique des résultats avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la  $TDS_{moy}$ ) (Année 2020)

- **Interprétation des résultats**

D'après les figures (III.64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71 et 72) on remarque que les résultats obtenus par le calcul, avec l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau, en fonction de ( $TDS_{max}$ ,  $TDS_{min}$  et  $TDS_{moy}$ ) sont très différents des valeurs mesurés. L'erreur relative dépasse 300% pour la totalité des échantillons. Ce modèle de calcul avec cette formule est invalide pour estimer la conductivité électrique de l'eau.

### III.5. Remarque globale

Le tableau suivant présente les modèles de calcul les plus performants pour estimer la conductivité électrique d'une eau souterraines dans cette étude:

**Tableau III.14:** Les modèles les plus performants pour estimer la valeur de la conductivité électrique de l'eau

Modèle de calcul de la conductivité électrique de l'eau	Pourcentage de fiabilité (%)	L'erreur relative commise (%)
▪ Modèle de Kohlrausch basé sur les Activité ioniques, selon Legrand-Poirier	94%	-10%
▪ Modèle de Kohlrausch basé sur les Activités ioniques selon Debye-Hückel étendu	94%	-10%
▪ Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Legrand-Poirier	94%	-10%
▪ L'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique)	92%	-10%
▪ Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel étendu	90%	-10%
▪ Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Güntelberg	88%	-10%
▪ Modèle Kohlrausch basé sur les Activité ioniques, selon Debye-Hückel-Davies	88%	-10%
▪ Modèle Kohlrausch basé sur les Activité ioniques, selon Debye-Hückel-Güntelberg	86%	-10%
▪ Modèle de Nernst-Einstein basé sur les Activité ioniques selon Debye-Hückel-Davies	86%	-10%
▪ Modèle de Dudley basé sur les activités ioniques selon Debye-Hückel-Davies	84%	-10%

**NB :**

- ✓ La conductivité électrique est calculée à 25°C
- ✓ l'erreur relative commise est fixé à 10%.

L'analyse des résultats obtenus par la modélisation de la conductivité électrique à partir des paramètres chimiques correspondant aux éléments majeurs, a montré qu'il y a une bonne corrélation entre la conductivité électrique et les ions prédominants de la solution (KOUASSIA M., 2017). Les données d'analyses physico-chimiques des (17 forages) de la région de Hassi R'mel, ont montré qu'il y'a un changement dans la conductivité électrique et les teneurs des ions majeurs des mêmes forages, dans le même endroit durant la période (2018-2020). Ce changement peut s'expliquer par l'effet de la nature géologique de la région sur la composition et la qualité de l'eau souterraine, autrement dit, l'interaction eau-sol implique un changement dans les concentrations des ions par conséquent un changement dans la conductivité électrique avec le temps. Ce qui confirme la corrélation entre les concentrations des ions majeurs et la conductivité électrique de l'eau.

Seulement 10 parmi 23 modèles de calcul proposés dans cette étude ont donné un pourcentage de fiabilité supérieur à 84%.

Au regard des résultats, les modèles de calcul les plus performants pour l'estimation de la conductivité électrique dans cette étude, sont basés sur les activités ioniques et la force ionique, contrairement aux modèles qui se base sur les concentrations ioniques, ce qui confirme l'hypothèse de la corrélation entre la conductivité et les ions majeurs les prédominants de la solution, mais aussi la relation directe avec l'activité ionique. Qui peut s'expliquer par :

L'activité ionique prend en considération le nombre d'ions réels qui contribuent à la conductivité électrique, contrairement à la concentration ionique; cette dernière prend en considération la totalité des ions, ce qui est irréel (Marandi A, 2013).

Les modèles de calcul mentionnés en haut peuvent donc être utilisés pour l'étude de la fiabilité des données physico-chimiques, à condition que les teneurs de tous les ions majeurs soient connus.

D'autre part, l'équation empirique de la conductivité électrique, en fonction de nombre de solides dissous dans l'eau, n'a donnée aucune estimation logique de la conductivité électrique; les valeurs obtenues (calculées) dépassent 300% des valeurs données (mesurées). Ce qui signifie qu'il n'y a pas de corrélation claire entre la détermination de la conductivité ionique à partir de TDS.

Par contre, dans la littérature, de nombreuses recherches ont été menées pour déterminer le rapport entre ces deux variables. La mesure de la valeur de la conductivité électrique est beaucoup plus facile que celle de TDS (Thirumalini.S, 2009) (Ali.N.S, 2012).

Par conséquent, le calcul de la valeur TDS basé sur la valeur de la conductivité électrique est très utile pour effectuer des recherches sur la qualité de l'eau (Siosemarde M, 2010). Les résultats des études existantes indiquent généralement que la relation entre TDS et conductivité électrique n'est pas toujours linéaire, cette situation dépend fortement de la salinité de l'eau et du contenu matériel. Plus le niveau de la salinité ou le contenu matériel est élevé, plus les équations mathématiques nécessaires pour décrire ces paramètres sont complexes (Cox.M, 2000).

Donc l'équation empirique de la conductivité électrique basée sur le TDS, est plus utile pour estimer le nombre de solides dissous dans l'eau (TDS) que d'estimer la valeur de la conductivité électrique.

Les modèles de calcul basés seulement sur les concentrations ioniques et le TDS, ne donnent pas des résultats fiables donc ils sont invalides dans le cas d'estimation de la conductivité électrique.

## II.6. Conclusion

La modélisation graphique de la conductivité électrique à partir des ions majeurs prédominants des eaux souterraines de la région de Hassi R'mel, de la wilaya de Laghouat a été réalisée.

- Les premiers résultats de la balance ionique montrent que les analyses chimiques sont acceptables.
- Le modèle de Kohlrausch basé sur les activités ioniques, selon (Legrand-Poirier, Debye-Hückel étendu), le modèle de Nernst-Einstein basé sur les activités ioniques selon (Legrand-Poirier, Debye-Hückel étendu), et l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique) sont les modèles les plus performants et les plus robustes pour estimer la conductivité électrique, ces derniers ont donné des valeurs très proches (approximativement identiques) aux valeurs de la conductivité mesurée, l'erreur relative est estimée à (-10%) pour plus de 90% des échantillons.
- Ces modèles de calculs peuvent donc être utilisés pour l'étude de la fiabilité des données de la conductivité électrique de l'eau.
- Les analyses physico-chimiques ainsi que les données relatives à la conductivité électrique des eaux souterraines de la région de Hassi R'mel, délivrés par le laboratoire de CRD-SONATRACH (Boumerdés) sont dans l'ensemble fiables, sans prendre compte des erreurs de mesures au laboratoire, et les erreurs relatives au calcul théorique.

# **Conclusion générale**

---

## Conclusion générale

Avec ce travail, nous avons essayés de résoudre une problématique et d'apporter une contribution aux travaux d'applications de contrôle de qualité des eaux naturelles.

Nous avons pris le cas des eaux souterraines de la région de Hassi R'mel, cette dernière est située au nord de la plate-forme saharienne à 550 km au sud d'Alger et à 120 km au Sud de la wilaya de Laghouat. La zone est caractérisée par un climat désertique dont l'aridité est importante. Sur le plant structurel, la région est représentée par des formations tertiaires et quaternaires, constituées par des grés fins, des calcaires et argiles d'âge Cénomaniens, des dolomies vacuolaires et calcaires. La nappe phréatique du Senono-Turonien est exploitable, cette dernière assure son alimentation par les infiltrations des eaux des précipitations.

L'étude était faite sur trois séries d'échantillons de 17 Forages du champ Hassi R'mel, les données sont des résultats d'analyses des paramètres physico-chimiques réalisées sur une période allant de (2018 à 2020). Le paramètre étudié est la conductivité électrique de l'eau, la modélisation de ce dernier est faite par 23 modèles de calcul théorique suggérés. L'examen des variations de la conductivité électrique calculée par rapport à la valeur mesurée nous a permis de déterminer les modèles les plus performants pour l'estimation de la conductivité électrique, le Modèle de Kohlrausch basé sur les activités ioniques selon (Legrand-Poirier et Debye-Hückel étendu), Nernst-Einstein basé sur les activités ioniques selon (Legrand-Poirier et Debye-Hückel étendu) et l'équation empirique de la conductivité électrique de l'eau (en fonction de la force ionique) ont donné des résultats très acceptables par rapport aux autres modèles avec une erreur relative qui ne dépasse pas 10% pour plus de 90% des échantillons.

Les résultats obtenus au cours de cette étude ont permis d'affirmer que la fiabilité des résultats d'analyses physico-chimiques des eaux souterraines par la modélisation de la conductivité électrique est une approche pertinente.

## **Références bibliographiques**

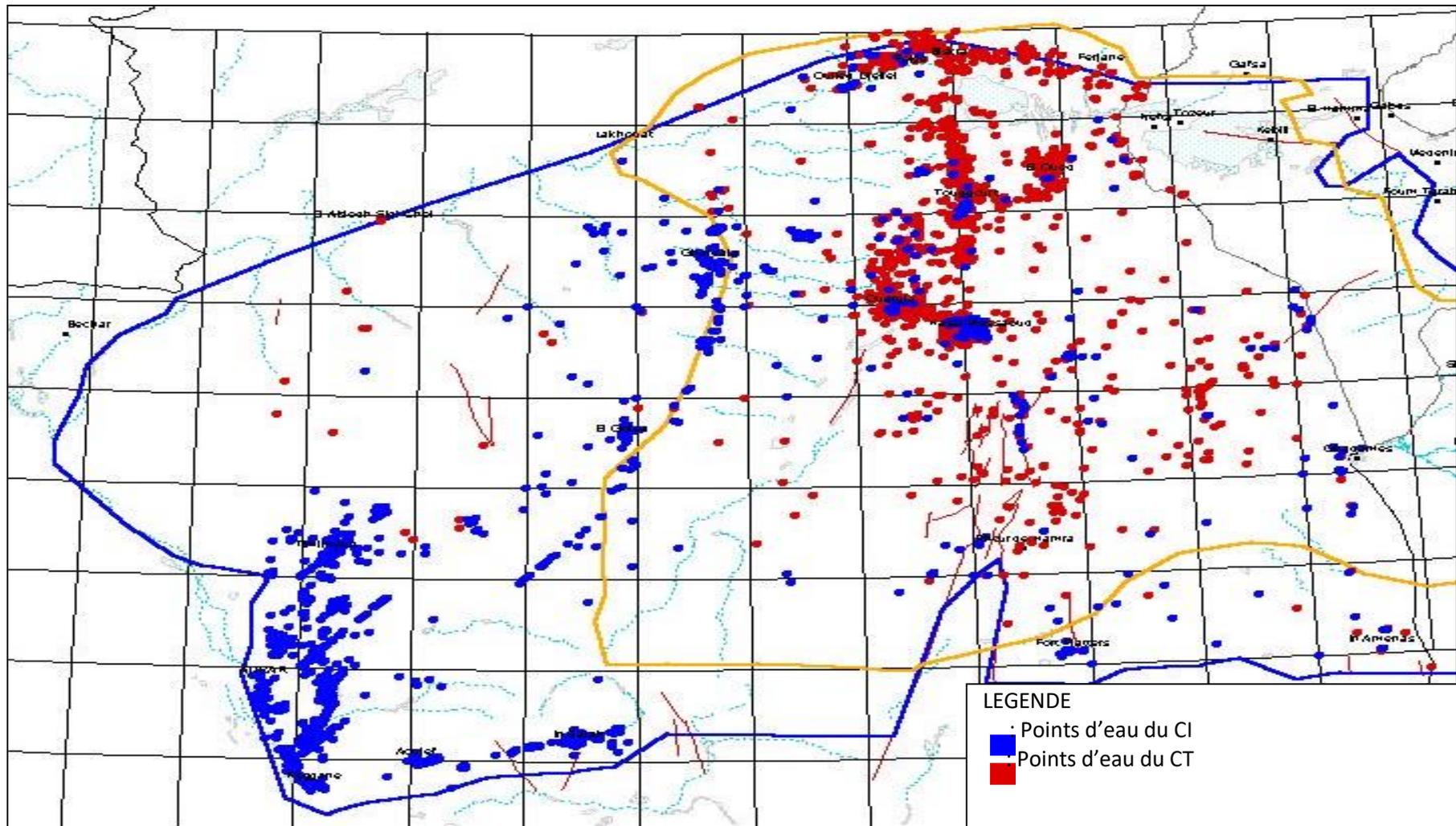
## Références bibliographiques

- Ali.N.S, K. (2012). A case study on the relationship between conductivity and dissolved solids to evaluate the potential for reuse of reclaimed industrial wastewater KSCE J. Civ. Eng. p708. J. Civ. Eng.
- Aricha.M. (2003). Le Complexe Hydrogéologique de Hassi R'Mel, document interne de la DP de Sonatrach. Bordas, Paris1.
- BUSSON, G. (1970). Essai de synthèse des données des sondages algéro-tunisiens ; CNRS .
- Cox.M, M. a. (2000). Relationship between conductivity and analyzed composition in a large set of natural surface-water samples. Queensland, Australia Environ.
- Daniels W L, Zipper C E, Orndorff Z W, Skousen J, Barton C D, McDonald L M and Beck M A (2016). Predicting total dissolved solids release from central Appalachian coal mine spoils Environ. Pollut, p.371–379.
- Driscoll.F.G. (1986). Groundwater and wells. Johnson Division Publishers. St-Paul, Minnesota.
- FABRE, J. (1976). Introduction à la géologie du Sahara algérien ; SNED , Alger.
- G. Carlson, “Total Dissolved Solids from Conductivity,” Technical note 14, www. In – situ. Com, 2005.
- Gaci.N. (2020). Caractérisation des eaux souterraines de la région Hassi R'Mel (w.Laghouat), mémoire de master de l'université de Bouira.
- Google maps. (s.d.).
- J. D. Hem, “Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water,”
- KOUASSI A. M., K. K. (2017). application of a statistical model to the simulation of the electrical conductivity of groundwater: case study of the ex-area of n'zi-comoé (center-east of ivory coast). *Larhyss Journal*, ISSN 1112-3680.
- LASM T., DE LASME O., OGA Y.M.S., YOUAN-TA M., BAKA D., KOUAME K.F.,
- Lyazidi.A, N. (2021). Contribution à l'étude hydrogéologique et hydrochimique des nappes aquifères du Complexe Terminal, région de Hassi Messaoud.
- MANSSOURI T., SAHBI H., MANSSOURI I. (2014). Elaboration of stochastic mathematical models for the prediction of parameters indicative of groundwater quality Case of Souss Massa- Morocco-IJCER, International Journal of Computational Engineering Research, Vol.4, n°5, p.31-40.
- Marandi A, P. M. (2013). A new approach for describing the relationship between electrical conductivity and major anion concentration in natural waters. Appl. Geochemistry.

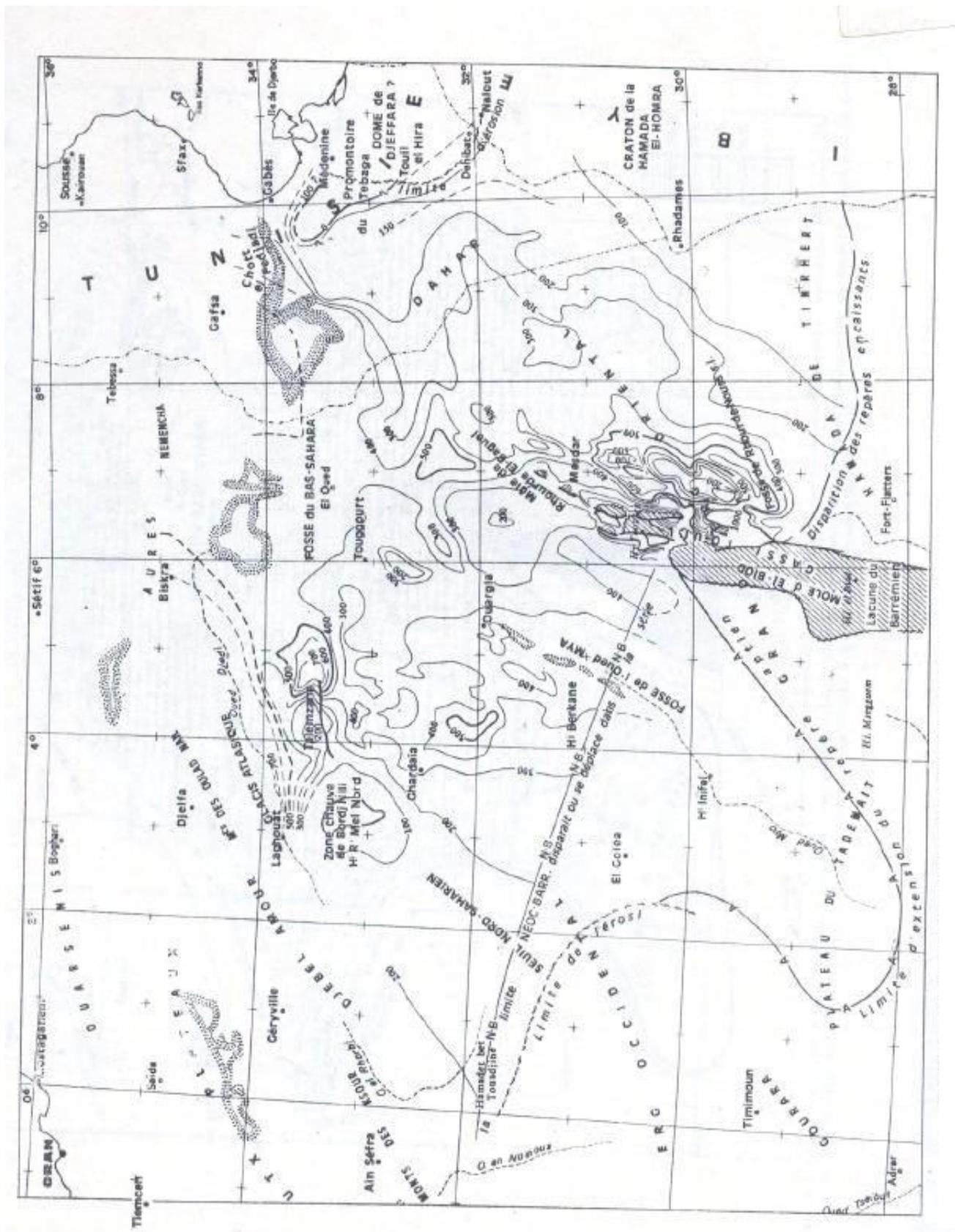
- Michalski, A. (1989). Application of temperature and electrical-conductivity logging in ground water monitoring.
- Miller J, .. (1982). Groundwater quality fluctuations: a pilot study. Ministry of the Environment of the Ontario, Toronto, Ontario.
- Nielsen, D. .. (1991). Practical handbook of ground-water monitoring. Lewis publishers, Chelsea, M.,.
- RA. Griffin, JJ. Jurinak, "Estimation of activity coefficients from the electrical conductivity of natural aquatic systems and soil extracts," Soil Science 116, 26-30, 1973.
- Rodier, J. (1978). L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer.
- SAS, R. A. (2004). *Conductivité Théorie et Pratique*. Villeurbanne Cedex, France.
- Siosemarde M, K. F. (2010). Determine of constant coefficients to relate total dissolved solids to electrical conductivity . J. Environ. Chem. Ecol. Geol. Geophys.
- Sonatrach. (1972). Rapport géologique, Service de géologie.
- TAARIT, F. (2003). Systeme Aquifere du Sahara Septentrional, HYDROGEOLOGIE, Volume II. Tunis.
- Thirumalini.S, J. (2009). Correlation between electrical conductivity and total dissolved solids in natural waters. Malaysian J. Sci. U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2254, 1992.
- Walton N R G (1989). Electrical Conductivity and total dissolved solids—What is their precise relationship? Desalination , p.275–292.
- YAO K.T. (2011). Caractérisation hydrochimique des aquifères fissurés de la région de San-Pedro (Sud-Ouest de la Côte d'Ivoire). International Journal of Biological and Chemical Science, Vol.5, n°2, p.642.



# **Annexe**



Carte des points d'eau du CI et du CT en Algérie (2001)



Carte en isopaque du Barrémien de la plateforme saharienne (Bassin algéro-tunisien). Equidistance 100 m.