Université KASDI Merbah de Ouargla
Faculté des sciences et sciences de l'ingénieur
Département d'hydraulique et Génie Civil

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de **MAGISTER**
Spécialité : **Hydraulique**
Filière : **Aménagement Hydraulique Dans Les Zones Arides**

Par :
MECHERI Bachir

Thème :

Influence de la nappe phréatique sur les ouvrages hydrauliques et Génie civil

Soutenu publiquement le : **15/03/2009**

Devant le Jury composé de :

BENTEBBA Mohamed Tahar	**M.C.A**	**Université de Ouargla**	**Président**
BEBBA Ahmed Abdelhafid	**M.C.A**	**Université de Ouargla**	**Examinateur**
SAKER Med Lakhder	**M.C.A**	**Université de Ouargla**	**Examinateur**
KRIKER Abdelouahed	**M.C.A**	**Université de Ouargla**	**Promoteur**
HASSINI Messaoud	**M.C.A**	**Université de Ouargla**	**Co-Promoteur**
ABIMOULOUD Youcef	**M.A.B**	**Université de Ouargla**	**Co-Promoteur**

Liste des figures

N°	Figure	page
01	Figure. (II-1) Situation générale	04
02	Figure (II- 2) carte de situation de la cuvette de Ouargla	05
03	Figure (II- 3) Relief géologique de la région de Ouargla	06
04	Figure (II- 4) Coupe hydrogéologique à travers le Sahara	07
05	Figure (II- 5) Rabattements 2000 – 2050 au CI (en m)	09
06	Figure (II-6) Rabattements 2002 – 2050 au CT (en m)	11
07	Figure (II-7) Carte piézométrique de la nappe phréatique en novembre 2003	13
08	Figure (II.8) : Représentation du cycle de l'eau	14
09	Figure (II-9) : Répartition mensuelle des pluies à Ouargla sur la période (1991-2006)	16
10	Figure (II-10) : Humidité relative moyenne mensuelle interannuelle (%)	18
11	Figure (II-11) : Vitesse moyenne mensuelle interannuelle du vent (m/s) Période (1991-2006)	18
12	Figure (II-12) : Durée d'insolation moyenne mensuelle interannuelle (heure) Période (1991-2006	19
13	Figure (II-13) : Diagramme OMBROTHERMIQUE de GAUSSEN	19
14	Figure (II-14) : Climagramme D'EMBERGER de la cuvette de Ouargla	23
15	Fig. (III-1) Coupe hydrogéologique passant par la ville de Ouargla (en 1968).	36
16	Fig. (III-2) Carte piézométrique de la nappe phréatique en avril-mai 1968	38
17	Fig. (III-3) Coupe hydrogéologique au travers de la palmeraie en 1968	39
18	Fig. (III-4) Profondeur de la nappe phréatique sous le sol (en mètres)	40
19	Fig. (III-5) Variation des niveaux piézométriques (en mètres) entre avril 2002 et février 1992	41
20	Fig. (III-6) Différence des niveaux piézométriques de la nappe entre avril 2002 et février 1992	42
21	Fig. (III-7) Diagramme des différences de niveaux piézométriques entre octobre 2002 et novembre 2003	42
22	Fig. (III-8) Variation des niveaux piézométriques (en mètres) entre avril 2002 et octobre 2001	43
23	Fig. (III-9) Différence des niveaux piézométriques de la nappe phréatique entre avril 2002 et octobre 2001	44
24	Fig. (III-10) Différence des niveaux piézométriques de la nappe phréatique entre avril 2002 et octobre 2001 aux environs de Ouargla	45
25	Fig. (III-11) Piézométrie au abord de la station de pompage Ouled Naceur - Hamdat	46

26	Figure (IV-1) : procédé de fabrication de ciment et du béton	50
27	Fig. (IV.2) – concentration en CO_2 dans la phase gazeuse en fonction de la fraction volumique	52
28	Fig. (IV.3) – fractions molaires des H_2CO_3, HCO_3^- et CO_3^{2-} en fonction du pH (à 20°Cet à l'équilibre).	54
29	Fig. (IV.4)- Mécanisme de carbonatation de $Ca(OH)_2$	57
30	Fig.(IV.5) –Représentation simplifiée de l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton armé	65
31	Figure (VI.6) -Représentation simplifiée du processus de corrosion par chlorures dans les armatures.	69
32	Figure (IV.7) – Représentations schématiques des transports des chlorures dissous dans le béton	71
33	Figure (IV.8) – Profils de teneur en chlorure pénétrant dans une plaque de béton, en régime	71
34	Figure (IV.9) – Surface de simulation de la teneur en chlorures à la profondeur x et au temps t	72
35	Fig. (IV.10) - pH à l'équilibre du système $CaCO_3$ - CO_2 - H_2O en fonction de la fraction volumique en CO_2	74
36	Fig.(IV.11)- Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers.	75
37	Fig.(IV.12) – diagramme de Pourbaix du système $Fe-H_2O$ à 25° C (le potentiel électrique est donné par rapport à l'électrode normale à hydrogène)	75
38	Fig. (V-1) : Le pH des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	80
39	Fig. (V-2) .Répartition du pH au niveau de la cuvette de Ouargla	81
40	Fig. (V-3) : La concentration en Ca+2 dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	82
41	Fig. (V-4). Répartition des Concentrations de Ca2+ sur la cuvette de Ouargla	83
42	Fig. (V-5) : La concentration en Mg+2 dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	84
43	Fig. (V-6). Répartition des Concentrations de Mg+ sur la cuvette de Ouargla	85
44	Fig. (V-7) : La concentration en Na+ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	86
45	Fig. (V-8). Répartition des Concentrations de Na+ dans la cuvette de Ouargla	87
46	Fig. (V-9) : La concentration en K+ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	88
47	Fig. (V-10). Répartition des Concentrations de K+ sur la cuvette de Ouargla	89
48	Fig. (V-11) : La concentration en SO42- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	90
49	Fig. (V-12). Répartition des Concentrations de SO42- sur la cuvette de Ouargla	91

50	Fig. (V-13) : La concentration en Cl- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	93
51	Fig. (V-14). Répartition des Concentrations de Cl- sur la cuvette de Ouargla	94
52	Fig. (V-15) : La concentration en HCO3- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	96
53	Fig. (V-16). Répartition des Concentrations du HCO3- à la cuvette de Ouargla	97
54	Fig. (V-17) : La concentration en Zn2+ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	99
55	Fig. (V-18). Répartition des Concentrations de Zn2+ sur la cuvette de Ouargla	100
56	Fig. (V-19) : La concentration en Fe2+ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla	101
57	Fig. (V-20). Répartition des Concentrations de Fe2+ sur la cuvette de Ouargla	102

Liste des tableaux

N°	Tableau	page
01	Tableau (I-1): longueurs et montants réservés depuis 2002 jusqu'à 2008 pour la rénovation des réseaux d'assainissement et réseaux d'AEP à Ouargla	02
02	Tableau (I-2): présentation de quelque tronçons rénovés à la cuvette de Ouargla	02
03	Tableau (II-01): Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe du CI	10
04	Tableau (II-02) : Températures moyennes mensuelles, interannuelles Période (1991-2006)	16
05	Tableau (II-03) : Températures moyennes maximal et minimal mensuelles, interannuelles absolues période (1991-2006)	17
06	Tableau (II.04): classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE	20
07	Tableau (II-05) : Evaporation moyennes mensuelles, interannuelles période (1991-2006)	22
08	Tableau (II-06) : calcul de l'évaporation de plan d'eau par la méthode BOUTAOUTAOU (année 2006)	25
09	Tableau (II-07) : Calcul de l' ETP d'après THORNTHWAITE (année 2006)	27
10	Tableau (II-08): répartition de débit des forage par commune	29
11	Tableau (II-09): volume de précipitation l'année 2006	29
12	Tableau (II-10) : résultat de calcul de bilan hydrique de la cuvette de Ouargla l'année 2006	32
13	Tableau (IV-1)- le concentration des éléments agressif dans la cuvette de Ouargla	47
14	Tableau (IV.2) – caractéristiques du dioxyde de carbone en phase gazeuse et en phase liquide	55
15	Tableau (IV.3) – Taille moyenne des amas de cristaux de portlandite en fonction de l'age (conservation endogène) et du rapport E/C de pâtes de ciment.	56
16	Tableau (IV-4) : solubilité de différents sulfates dans l'eau, à 20°C	62
17	Tableau (V-1) : Nomenclature des échantillons dans le reste de l'étude	79
18	Tableau (V-2) Concentration du SO_4^{-2} dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla.	92
19	Tableau (V-3) Concentration en Cl^- dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla	95
20	Tableau (V-4) Concentration en HCO_3^- dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla.	98

Liste des photos

N°	Figure	page
01	Photo n°1: niveau de la nappe lors de la pose d'un réseau d'assainissement.	105
02	Photo n°2: affleurement de la nappe phréatique.	105
03	Photo n° 3 : niveau de la nappe sous la fondation d'une construction.	105
04	Photo n°4: gonflement et carbonatation du ciment et dépôt de couches de sel sur les parois du mur.	105
05	Photo n° 5 : corrosion d'une armature au niveau de la fondation d'une construction.	105
06	Photo n°6: dégradation d'un tronçon routier par effet de la remontée de la nappe.	105

Chapitre I: Introduction Générale: (Problématique)

Les régions du SUD-EST Algérien soufrent depuis plusieurs années des problèmes environnementaux et écologiques causés par la remontée des eaux de la nappe phréatique. L'impact néfaste de ce phénomène se manifeste par :

- la dégradation de la palmeraie.
- La dégradation des réseaux routiers.
- La dégradation des structures voir leurs fondations.

A ce propos, notre étude s'est axée sur l'impact de la remontée de la nappe sur la dégradation des ouvrages hydrauliques et de génie civil influencés par cette remontée.

La cuvette de Ouargla soufre de l'effet de la remontée des eaux de la nappe phréatique dû aux excès d'eau pompée d'une façon abusive des nappes profondes (sénonnien, méopliocène, albien) dans la première nappe, ce qui s'est traduit par une remontée importante d'eau durant cette dernière décennie, Ainsi, beaucoup de problèmes ont surgie entre autres l'affleurement de la nappe, l'affaissement du sol sous certaines construction et routes, l'instabilité de l'assise de certains ouvrages qui conduit à leur fissuration et par la suite l'affectation de leur durabilité. En addition, le grand problème subsiste en l'effet chimique de cette nappe sur les ouvrages hydrauliques et génies civils qui se traduit par la dégradation du béton soit leur destruction.

Parmi les conséquences de ce phénomène de la remontée, les réseaux hydrauliques de la zone de la cuvette de Ouargla ont connu un nombre important de réhabilitation et rénovation en d'hors des délais habituelles de leur durée de vie. Le tableau (I-1) montre la longueur du réseau rénové ainsi que les montant qui ont été réservés depuis 2002 jus qu'à 2008.

Tableau (I-1): longueurs et montants réservés depuis 2002 jusqu'à 2008 pour la rénovation des réseaux d'assainissement et réseaux d'AEP à Ouargla [1]

Commune	Réseaux d'assainissement		Réseaux d'AEP	
	Longueur (m)	Montant (DA)	Longueur (m)	Montant (DA)
Ouargla ville	21124	214.156.672,00	38846	109.576.866,00
Rouissat	3183	44.179.340,00	10760	19.802.674,00
Ain Beida	9112	18.791.110,00	4560	26.500.000,00
Sidi Khouiled	5212	8.382.444,00	7500	48.000.000,00
N'goussa	750	6.260.370,00	00	00
Total	39381	291.769.936,92	61666	203.879.540,00

Certains tronçons principaux du réseau hydraulique au niveau de la cuvette de Ouargla ont connu encore plusieurs interventions même avant l'expiration de leurs durées de vie théorique (30 ans), le tableau ci-après résume les différentes interventions et leurs répétitions.

Tableaux (I-2): présentation de quelque tronçons rénovés à la cuvette de Ouargla [1]

Désignation	Année de réalisation ou rénovation	Type de conduite	Diamètre en (mm)	Longueur en (m)
Tronçon à côte de l'hôpital « Mohamed Boudiaf »	1983	CAO	Ø700	250
	1999	CAO		
	2005	CAP		
	2008	PRV		
aux alentour du Ksar	1973	AC	Ø400	500
	1983	CAO		
	1996	CAO		
	2006	PVC		
Route nationale N°49 (avenue Palestine)	1986	CAO	Ø1100	500
	1995	CAP		
	2007	PRV		
La Route Cheguivara	1987	CAO	Ø400	600
	1999	CAO		
	2003	PVC		

Malgré ces interventions et pour palier d'une façon radicale à ces problèmes, une autre étude plus vase a été confiée en 2002 au bureau d'étude technique suisse BG sous le thème « Etude d'assainissement des eaux résiduaires, pluviales et d'irrigation, mesures complémentaires de lute contre la remontée de la nappe phréatique ». Ayant pour montant globale de 290.000.000,00 DA. [1] [2]

La réalisation de ce projet a été confiée à six entreprises pour un montant global de 18.965.019.04 KDA en vu de mettre en place un nouveau réseau de 138 km dont 98 km à l'intérieur de la ville et 40 km représente l'évacuation principale qui mène à la Sebkha de Sefion, cette dernière partie est confiée à l'entreprise Germanie DEWIDAG. [2]
A titre d'information, la partie intérieure de la ville est confiée à deux entreprises à savoir l'entreprise libanaise BUTEC pour un linéaire global de 38 km et GIEVSB française pour 60 km. Pour ce qui est des stations d'épuration et de pompage, ces dernières ont été confiées à deux entreprises à savoir DEWIDAG et SNTP-EUSEBIOS.
Le réseau de drainage a été confié à deux entreprises algériennes à savoir ONID et FREMHYD. [2]

L'étude de cette problématique se mènera de la manière suivante:
Après l'introduction qui fera l'objet du premier chapitre, nous entreprendrons des généralités sur la zone d'études comme deuxième chapitre, et puis nous présentons un aperçu sur les Etudes antérieures établies sur le phénomène de remontée comme troisième chapitre. La corrosion des matériaux à l'effet de la remontée de la nappe constituera le quatrième chapitre et la caractérisation de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla formera le cinquième. Le sixième chapitre regroupa les résultats et les interprétations des analyses physico-chimiques des eaux de la nappe phréatique. Et nous terminerons cette étude par des conclusions et quelques recommandations.

II. 1 SITUATION GEOGRAPHIQUE:

La Ville de Ouargla est située dans une dépression appelée « cuvette de Ouargla ». La superficie étudiée est de140,000 hectares. Elle inclut les agglomérations de Ouargla, N'Goussa, Rouissat, Ain El Beida et Sidi Khoulied. Elle s'étend entre les coordonnées (UTM, Clarke 1880)

X = 710'000 ; Y = 3'530'000 et

X = 730'000 ; Y = 3'600'000 (cf. figure (II-1)) [03]

Figure. (II-1) Situation générale [03]

Elle est limitée par :

- Au Nord : la Sebkhet Safioune ;
- A l'Est : les ergs Touil et Arifdji ;
- Au Sud : les dunes de Sedrata ;
- A l'Ouest : le versant est de la dorsale du M'Zab.

La distance du Sud au Nord est de 70 km, celle de l'Est à l'Ouest de 20 km. Comme le montre la figure (II-2).

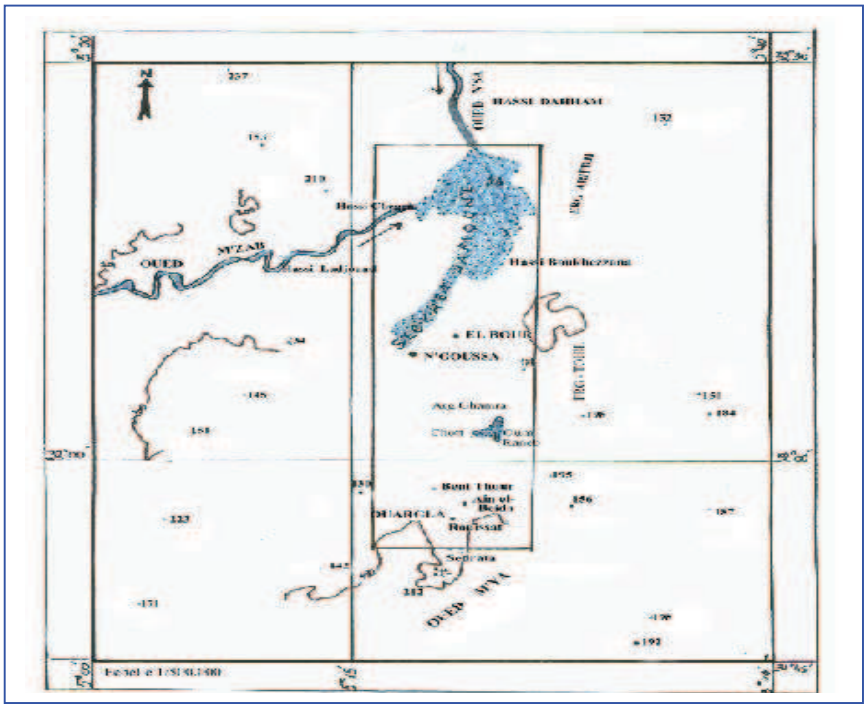

Figure (II- 2) **carte de situation de la cuvette de Ouargla** [04]

II-2: GEOMORPHOLOGIE

La géomorphologie de la région est constituée des éléments suivants :

La hamada (plateau où affleurent de grandes dalles rocheuses) Mio-Pliocène et Plio-Quaternaire : formation continentale détritique qui forme des plateaux dont l'altitude est de 200 m en moyenne (cf. figure (II- 3)) ;

Les formations sableuses : composées de dunes et de cordons d'erg ;

Les étendues alluviales correspondant au lit de l'oued Mya selon un axe SW-NE

Les sebkhas : marécages salés, le plus souvent asséchés, occupant le fond d'une dépression, la plus grande est la Sebkhet Safioune à l'extrémité Nord, c'est aussi le point le plus bas de la région. [05]

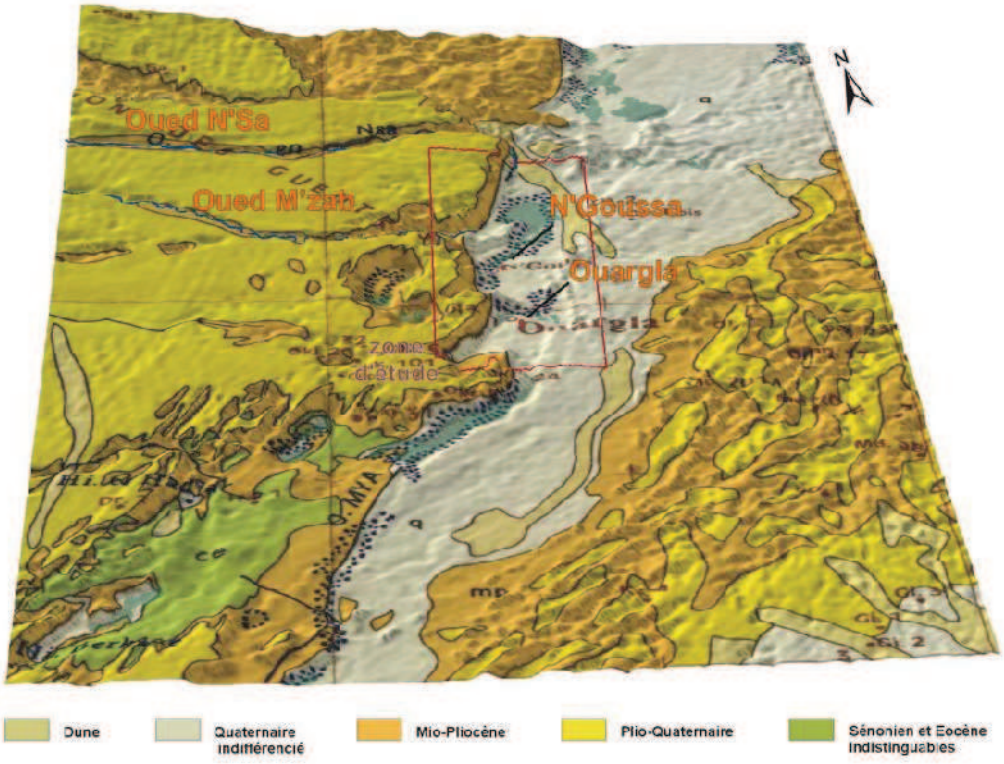

Figure (II- 3) Relief géologique de la région de Ouargla [05]

II.3: HYDROGEOLOGIE

La cuvette de Ouargla appartient au Bas-Sahara algérien. Il s'agit d'un immense bassin sédimentaire, en forme de synclinal dissymétrique, particulièrement bien doté en couches perméables favorables à la circulation souterraine des eaux. Certaines, recouvertes de terrains imperméables, assurent l'existence de nappes captives alors que d'autres, situées au sommet des dépôts et sans couverture étanche, permettent la formation de nappes phréatiques [05] (cf. figure (II- 4)).

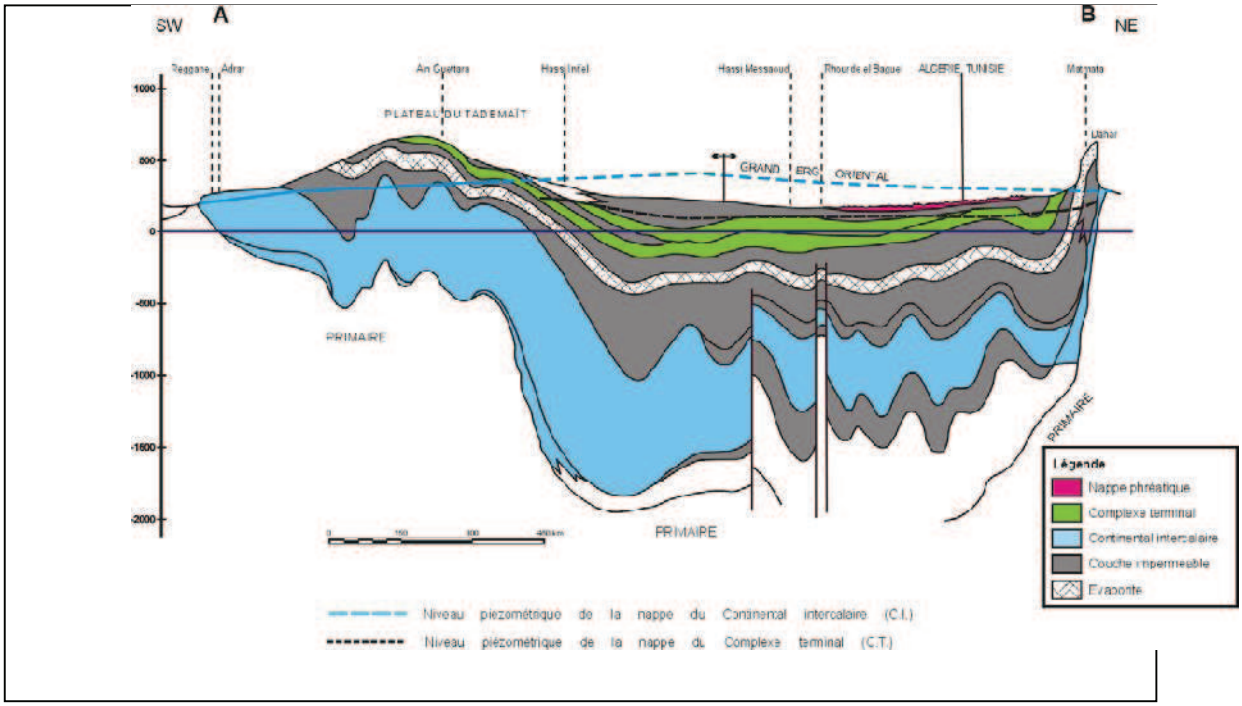

Figure (II- 4) Coupe hydrogéologique à travers le Sahara (d'après UNESCO 1972) [03]

Bénéficiant de cette structure, les eaux souterraines constituent plusieurs ensembles superposés : la puissante nappe artésienne du Continental intercalaire gréseux, la nappe artésienne des calcaires marins du Sénonien et de l'Eocène, les nappes artésiennes du Continental terminal sableux (Mio-Pliocène) regroupées avec la précédente sous le nom de Complexe Terminal, enfin des nappes phréatiques largement étalées dans les formations continentales superficielles.

II.3.1. NAPPE DU CONTINENTAL INTERCALAIRE (C.I.)

Le réservoir du C.I. est contenu dans les formations continentales du crétacé inférieur (Baremien et Albien), Composé essentiellement de grès, sables et argiles. Le réservoir s'étend sur environ 600 000 km², il est continu du Nord au Sud depuis l'Atlas Saharien jusqu'au Tassili et le Hoggar, d'Ouest en Est depuis la vallée de la Saoura jusqu'au désert libyen. Au Nord-Est de la dorsale du M'zab, le toit de l'aquifère, constitué d'argiles et d'évaporites du Cénomanien, est continu sur tout le bassin [06].La profondeur augmente du Sud au Nord, de 1000 m au bas Sahara, à 2000 m sous les chotts, provoquant ainsi une forte charge de la nappe

sur tout le bassin oriental. Le substratum est constitué de formations argilo-sableuses et argileuses ou carbonatées d'âge de plus en plus récent du Sud vers le Nord [07]

La recharge actuelle de la nappe du Continental Intercalaire estimée à 8,5 m^3/s sur le territoire Algérien [08] s'effectue par infiltration des précipitations sur les bordures du bassin, tout au long des oueds qui descendent des massifs montagneux, notamment de l'Atlas saharien au Nord-Ouest et du Dahar à l'Est. Des ruissellements en bordure de plateaux peuvent également participer à l'alimentation de la nappe sur le bord du Tademaït et sur le bord du Tinrhert, de même que, d'après le SASS [05], l'infiltration des pluies sur le Grand Erg Occidental.

Les prélèvements s'élevaient en 1998 à 25m^3/s. Ils s'effectuent principalement aux dépens des réserves. La nappe déstocke à raison de 16,5 m^3/s, ce qui provoque une baisse des niveaux piézométriques, de l'artésianisme et une réduction du débit des foggaras aux exutoires. [03]

La simulation Zéro du SASS, basée sur la poursuite des prélèvements actuels, sans aucune augmentation, indique que les rabattements augmenteront d'une cinquantaine de mètres en 2050 à Ouargla par rapport à l'état en 2000 (cf. figure (II- 5)). Ces rabattements supplémentaires produiront une diminution des débits artésiens de l'ordre de 25% sur les forages existants.[05]

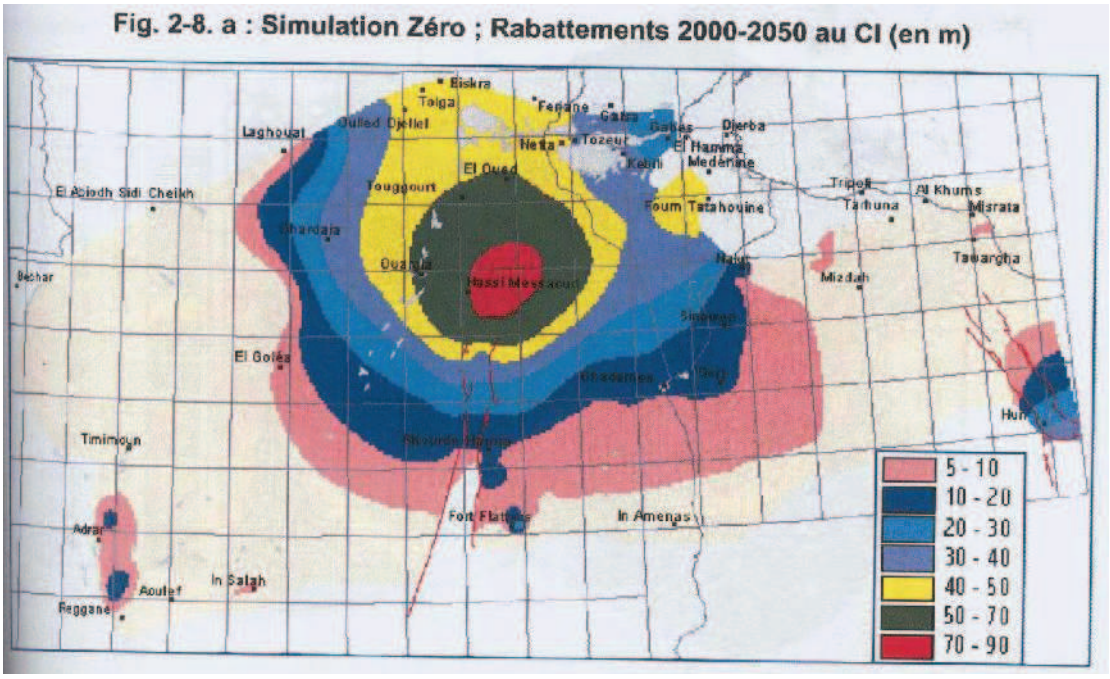

Figure (II- 5) Rabattements 2000 – 2050 au CI (en m)

D'après simulation SASS 2003 (poursuite de l'existant, sans augmentation) [03]

L'hypothèse faible d'augmentation des prélèvements (36,4 m3/s, dont 16,6 m3/s dans le Gourara – Touat) provoquerait des rabattements très important, faisant disparaître l'artésianisme de tout le Bas Sahara et les profondeurs de pompage y seraient de l'ordre de 100 mètres en 2050.[05]

II.3.1.1 Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la nappe C.I.

Depuis la mise en exploitation à l'échelle de la région de Ouargla, les forages captant le C.I ont fait l'objet de plusieurs prélèvements et d'analyses chimiques afin de suivre l'évolution de la qualité chimique des eaux. Nous présentons dans le tableau suivant les résultats d'analyse effectuée par l'ANRH (nov 1998) sur six forages de CI :

Tableau (II-1): Caractéristiques physico-chimiques

des eaux de la nappe du CI [09]

Paramètres	Valeurs moyennes
PH	7,34 – 7,64
Température	47,4 –54,5 °C
Conductivité	2000 – 2900 ms/cm
Faciès chimiques	Sulfate. Chlorure Alcalin $SO4^{2-} > Cl^{-} > HCO_3^{-}$ et $Na^{+} > Ca^{2+} > Mg^{2+}$
La minéralisation totale	1,8 - 2,5 g/l

II.3.2 Les nappes du Complexe Terminal C.T:

Les formations du Complexe Terminal sont très hétérogènes. Elles englobent les assises perméables du Sénonien calcaire et du Mio-Pliocène. En fait, il est possible d'y distinguer trois corps aquifères principaux, séparés localement par des horizons semi-perméables ou imperméables. Ces trois corps sont représentés par les calcaires et dolomies du Sénonien et de l'Eocène Inférieur, par les sables, grès et graviers du Pontien, et par les sables du Mio-Pliocène. La profondeur du Complexe Terminal est comprise entre 100 et 600 mètres et sa puissance moyenne est de l'ordre de 300 m. [05]

Selon une étude récente [10], les prélèvements dans le Complexe Terminal étaient de 16,3 m^3/s pour le territoire algérien en 1998. Le niveau piézométrique est en baisse générale. Cette baisse deviendra catastrophique dans une trentaine d'années dans les zones les plus exploitées où elle pourrait dépasser 200 mètres d'après une simulation de la même étude.

Les simulations effectuées sur le modèle du SASS [05] [08] sont tout aussi alarmistes : « Le secteur le plus exposé est celui des chotts Algéro-tunisiens au C.T. C'est sans aucun doute la région où la nappe est la plus vulnérable. C'est là où se trouvent les plus fortes densités de population, et c'est là où la pression sur la ressource sera la plus forte….La simple poursuite des taux de prélèvements actuels entraînerait, à l'horizon 2050, des rabattements supplémentaires de l'ordre de 30 à 50 mètres sur l'oued Rhir le Souf… [03]

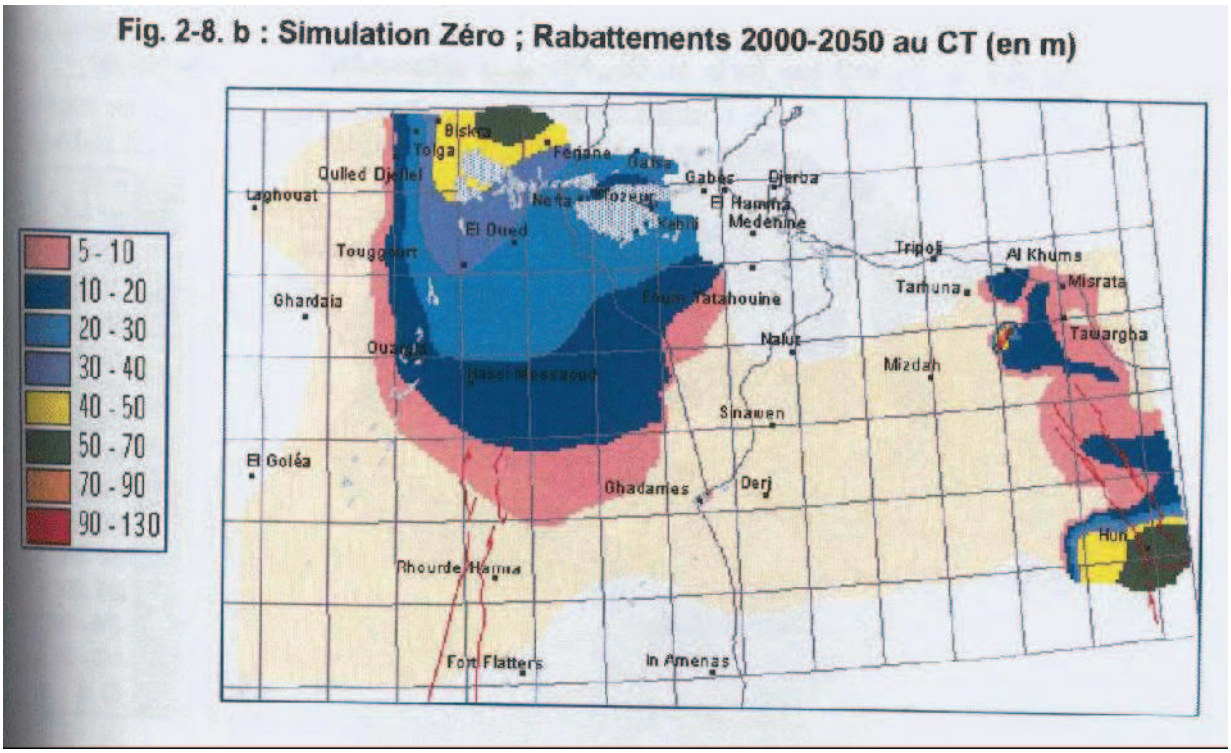

Figure (II-6) Rabattements 2002 – 2050 au CT (en m)

D'après simulation SASS 2003 (poursuite de l'existant) [03]

II.3.3 La nappe phréatique :

La nappe phréatique a été étudiée lors des quatre campagnes de mesures, en octobre 2001, avril 2002, octobre 2002 et novembre 2003.

En octobre 2002, la surface libre de la nappe se situait à la cote 135,08 m en ville de Ouargla,La cote était de 127,95 m au entre le Chott et la sebkha de Ouargla, Les points les plus bas sont situés dans la Sebkhet Safioune, tout au nord, avec des cotes comprises entre 102,19 m et 102,95 m, inférieures de 32 m à celles des points les plus hauts et 25 m plus bas qu'au Chott. La nappe s'écoule librement des points hauts vers les points bas, perpendiculairement aux isopièzes et n'à aucune possibilité de remonter de la Sebkhet Safioune vers le Chott de Ouargla ou la sebkha d'Oum Raneb. [05] (cf. figure (II- 6))

Les parties hautes de la nappe phréatique sont situées au sud et sous la ville de Ouargla. Les parties basses de la nappe phréatique. Elles sont situées au nord dans la Sebkhet Safioune pour les plus basses.
Les cotes principales sont : 134 m au sud ; 135 m en ville de Ouargla ; 128 m au Chott et à la sebkha ; 127 m à la sebkha d'Oum Raneb ; 117 m à N'Goussa et 102 m à la Sebkhet Safioune.

La nappe phréatique est épaisse de 1 à 8 m. Elle repose sur un épais niveau imperméable, étanche, qui occupe tout le fond de la vallée de Ouargla et l'isole des nappes artésiennes sous-jacentes.

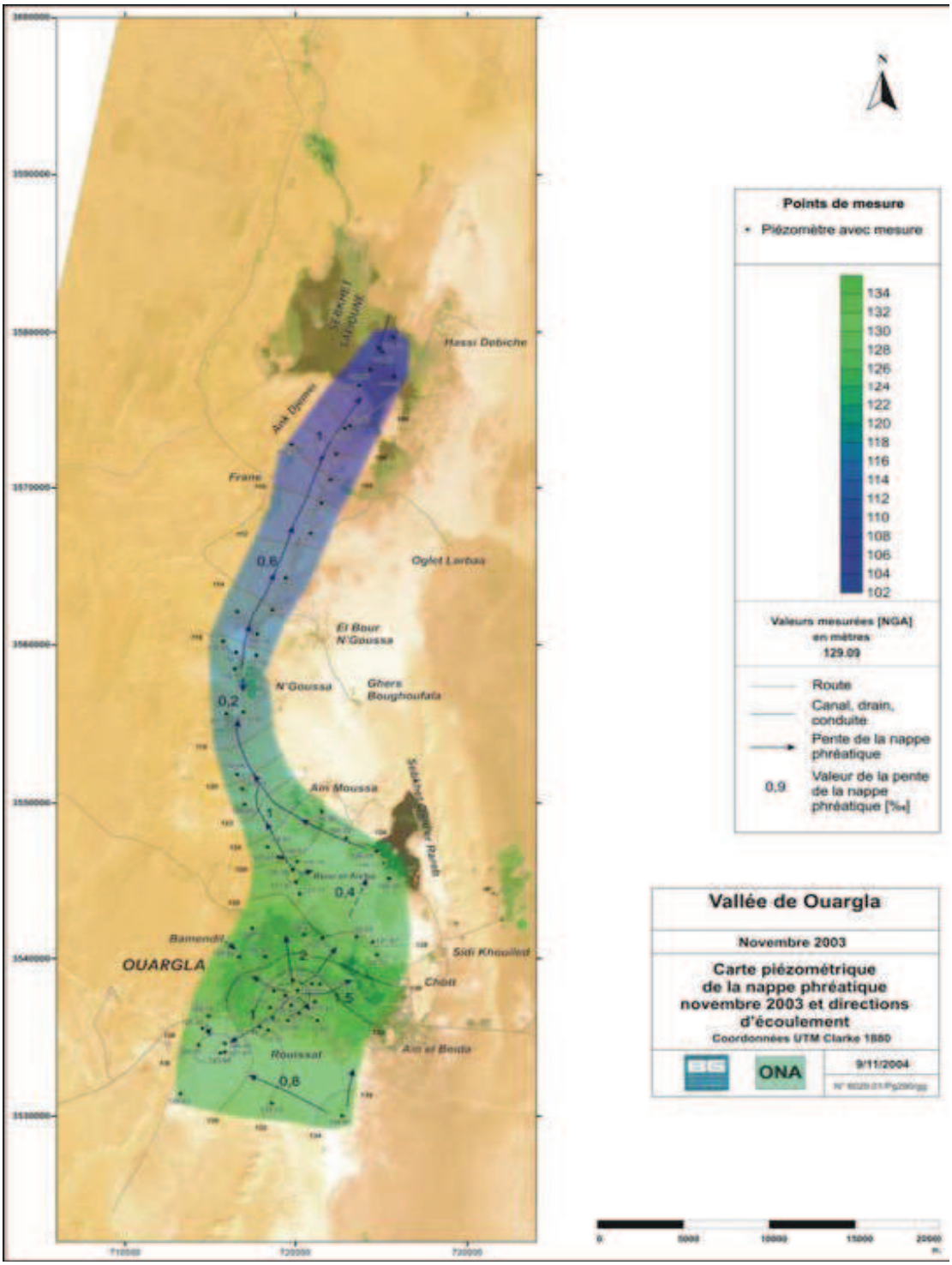

Figure (II-7) Carte piézométrique de la nappe phréatique en novembre 2003 [05]

II.4. DONNEES HYDRIQUES ET CLIMATIQUES DE LA ZONE D'ETUDE

II.4.1. Introduction :

L'eau est la source principale et originelle de toute vie. Elle se présente, dans la nature, sous trois états :

- Solide : neige et glace.
- Liquide: eau chimiquement pure ou chargée en solutés.
- Gazeux : à différents degrés de pression et de saturation.

Le changement de phase de l'eau dépend essentiellement de la température et de la pression mais aussi du degré de pollution de l'atmosphère

II.4.2. Définition du cycle hydrologique :

Le cycle hydrologique est un concept qui englobe les phénomènes du mouvement et du renouvellement des eaux sur la terre (Figure (II.8)). Cette définition implique que les mécanismes régissant le cycle hydrologique ne surviennent pas seulement les uns à la suite des autres, mais sont aussi concomitants. Le cycle hydrologique n'a donc ni commencement, ni fin.

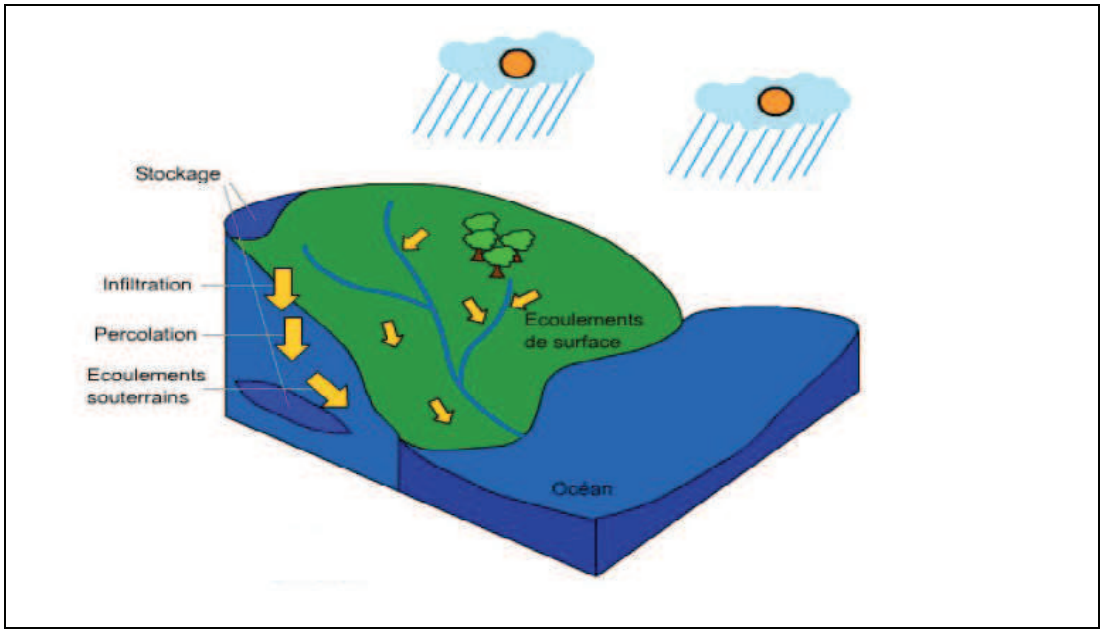

Figure (II.8) : Représentation du cycle de l'eau [11]

Sous l'effet du rayonnement solaire, l'eau évaporée à partir du sol, des océans et des autres surfaces d'eau, entre dans l'atmosphère. L'élévation d'une masse d'air humide permet le refroidissement général nécessaire pour l'amener à saturation et provoquer la condensation de la vapeur d'eau sous forme de gouttelettes constituant les nuages, en présence de noyaux de condensation. Puis la vapeur d'eau, transportée et temporairement emmagasinée dans les nuages, est restituée par le biais des précipitations aux océans et aux continents. Une partie de la pluie qui tombe peut être interceptée par les végétaux puis être partiellement restituée sous forme de vapeur à l'atmosphère. La pluie non interceptée atteint le sol. Suivant les conditions données, elle peut alors s'évaporer directement du sol, s'écouler en surface jusqu'aux cours d'eau (ruissellement de surface) ou encore s'infiltrer dans le sol. Il peut aussi y avoir emmagasinement temporaire de l'eau infiltrée sous forme d'humidité dans le sol, que peuvent utiliser les plantes. Il peut y avoir percolation vers les zones plus profondes pour contribuer au renouvellement des réserves de la nappe souterraine.
Un écoulement à partir de cette dernière peut rejoindre la surface au niveau des sources ou des cours d'eau. L'évaporation à partir du sol, des cours d'eau, et la transpiration des plantes complètent ainsi le cycle.

Le cycle de l'eau est donc sujet à des processus complexes et variés parmi lesquels nous citerons les précipitations, l'évaporation, la transpiration (des végétaux), l'interception, le ruissellement, l'infiltration, la percolation, l'emmagasinement et les écoulements souterrains qui constituent les principaux chapitres de l'hydrologie. Ces divers mécanismes sont rendus possibles par un élément moteur, le soleil, organe vital du cycle hydrologique. [11]

II.4. 3 Données climatiques de la zone d'étude

a- Les précipitations

Sont dénommées précipitations toutes les eaux météoriques qui tombent sur la surface de la terre, tant sous forme liquide (bruine, pluie, averse) que sous forme solide (neige, grésil, grêle) et les précipitations déposées ou occultes (rosée, gelée blanche, givre,...). Elles sont provoquées par un changement de température ou de pression. La vapeur d'eau de l'atmosphère se transforme en liquide lorsqu'elle atteint le point de rosée par refroidissement ou augmentation de pression. Pour produire la condensation,

Pour la région de Ouargla d'après la figure **(II-9)**, on remarque que le mois le plus pluvieux est novembre, juillet étant le mois le plus sec.

Les précipitations moyennes annuelles sont de l'ordre de 18 mm, novembre est le mois le plus pluvieux (4,34 mm) et juillet le plus sec (0.09 mm en moyenne – cf. figure **(II-9))**.

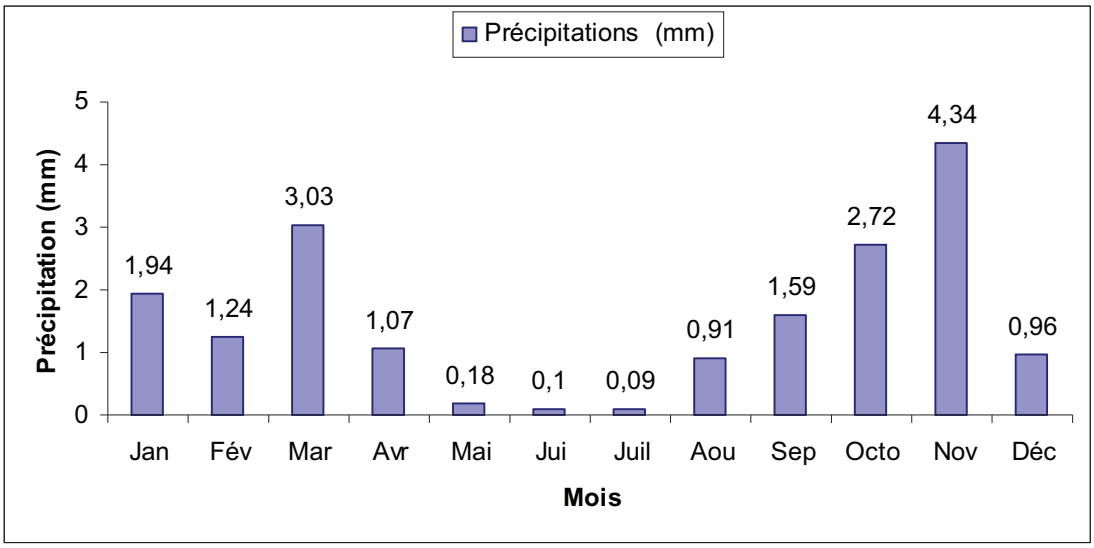

Figure (II-9) : Répartition mensuelle des pluies à Ouargla sur la période (1991-2006) [12]

b- Températures :

Selon le tableau (II-02) le maximum des moyennes mensuelles est atteint au mois de Juillet 34,68 °C et le minimum au mois de Janvier 11,35 °C.

Tableau (II-02) : Températures moyennes mensuelles, interannuelles

Période (1991-2006). [12]

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Octo	Nov	Déc
Température (°C)	**11.35**	13.36	17.65	21.85	27.24	32.33	**34.68**	34.01	30.29	24.27	16.95	12.33

La température moyenne maximale absolue atteint en mois de Juillet avec 43.14°C, et le minimum absolu au mois de Janvier 4.73 °C. (Tableau (II-03))

Tableau (II-03) : Températures moyennes maximal et minimal mensuelles, interannuelles Absolues Période (1991-2006). [12]

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Octo	Nov	Déc
Max absolue	18.34	20.66	24.94	29.19	34.64	39.02	**43.14**	42.64	37.27	31.39	23.27	17.79
Min absolue	**4.73**	6.38	10.21	13.55	18.56	23.31	27.38	27.03	23.23	17.29	10.30	5.69

c- Humidité relative de l'air :

L'humidité relative est le rapport entre la quantité d'eau contenue dans une masse d'air et la quantité maximale d'eau que peut contenir cette masse d'air. Ainsi, lorsqu'une masse d'air se refroidit, elle garde la même quantité d'eau. Par contre, la valeur de sa quantité maximale diminue avec la température. Cette diminution implique qu'à un certain moment, l'air devient saturé car Hr = 100%.

$$H_r = \frac{e_a}{e_s}.100 \quad [\%] \quad \text{..... (II-1)}$$

Avec :

e_a : pression de vapeur d'eau effective ou actuelle,

e_s : pression de vapeur d'eau à saturation.

Les valeurs de l'humidité relative de la station de Ouargla sont relativement homogènes. Les moyennes mensuelles varient entre 26 % et 65 %, sachant que la moyenne annuelle est de l'ordre de 44%.

Juillet est le mois le plus sec, alors que décembre est le mois le plus humide, selon la figure (II-10)

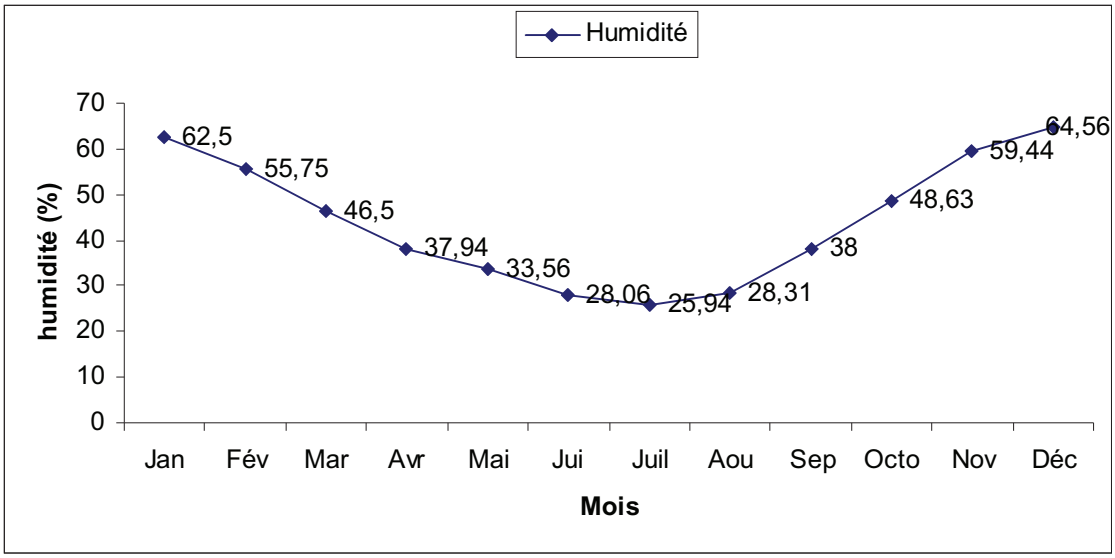

Figure (II-10) : Humidité relative moyenne mensuelle interannuelle (%) [12]

d- Le vent :

D'après la figure 3, le vent maximum est enregistré au mois de juin avec une vitesse de 4.64 m/s et le minimum en janvier de est 2.74 m/s .Ces vents soufflent suivant des différentes directions.

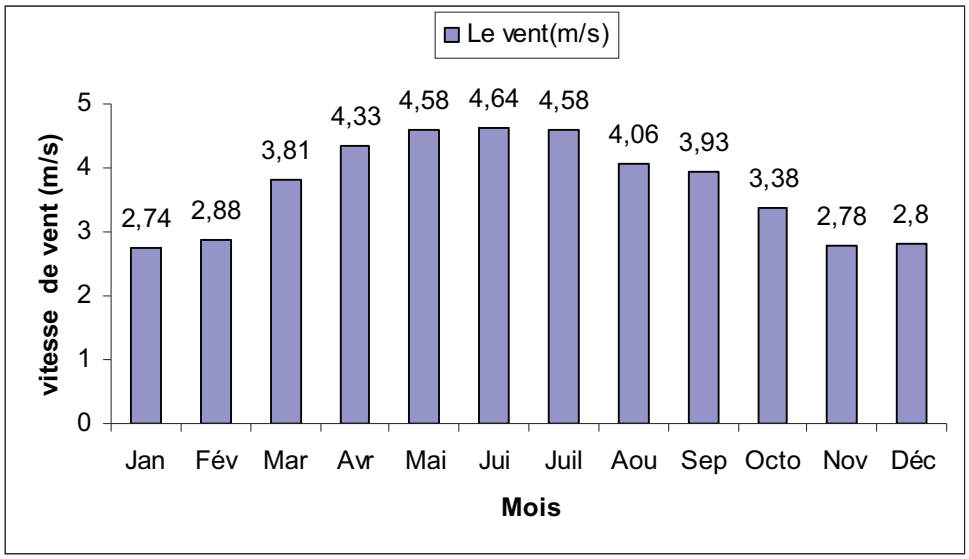

Figure (II-11) : Vitesse moyenne mensuelle interannuelle du vent (m/s)

Période (1991-2006). [12]

e- Durée d'insolation :

On emploie couramment la locution " durée d'insolation " pour désigner la somme des intervalles de temps durant lesquels un objet fixe est soumis à insolation au cours d'une période donnée que l'on choisit

La cuvette de Ouargla reçoit une quantité de la lumière solaire relativement très forte, le maximum est atteint au mois de Juillet avec une durée de 342 heures d'insolation et le minimum au mois de décembre avec une durée de 203 heures. Figure (II-12)

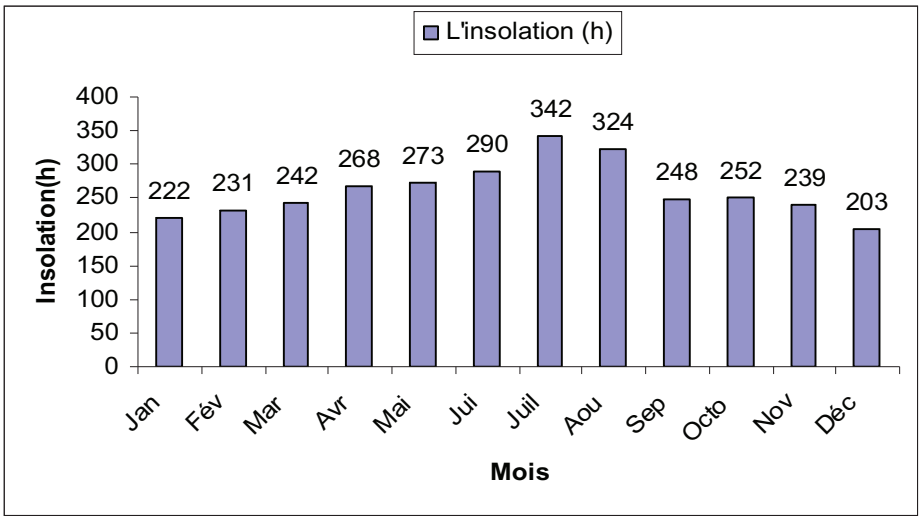

Figure (II-12) : Durée d'insolation moyenne mensuelle interannuelle (heure)

Période (1991-2006) [12]

II.4.4. Caractérisation climatique de la zone d'étude :

A- Diagramme OMBROTHERMIQUE de GAUSSEN

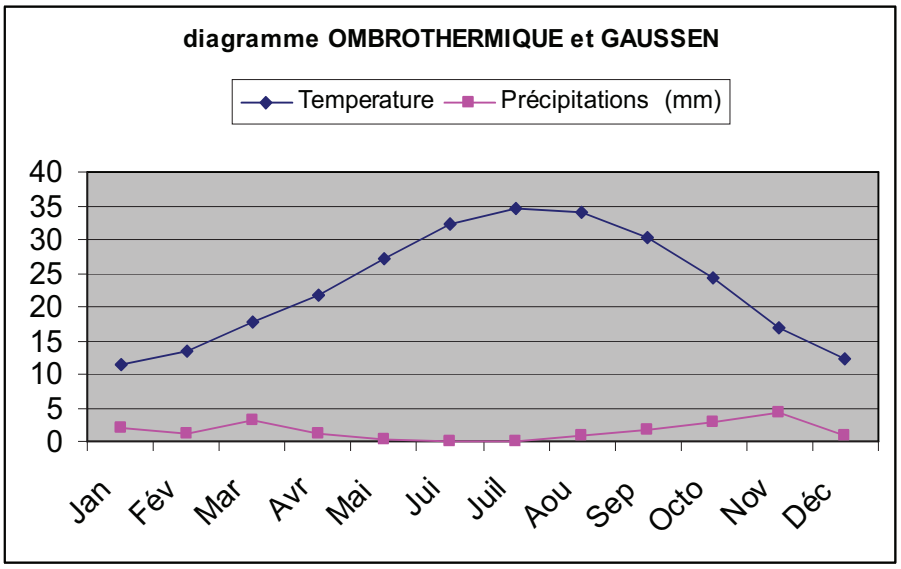

Figure (II-13) : Diagramme OMBROTHERMIQUE de GAUSSEN [15]

Commentaire : un mois dit sec si le quotient des précipitations mensuelles P exprimées en (mm) par la température moyenne T exprime en (°C) est inférieur à 2.
Ce diagramme montre que pour un climat saharien il n'y a pas de période humide, et que toute l'année est sèche.

B- indice d'aridité de DEMARTONNE :

D'après DEMARTONNE [4] l'indice de l'aridité est exprimé comme suit :

$$I = P / (T + 10) \qquad \text{..... (II-2)}$$

Avec :
P : les précipitations moyennes annuelles.
T : la température moyenne annuelle.
Pour les valeurs de I comprises entre 0 et 5 le milieu est considéré comme hyperaride.
A titre d'exemple nous prennous les données de l'année 2006

$$I = \frac{0.87}{23.78 + 10} = 0.026$$

Commentaire : l'indice d'aridité nous indique que la région d'étude durant l'année 2006, est caractérisé par un climat hyperaride.

Tableau (II.4): classification des climats en fonction de la valeur de l'indice de DEMARTONNE.

valeur de l'indice	Type de climat
0<I<5	Hyperaride
5<I<10	Aride
10<I<20	Semi-aride
20<I<30	Semi-humide
30<I<55	Humide

C- Climagramme D'EMBERGER:

Il est destiné à caractériser le climat méditerranéen et ses nuances, le paramètre pluviométrique est donné par la relation suivante :

$$Q_E = \frac{n.P}{3.65(M^2 - m^2)} \qquad \text{……(II-3)}$$

Avec :

n : nombre moyen de jours de précipitations par (an)

P : hauteur de précipitations (mm)

m : moyenne des températures minimales du mois le plus froid (°C).

M : moyenne des températures maximales du mois le plus chaud (°C).

Si l'on ne connaît pas le nombre de jours de précipitations, **Emberger** a proposé une forme simplifiée :

$$Q_E = \frac{2.P}{(M^2 - m^2)} \qquad \text{…… (II-4)}$$

L'interprétation de quotient pluviométrique nécessite l'emploi d'un abaque qui permet de placer une station dans l'une des cinq classes de climat méditerranéen qui ont été définies. (Figure i-8) ensuite nous nous plaçons à l'abaque d' EMBERGER :

- En abscisse la température moyenne des minimums de la saison froide est de 6,03°c.
- En ordonnée la valeur de Q_E est 2,26

Le point obtenu sur le Climagramme, nous illustre que la région d'étude est caractérise par un Hiver Doux, ce qui va dans le même sens que la conclusion de DEMARTONNE.

II.4.5. L'EVAPORATION, L'EVAPOTRANSPIRATION:

II.4.5.1. Définition :

L'évaporation elle est définit comme étant le passage de la phase liquide à la phase vapeur, il s'agit de l'évaporation physique les plans d'eau et la couverture végétale sont les principales sources de la vapeur d'eau.

a- Evapotranspiration maximale "ETM":

C'est la valeur maximale de l'évapotranspiration d'une culture donnée, à un stade végétatif donné et dans des conditions climatiques données c'est-à-dire la couverture végétale n'est pas nécessairement totale, et elle n'est pas nécessairement en phase active de croissance.[13]

b- Evapotranspiration réelle "ETR" :

C'est l'évapotranspiration d'un couvert végétal dans des conditions réelles données : l'alimentation en eau de la plante peut être limitée par des conditions d'ordre physique (succion du sol), chimique (concentration des solutions), biologique (régulation stomatique) [13]

Tableau (II-05) : Evaporation moyennes mensuelles, interannuelles Période (1991-2006). [12]

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Octo	Nov	Déc
Evaporation moyenne (mm)	90,8	119,5	179,5	244,4	289,2	364,8	415,6	392,4	274,8	212,8	115,2	107,9

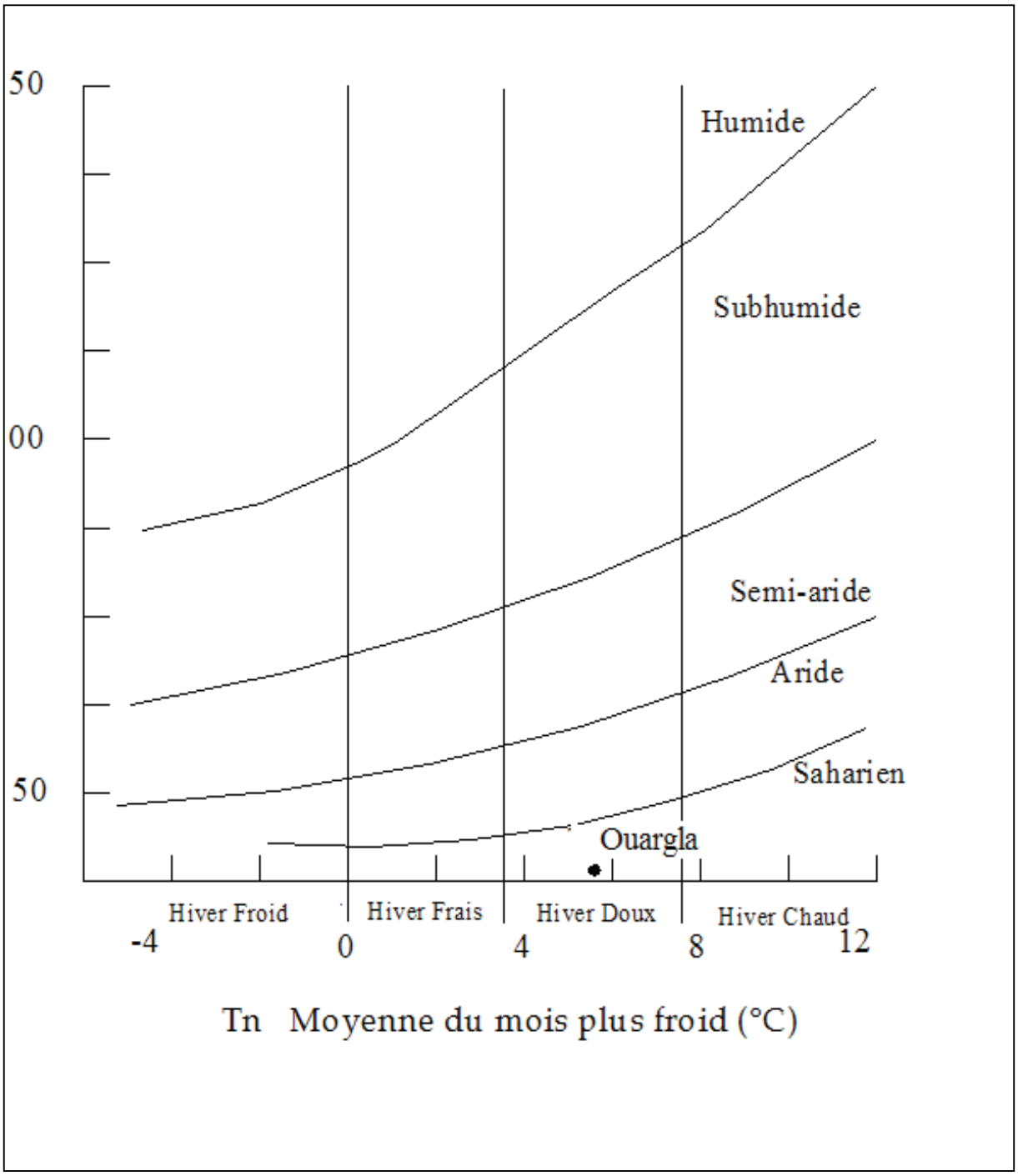

Figure (II-14) : Climagramme D'EMBERGER de la cuvette de Ouargla [14]

c- EVAPOTRANSPIRATION POTENTIELLE "ETP":

C'est la valeur maximale possible de l'évapotranspiration dans des conditions climatiques données. On considère dans la pratique, l'évapotranspiration potentielle comme une référence et on la définit comme étant la quantité d'eau évapotranspirée par un couvert végétal continue et homogène, dont l'alimentation en eau n'est pas limitée, et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique. [13]
On emploie également le terme ETP pour désigner la valeur approchée de l'évapotranspiration potentielle obtenue par le calcul à partir d'une formule fondée sur des données climatiques.

II.4.5.2 Calcul de l'évaporation de plan d'eau:

- Méthode de Boutaoutaou :

L'évaluation de l'évaporation du plan d'eau de la région d'étude a été calculée en utilisant la formule de Boutaoutaou (1995) [04] pour la région de sud.

$$E = 0.403 n.D^{0.73}(1 + 0.39v) \quad \text{..... (II-5)}$$

Avec :
D: déficit de saturation de l'aire en ml/bar.
v : Vitesse du vent (m/s)
n: nombre de jour du mois considéré

Le déficit de saturation (D) est calculé selon l'équation suivante:

$$D = 0.063\ (100 + H)\, e^{0.0632\ T} \quad \text{..... (II-6)}$$

Ou:
H : humidité relative de l'air en (%)
T : température de l'air en (°C).
Ainsi l'évaporation de référence calculée pour l'année (2006) est consignée dans le tableau suivant :

Tableau (II-06) : calcul de l'évaporation de plan d'eau par la méthode BOUTAOUTAOU (année 2006)

MOIS	JAN	FÉVE	MARS	AVRIL	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC
ETP	1292,96	1432,97	2378,07	3262,78	4569,41	4983,18	5067,57	5073,5	3709,31	2368,96	1529,88	1589,37

II.4.5.3 Calcul de l'évapotranspiration potentielle "ETP ":

A- Méthode de Turc : [11] [13]

L'ETP calculée à partir de la formule Turc suivant la formule :

$$ETP = 0.4\left(\frac{T}{T+15}\right)\cdot(\lg + 50)\cdot K \quad \text{..... (II-7)}$$

Avec:

T : Température mensuelle de l'aire en °C.

Ig : radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol en calories/cm^2 /jour.

K : coefficient égal à 1 si l'humidité relative supérieure a 50% sinon

$$K = \frac{50 - h_r}{70}$$

$$Ig = IgA(0.18 + 0.62\frac{h}{H})$$

Avec:

IgA : radiation solaire globale du mois considérée en Cal /cm²/j.

H : durée théorique du jour du mois en heures.

h : durée d'insolation en heurs/mois.

IgA=1035-9.076.lat + (7.050Lat + 49.90) Cos(29.9i-182.5)

H=362.7+0.2101.lat + (4.085lat – 80.99) Cos(30.0i-188.9)

i : le numéro du mois (1 pour janvier et 12 pour décembre)

Lat : latitude de la région d'étude égale 31.57N

B- Méthode de Penman : [11] [13]

H.L.PENMAN (1948) considère que l'évapotranspiration dépend du rayonnement net et du déficit de saturation, qui est lié à la vitesse du vent. Il exprime l'ETP par la formule suivante:

$$ETP = \frac{H\Delta + \gamma Ea}{\Delta + \gamma} \quad \text{……..……..} \quad \text{(II-8)}$$

Avec:

- H (mm) $= \frac{Rn}{60}$; Rn : étant la radiation nette en Cal /cm²
- Δ : variation de la tension de vapeur d'eau saturante en mm de mercure
- γ : constante psychrométrique.

$$\gamma = 0.00163 \left(\frac{p}{\lambda}\right) \quad \text{……} \quad \text{(II-9)}$$

P: pression atmosphérique (en Kpa)

λ : chaleur latente de vapeur (en j /kg)

$$\lambda = 2.501 - (2.361 \,.\, 10^{-9})\, T \quad \text{……..} \quad \text{(II-10)}$$

- Ea: valeur donnée par une formule établie par PENMAN après plusieurs années d'expériences ; elle est fonction du déficit de saturation et de la vitesse du vent ; elle s'exprime ainsi :

$$Ea = 0.35\,(1 + 0.01\,U)\,(e_w - e_d) \quad \text{……..} \quad \text{(II-11)}$$

Avec

- U : vitesse du vent en miles /jour
- e_w : tension de vapeur saturante en mm Hg
- e_d : tension de vapeur au point de rosée mm Hg.

C. Méthode de THORNTHWAITE : [11] [13]

Pour le calcul de l' ETP nous avons utilisé les températures moyennes mensuelles

$$ETP\ (c) = ETP \times K = 16\left(10\ \frac{T}{I}\right)^{\alpha} \times K \quad \text{..... (II-12)}$$

Avec :

i : Indice thermique mensuelle **i = (T/5)$^{1.514}$**.

I : Indice thermique annuelle. $I = \sum 12 \cdot i$

T : Température moyenne mensuelle du mois considéré en °C.

K : Coefficient d'ajustement mensuel

$$K = \frac{L}{12}\frac{N}{30}$$

Avec:

L : Durée d'insolation

N : nombre de jour de mois

α : Exposant climatique

$$\alpha = 6{,}75 \times 10^{-7} * I^3 - 7{,}71 * 10^5 * I^2 + 1{,}79 * 10^{-2} * I + 0{,}49.$$

ETP : Evapotranspiration potentielle du mois considéré en (mm d'eau).

ETP© : Evapotranspiration potentielle corrigé du mois considéré en (mm d'eau).

I= 134, α =3,13 .

Tableau (II-07) : Calcul de l' ETP d'après THORNTHWAITE (année 2006) :

Mois	Jan	Fév	Ma	Av	Mai	Jui	Juil	Aou	Sep	Oct	Nov	Déc
T (°C)	9,8	13,4	19,7	25,1	29,6	32,5	35,4	35,4	28,5	25,3	17,8	12,9
K	0,62	0,63	0,86	0,73	0,71	0,78	0,95	0,88	0,76	0,79	0,73	0,59
ETP (mm)	13,44	17,20	26,23	36,23	50,59	65,57	72,92	70,80	59,41	42,48	24,67	15,24
ETP_c (mm)	3,71	10,04	45,70	82,63	134,70	200,34	318,38	292,39	128,13	91,85	28,31	8,40

II.4.6. **Calcul du bilan hydrique :**

Ce bilan se traduit par le fait que l'eau qui entre dans la zone d'étude (cuvette de Ouargla) par la pluviométrie ou débit des forages profonds est évacuée vers OUM Raneb à travers la station de pompages de chott, évaporée par la végétation, l'activité humaine ou dans la sebkha et le chott ou encore s'écoule vers le nord et le sud, le solde positif s'accumule dans la nappe ou est prélevé sur ses réserves.

La formule du bilan hydrique de la cuvette de Ouargla est donne comme suite:

$$R = V_E - V_S \qquad \text{..... (II-13)}$$

V_E : volume entrant dans la cuvette

V_S : volume sortant

$$V_E = V_{Forage} + V_{Pluie} \qquad \text{..... (II-14)}$$

V_{Forage} : volume de débit exploité de forage dans la cuvette de Ouargla

V_{Pluie} : volume de pluie

$$V_S = V_{ETP} + V_{PSC} \qquad \text{..... (II-15)}$$

V_{ETP}: volume d'eau évaporé par la l'évaporation de plan d'eau libre et évapotranspiration de plan cultivé.

V_{PSC}: volume pompé par la station de chott vers sebkha de Oum Raneb

II.4.6-**1- Calcul débit des forages de la cuvette de Ouargla V_F:**

Selon l'inventaire établie par la direction de l'hydraulique en année 2005 on estime que le nombre de forages exploités par l'ensemble des secteur (agricole, eau potable et industriels) et de 485 forages pour un volume total de 6335 l/s.

C'est-à-dire 99890280 m^3/an. Ces captages exploitent les réserves hydrogéologiques des régions de Ouargla, Rouissat, Ain Beida, N'goussa Hassi, Ben Abdelah et Sidi Khouiled. Voir le tableau ci-dessous.

Tableau (II-08): répartition de débit des forages par commune:[01]

Commune	Nombre de forage total	Nombre de forage exploité	Débit des forages exploités (l/s)	Débit des forages exploités (m^3/année)
Ouargla	117	97	1912	30148416
Rouissat	54	33	810	12772080
Ain Beida	92	54	1062	16745616
N'goussa	71	41	788	12425184
Hassi Ben Abdelah	121	67	1488	23462784
Sidi Khouiled	30	25	275	4336200
Total	485	317	6335	**99890280**

Le volume de l'eau pompée de la nappe profonde et alimentant la nappe libre est égal à 99890280 m^3.

II.4.6.2. Calcul du volume de précipitation :

Le volume des précipitations est donné par la formule suivante:

$$V_P = S \times P \qquad \text{…….. (II-16)}$$

V_P : le volume de précipitation en litre (L)

S : la surface en km^2

P : les précipitations en (mm)

Tableau (II-09): volume de précipitation l'année 2006

Commune	P_{moy} (mm)	S (km2)	S (m2)	Vp (m3)
Ouargla	10,49	2887	2887*106	30284630
Rouissat	10,49	7331	7331*106	76902190
Ain Beida	10,49	1973	1973*106	20696770
N'goussa	10,49	2907	2907*106	30494430
Hassi Ben Abdelah	10,49	3060	3060*106	32099400
Sidi Khouiled	10,49	131	131*106	1374190
Total				191851610

Le volume total précipité au cours de l'année 2006 dans la cuvette de Ouargla est évalué à 191851610 m3.

D'après le tableau (II-08) et (II-09) , le volume entrant dans la cuvette de Ouargla est égal :

$$V_E = V_{Forage} + V_{Pluie}$$

VE=99890280 + 191851610 = 291741890 m3

II.4.6.3. Détermination du volume d'évapotranspiration de la surface cultivée:

Le calcul de l'évapotranspiration au niveau des palmeraies de Ouargla a été effectué en utilisant la Formule de BLANNEY - CRIDDLE corrigée par FAO. Celle-ci a été largement utilisée au niveau des palmeraies dans des zones similaires à Ouargla.
L'évapotranspiration de surface cultivée sur la Cuvette est donnée comme suite:

$$ETP_C = K * ETP \text{ ..... (II-17)}$$

ETP_C : évapotranspiration de surface cultivé (mm)
ETP : : évapotranspiration potentiel (mm)
K : coefficient culturel, qui varie entre 0.5 a 1.2 suivant les cultures et les zones climatiques
Pour la région de Ouargla et la surface cultive par le palmier le coefficient k=1,4

Donc:
ETPC=1344,58 x1,4 = 1882 mm
La surface irriguée est égale a 2500 he.
Le volume évaporé pour la surface cultivée est donné comme suite:
VETPC = 1882 x 0.001 x 25 x106 = 47050000 m3

II.4.6.4. Détermination de volume d'évaporation de plan d'eau libre:

La cuvette de Ouargla caractérisée par l'existence de deux canaux de drainage ce lui du chott et Bamindile, le deux canaux sont à ciel ouvert.
- La longueur du canal de chott est de : 5500 m
- La largeur moyenne du canal de chott est de : 07 m
- La longueur du canal de Bamindil est de : 11500m

- La largeur moyenne du canal de Bamindil est de : 07 m

Donc la surface du canal de chott est égale à 38500 m2 et la surface du canal de Bamindil est égale à 80500 m2

Donc la surface totale de plan d'eau libre est égale à 119000 m2

L'évaporation du plan d'eau libre dans la cuvette de Ouargla d'après la formule de Boutaoutaou est égale à 37257,96 mm/an.

L'évaporation du plan d'eau de la cuvette de Ouargla est donnée comme suit:

Epd= 37257,96 x 119000 *0.001= 4433697,24 m3

Le volume d'eau évaporé du plan d'eau libre est égal à 4433697,24 m3

II.4.6.5. Calcul du volume d'eau refoulée vers sebkha de Oum Raneb :

Dans la station de refoulement d'eau de station de chott vers sebkha de Oum Raneb il existe 02 pompe émargé refoulé 300 l/s par pompe, donc le débit refoulé vers le chott Oum Raneb est 600 l/s en duré de 15 heurs par jour

Vpsc= 600 x 3600*15*365/1000=11826000 m3

Donc le volume sortant vers la sebkha de Oum Raneb est égal à 11826000 m3

Après calculer tout le volume entrant et le volume sortant dans le cuvette de Ouargla, le volume restant dans la cuvette comme réserve alimentant ainsi la nappe phréatique est présenté sur le tableau suivant :

Tableau (II-10) : résultat de calcul de bilan hydrique de la cuvette de Ouargla l'année 2006

	Paramètre	Quantité
Volume entrant V_E	V_F	99890280 m^3
	V_P	191851610 m^3.
S/Total	$V_E = V_F + V_P$	291741890 m3
Volume sortant V_S	V_{ETPC}	47050000 m3
	Epd	4433697 m3
	Vpsc	11826000 m3
S/Total	Vs = VETPC + Epd + Vpsc	63309697 m3
Total	R = VE - Vs	228432193 m3

Conclusion:

De ce qui précède nous remarquons que la zone étudiée, soit la ville de Ouargla, est caractérisée par un climat aride de température maximale T_{max} = **43.14 °C** et température minimale T_{min}=**4.73 °C** et d'une humidité relative maximale Hr_{max} = 64,56% et humidité relative minimale Hr_{min} = 25,94% et humidité relative moyenne Hr_{moy} = 44,10% et un taux de précipitation d'ordre 18 mm.

Le bilan hydrique que nous avons établi, montre un surplus aux entrées, se traduit par une augmentation de la quantité d'eau stockée, d'où un risque de surélévation du niveau de la nappe phréatique.

Le bilan hydrique montre un surplus aux entrées se qui explique, en conséquence, la remontée de la nappe phréatique rencontrée dans cette zone, d'où s'impose l'utilité de l'étude de l'effet d'un tel phénomène notamment sur les constructions en place ou ceux qui peuvent être implantées dans le future.

III .1-INTRODUCTION :

Les études sur la région de Ouargla ont été menées depuis fort longtemps, cependant, les premières prospections ont été l'œuvre des ingénieurs : L.VILLE en 1872 et G.Rolland en 1890, elles ont porté sur de nombreux problèmes hydrauliques touchant les territoires du sud en général et la région de Oued Righ et Ouargla en particuliers. D'autres auteurs et compagnies (pétrolières notamment) ont également mené de vastes études géologiques, hydrogéologiques et hydrauliques durant la deuxième moitié du siècle dernier [SNREPAL (1940-60), SONATRACH(depuis 1965), CORNET(1964), BUSSON (1967).

Récemment, d'autres études et travaux universitaires et d'organismes publics ont été réalisés sur principalement la cuvette de Ouargla, parmi eux nous pouvons citer les travaux suivants:

- L'application des techniques hydrogéochimiques et nucléaires à l'étude des ressources en eau du Sahara Nord-Est septentrional (GUENDOUZ.A, 1985). **[07]**

- Le commissariat à l'énergie atomique (COMENA ex HCR) a entrepris dans le cadre d'un contrat de marché avec la DHW de Ouargla une étude isotopique sur les eaux des nappes profondes (CI, CT), et la nappe phréatique de la région de Ouargla. Le COMENA a effectué deux campagnes d'échantillonnages, la première en novembre 1991 et la deuxième en mai 1992. L'étude a permis de définir l'âge et l'origine des eaux, les relations entre les différentes nappes, et les caractéristiques physico-chimiques des eaux. **[07]**

- L'entreprise nationale de géophysique ENAGEO (1991-92), a effectué des campagnes piézométriques et des prospections géophysiques sur l'ensemble de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla. Cette étude a mis en évidence la piézométrie et les caractéristiques hydrodynamiques, ainsi que les formations lithologiques de la nappe phréatique. **[01]**

- Dans le but de maîtriser et limiter l'ampleur de la remontée de la nappe phréatique, l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH) de Ouargla, a réalisé depuis l'année 1992 une étude générale, basée sur des campagnes piézométriques et d'échantillonnages, effectuées sur l'ensemble de la cuvette. Cette étude a permis de confirmer le sens de l'écoulement, et de définir le régime de fluctuation saisonnière de la nappe. **[09]**

III.2- ANALYSE DU PHENOMENE DE REMONTEE DE LA NAPPE PHREATIQUE

III.2.1 Avant 1956 (date du premier forage à l'Albien)

Les fluctuations du niveau de la nappe phréatique sont étroitement liées à l'histoire des palmeraies, à l'exploitation des ressources en eau artésienne et aux efforts d'assainissement consentis pour lutter contre les nuisances qui en ont résulté.

Les chroniques rapportent qu'en 1881, les fossés entourant le Ksar sont comblés pour lutter contre le paludisme, ce qui indique qu'à cette époque ils étaient remplis d'eau stagnante et que la nappe phréatique était proche de la surface du sol.

En 1949, le réseau de drainage est rénové, 20 km de drains nouveaux sont réalisés ainsi que 5 grands collecteurs. Ces travaux se poursuivent en 1950 et fin 1951, grâce à 30 km de drainages nouveaux, le niveau de la nappe phréatique a baissé de plus de 1 mètre (D. Pillet. Repères pour l'histoire de Ouargla 1872 – 1992) **[05]**

.

III.2.2. Après 1956

En 1956, le forage Albien I au sud-est du Ksar a servi à la revivification des palmeraies anciennes et à la création de nouvelles plantations. Parallèlement, l'exploitation de la nappe du Mio-Pliocène est développée, le réseau de drainage étendu et rénové. Les eaux de drainage qui se déversent dans le Chott provoquent une élévation sensible du niveau de l'eau en saison froide. En même temps, le développement de la ville et l'évacuation des eaux urbaines provoquent une augmentation du niveau de la nappe phréatique.

Le problème est d'abaisser le niveau du Chott et celui de la nappe phréatique de façon à mieux drainer les palmeraies tout en permettant la mise en place d'un réseau d'assainissement efficace (Rouvillod – Brigol 1975 – Le Pays de Ouargla) **[05]**

. On a commencé par installer, en 1956, une éolienne d'exhaure qui permettait d'évacuer l'eau dans la sebkha d'Oum er Raneb. Le débit de 120 m3/h s'est révélé insuffisant et deux groupes motopompes ont été adjoints à l'éolienne portant le débit total à 255 m3/h. Ce débit étant toujours insuffisant, d'autres solutions sont envisagées : bassin évaporatoire dans le Chott et les sebkhas, pompage et évacuation vers la sebkha d'Oum er Raneb et déjà vers la Sebkhet Safioune. **[05]**

III.2.2.1 Etat en 1968 :

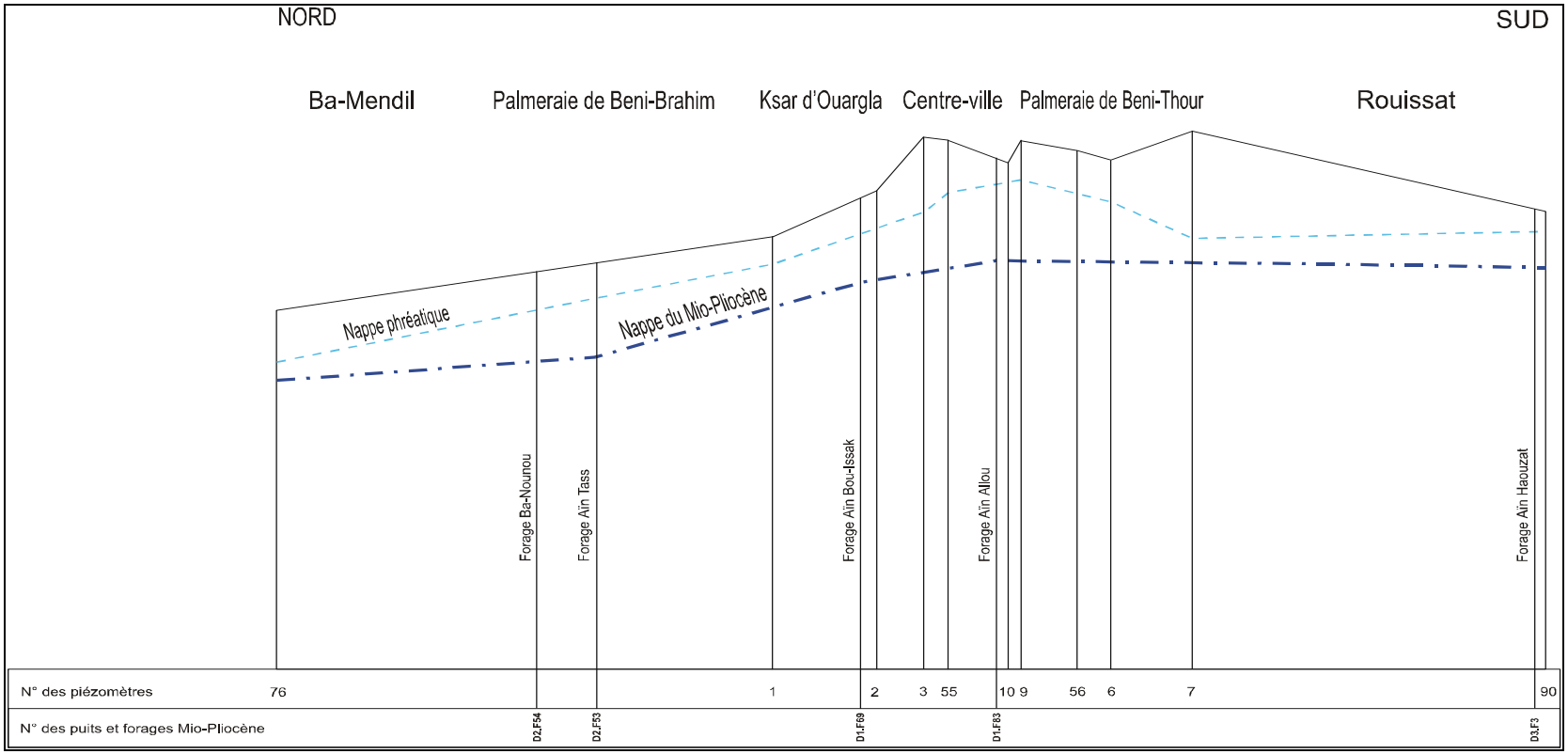

Fig. (III-1) Coupe hydrogéologique passant par la ville de Ouargla (en 1968).

La nappe phréatique dessine nettement un dôme sous la ville.

Sa cote est plus élevée que celle de la nappe du Mio-Pliocène **[05]**

Le Bureau d'Hydraulique dessine une carte piézométrique en avril–mai 1968. La surface de la nappe forme un dôme culminant à la cote de 134,5 m sous le quartier Duprez avec une pente régulière en direction des chotts où elle n'atteint plus que la cote 128 m et même 127 m tout au nord. **[05]**

Les lignes de courant, perpendiculaires aux isopièzes, indiquent nettement un écoulement radial depuis ce point haut en direction des canaux de drainage ceinturant la ville au nord, et aussi de zones sableuses situées au sud. On ne peut expliquer cette situation singulière que par une alimentation de la nappe phréatique à partir de son point haut sous les immeubles du quartier Duprez et un drainage par le chott.
Cette alimentation ne peut pas se faire naturellement à partir des nappes plus profondes. La nappe du Mio-Pliocène présente un niveau piézométrique inférieur à celui de la nappe phréatique dans toute cette zone haute. On pourrait envisager la nappe du C.I. (Continental intercalaire ou Albien) qui présente un niveau piézométrique nettement plus élevé d'environ 200 mètres, mais pour alimenter la nappe phréatique, les eaux devraient traverser les nappes du CT (Complexe terminal), dont le Mio-Pliocène, qu'elles mettraient en charge et aux eaux desquelles elles se mélangeraient, ce qui n'est pas le cas (cf. fig. (III-3)). L'alimentation de la nappe phréatique ne peut provenir que d'une cause anthropique : irrigation des palmeraies et eaux urbaines.

La nappe phréatique est à une profondeur de 0,75 m à 2 m sous la ville, avec une variation très faible (quelques centimètres) entre août 1968 et avril – mai de la même année et inférieure à 0,5 m sous la palmeraie de Beni-Sissin et d'une partie de celle de Beni-Brahim, ce qui est dont le rendement optimum dépend essentiellement d'un bon drainage, d'un bon lessivage et d'un volume d'irrigation suffisant

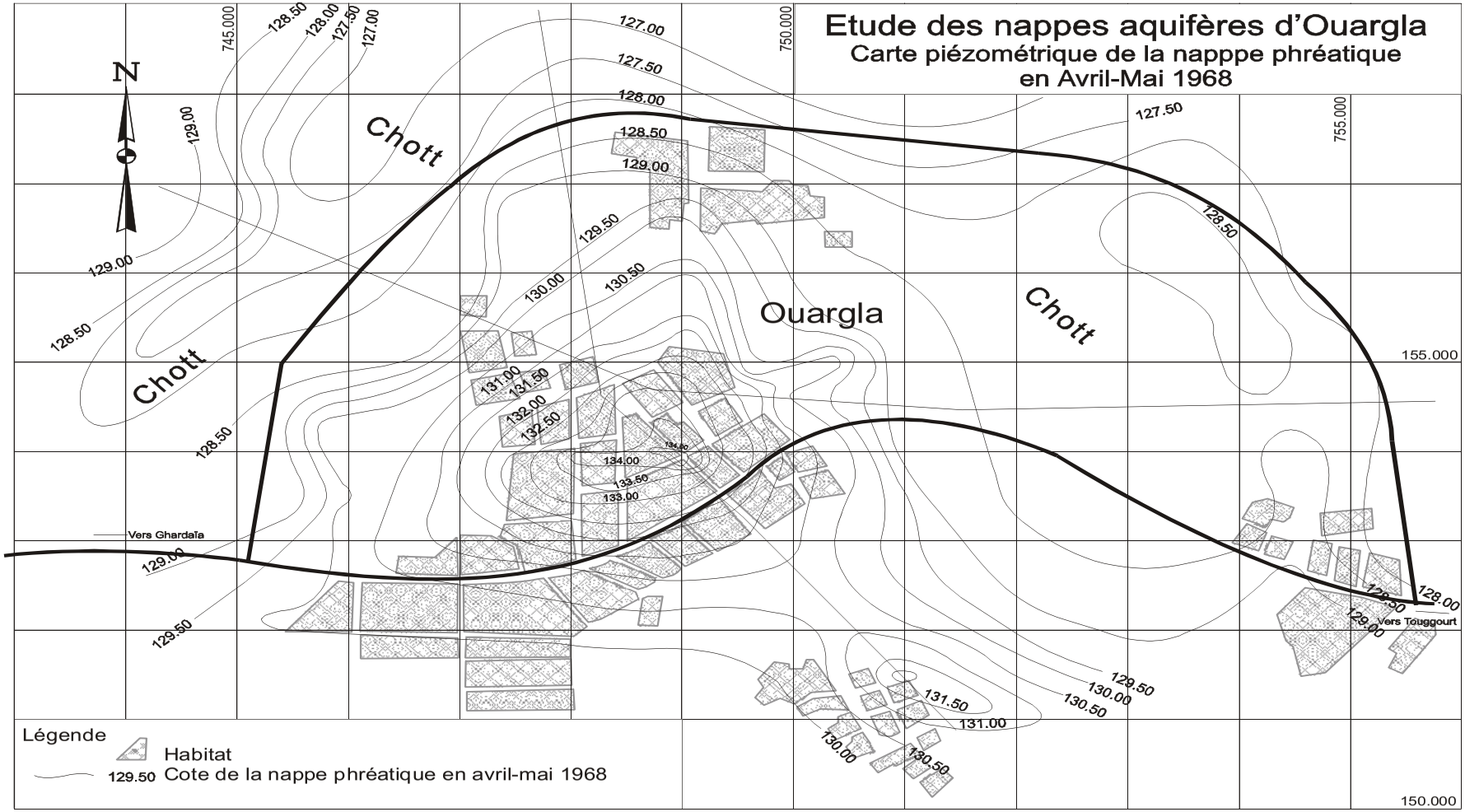

Fig. (III-2) Carte piézométrique de la nappe phréatique en avril-mai 1968.

Les isopièzes dessinent un dôme centré sous les immeubles récents. **[05]**

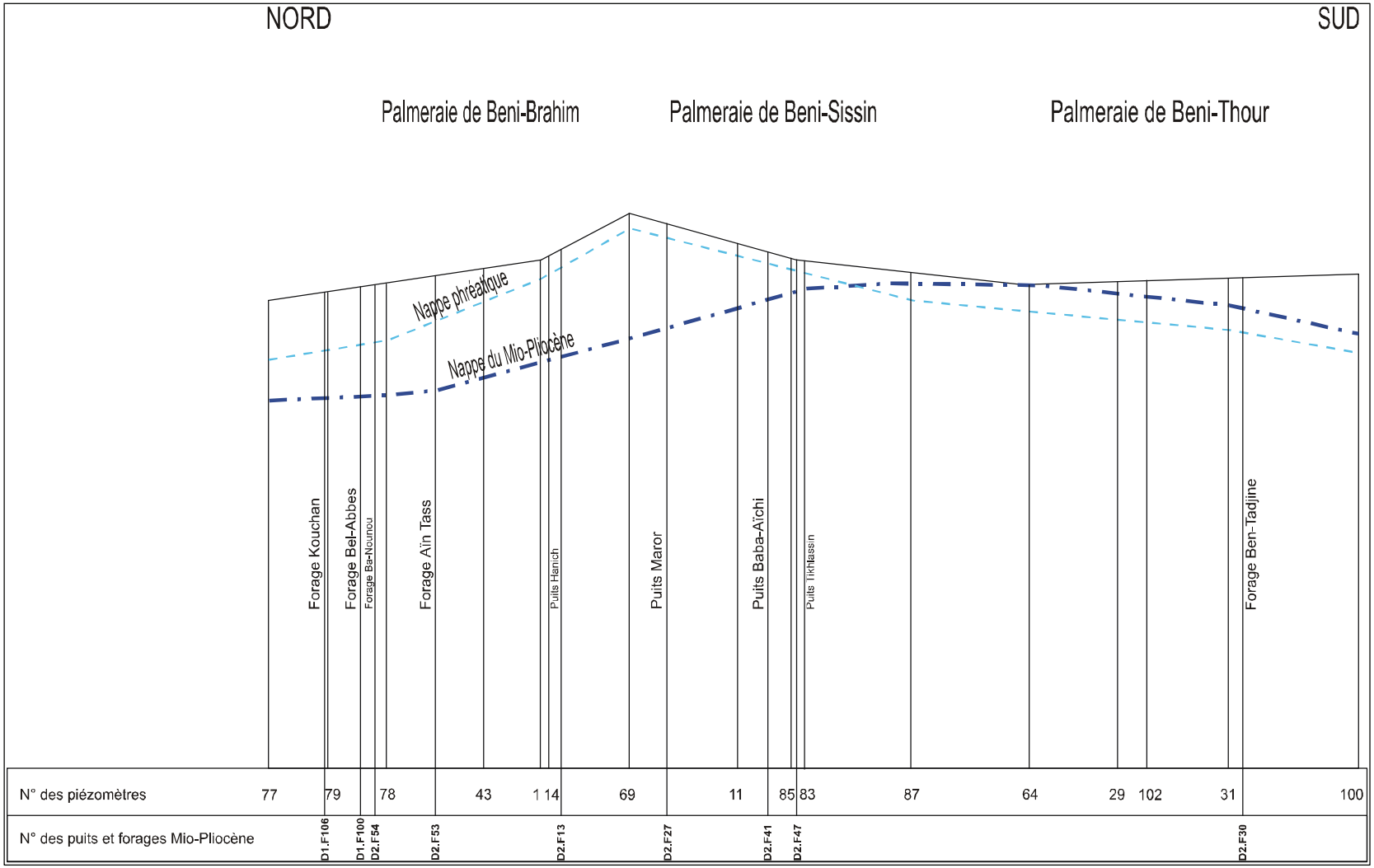

Fig. (III-3) Coupe hydrogéologique au travers de la palmeraie en 1968. **[05]**

III.2.2.2 Améliorations apportées par le réseau d'assainissement :

En 1972 – 73, on construit un réseau d'égouts qui draine une partie de la nappe sous l'agglomération. Il semble que ces travaux aient amélioré la situation car en octobre 2001, la profondeur moyenne de la nappe sous le sol était de 2,37 m (cf. fig. (III-4)).

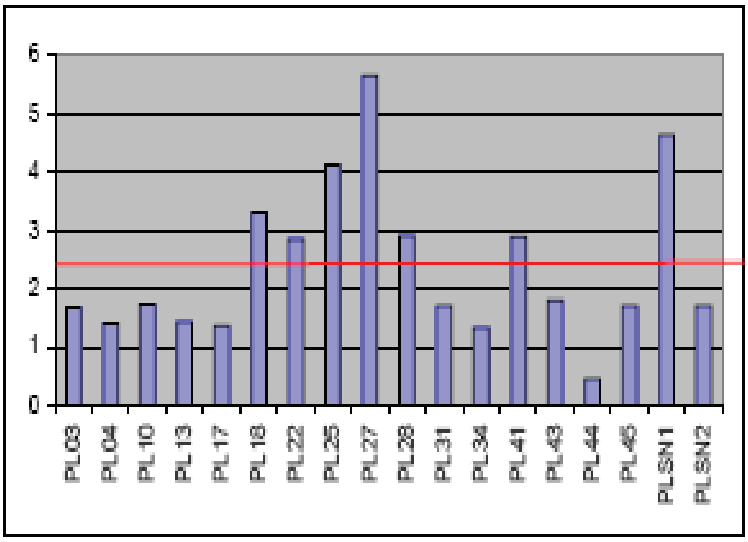

Fig. (III-4) Profondeur de la nappe phréatique sous le sol (en mètres)

Moyenne : 2,37 m **[05]**

III.2.2.3 Travaux récents :

En 1989 un programme est lancé par la direction de l'hydraulique dans le but de trouver une solution pour le rejet des eaux hors de la cuvette et pour éliminer la production et l'arrivée d'eau au niveau de celle-ci.

L'étude devait concerner :

– L'origine des eaux
– La localisation exacte des nappes phréatiques, des sebkhas et des chotts
– Le sens d'écoulement souterrain de cette nappe.

Elle a comporté :

– Une étude de la cuvette par prospection géophysique
– La réalisation de 45 piézomètres à l'intérieur de la ville et de 113 piézomètres couvrant la totalité de la cuvette.
– Des campagnes piézométriques en 1991, 1992 et 1993 par la DHW et ENAGEO

Dès 1994, les mesures piézométriques et hydrochimiques ont été reprises par l'ANRH à raison d'une à deux campagnes par an.

Entre février 1992 et avril 2002, sur une période de 10 ans, une baisse générale de niveau est constatée sur les nouveaux piézomètres (cf. fig. (III-5))- les mesures sur les anciens piézomètres ayant été abandonnées, des comparaisons sur une période plus longue ne sont pas possibles) **[05]**

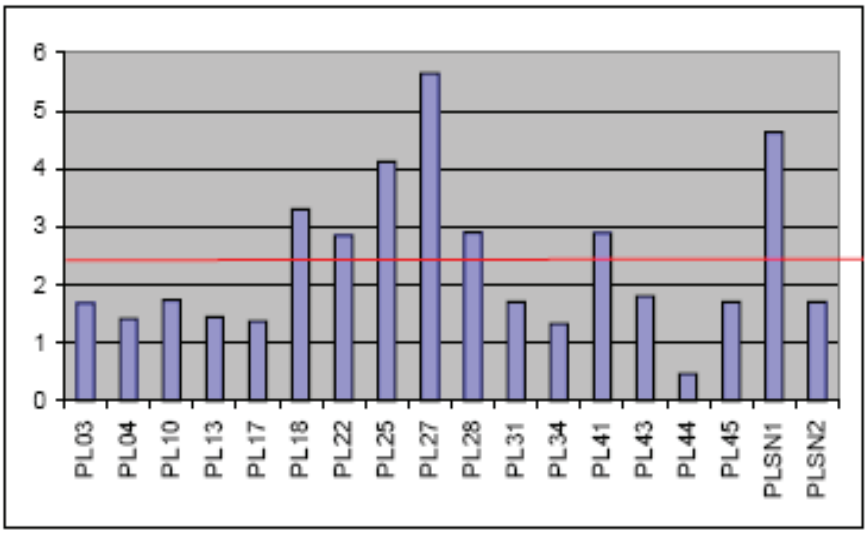

Fig. (III-5) Variation des niveaux piézométriques (en mètres)

entre avril 2002 et février 1992 **[05]**

Seuls 6 piézomètres présentent une montée du niveau égale ou supérieure à 10 centimètres. Ils sont situés au nord et au sud de N'Goussa ainsi qu'à l'est et l'ouest de Ouargla (cf.fig. (III-6)).

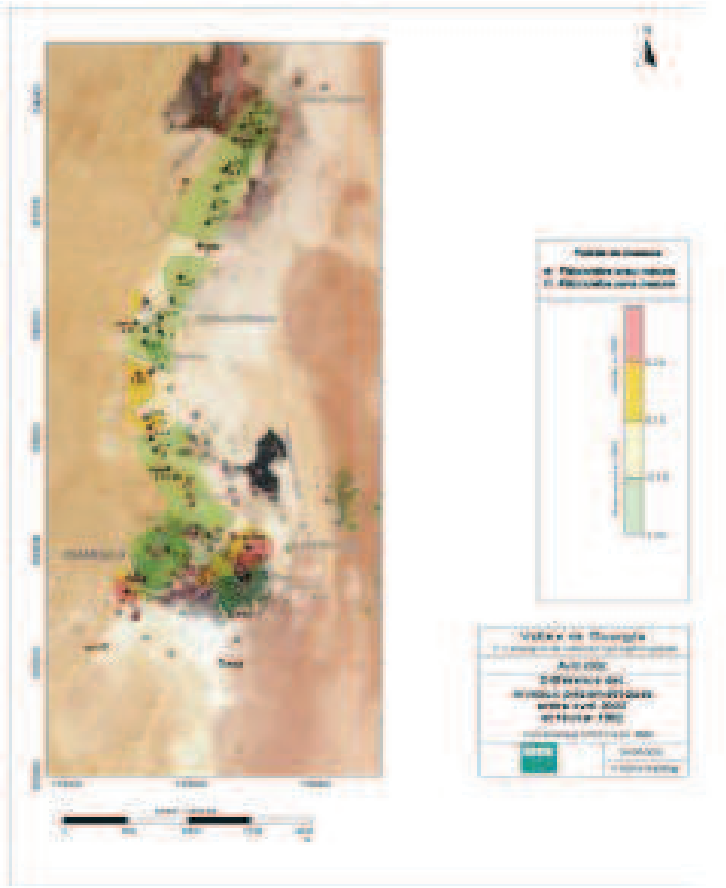

Fig. (III-6) Différence des niveaux piézométriques de la nappe

entre avril 2002 et février 1992 **[05]**

D'une année à la suivante et en considérant la même saison, entre octobre 2002 et novembre 2003, on constate que les variations sont généralement faibles et qu'en moyenne elles s'équilibrent (cf. fig. (III-7)).

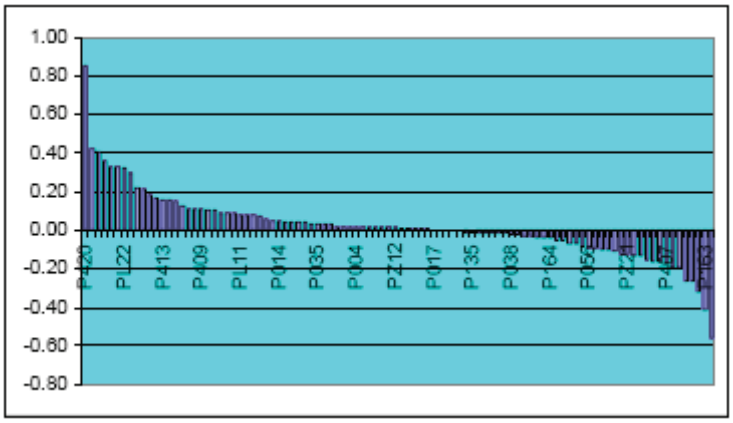

Fig. (III-7) Diagramme des différences de niveaux piézométriques entre

octobre 2002 et novembre 2003 **[05]**

D'une saison à la suivante, de la fin de la période estivale (octobre 2001) à la fin de la période hivernale (avril 2002), on constate une montée générale de la nappe en fin d'hiver (cf. fig. (III-8) et (III-9))

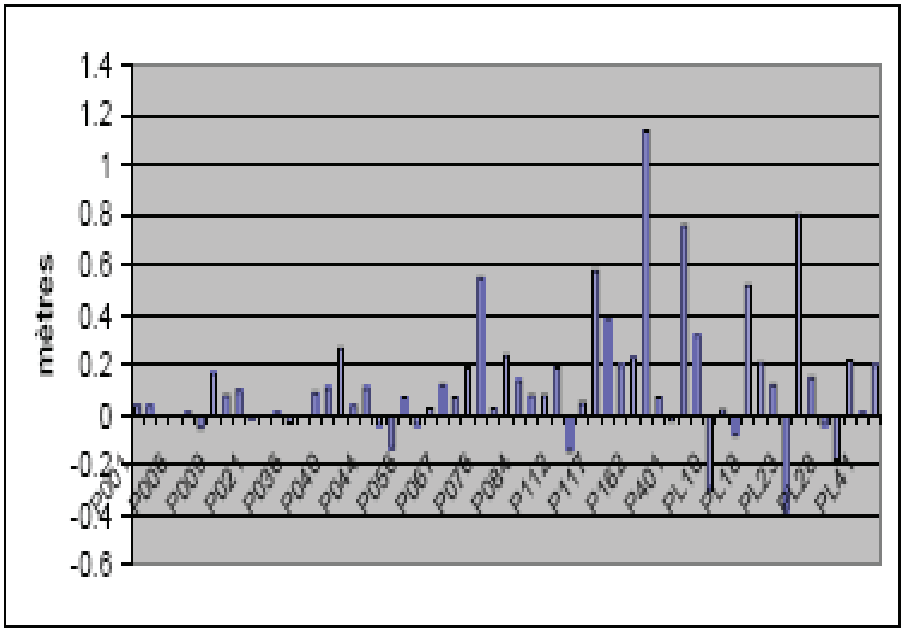

Fig. (III-8) Variation des niveaux piézométriques (en mètres)

entre avril 2002 et octobre 2001 **[05]**

A la fin de la période hivernale, le niveau de la nappe phréatique est monté à la plupart des piézomètres, parfois de manière importante (1,14 m au P 163).

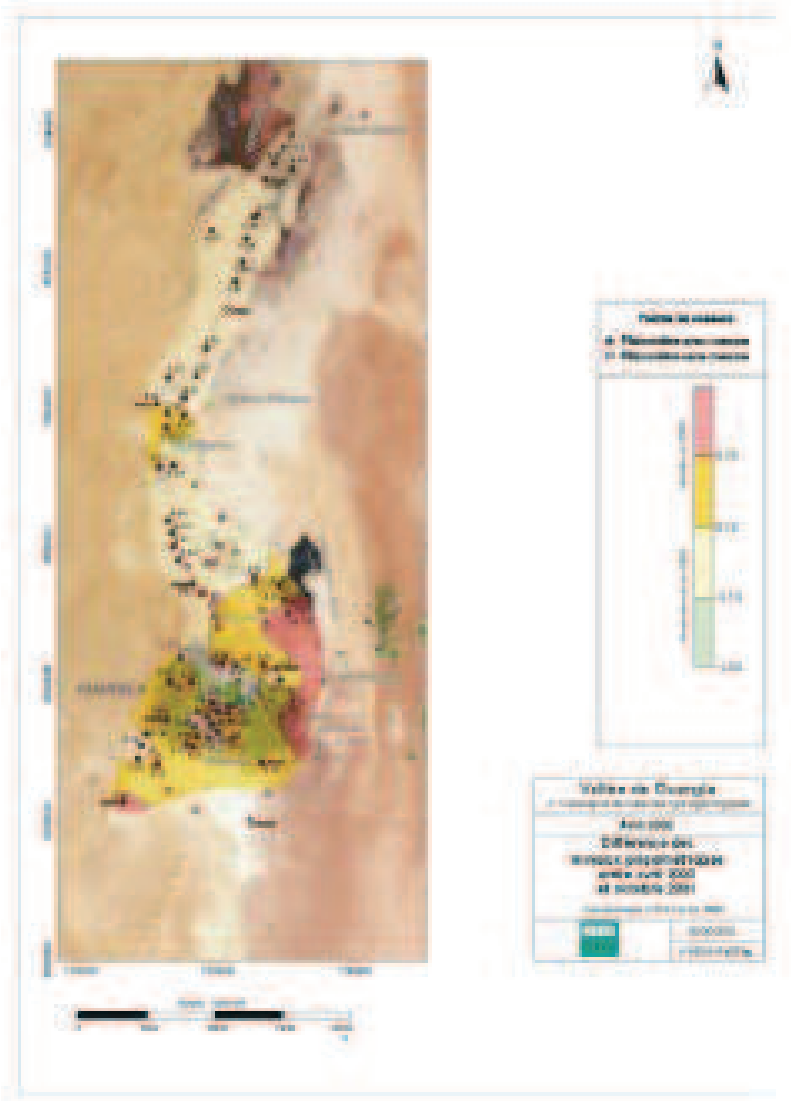

Fig. (III-9) Différence des niveaux piézométriques de la nappe phréatique entre avril 2002 et octobre 2001 **[05]**

On note toutefois des différences importantes selon les régions.

Dans toute la zone située au nord de N'Goussa et dans la Sebkhet Safioune, le niveau de la nappe est resté remarquablement constant, avec des variations comprises entre + 9 cm (au P039) et – 3 cm (P 036) en avril 2002 (cf. fig. (III-9)).

Aux environs de N'Goussa, la nappe est montée de 11 cm à 27 cm sous l'effet de l'irrigation.

Au sud de N'Goussa et jusqu'aux environs de Bour el Aïcha (P 059), la nappe est restée stable, avec une tendance à la baisse (- 13 cm au P 055).

Dans la région de Ouargla, les variations sont plus tranchées mais souvent localisées (cf. fig. (III-10)).

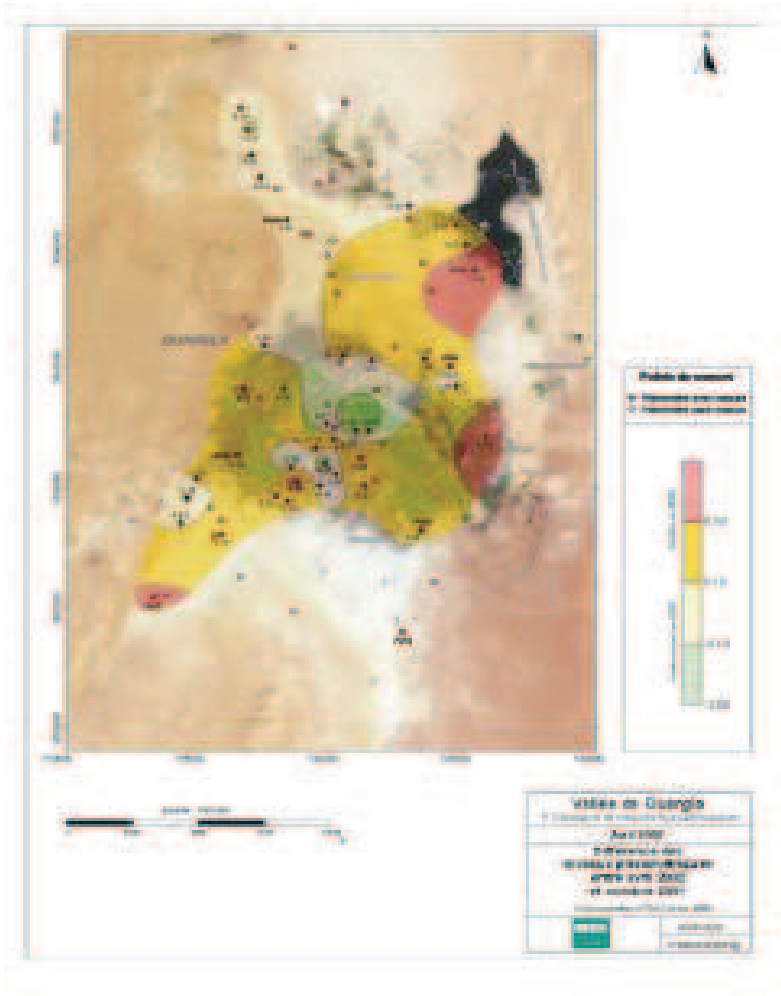

Fig. (III-10) Différence des niveaux piézométriques de la nappe phréatique entre avril 2002 et octobre 2001 aux environs de Ouargla

Au centre ville, on constate une baisse atteignant 20 à 40 cm (38 cm au PL 23, 18 cm au PL 30 voisin, 30 cm au PL 10) et aussi une montée brutale + 80 cm au PL 25 et aux environs, + 0,76 m au PL 03 à Chott, + 0,55 m en bord de sebkha à Bamendil, + 0,58 m au P 117 et le solde des piézomètres généralement en hausse de 10 à 30 cm.

Les quatre piézomètres situés à proximité de la Sebkhet Oum Raneb sont à la hausse. Celle-ci est comprise entre 7 cm pour le P 165 le plus éloigné et 1,14 m au P 163. Ils reflètent bien la montée des eaux dans la Sebkhet pendant la saison hivernale, à cause d'un rejet d'eaux de drainage et d'assainissement important et d'un taux d'évaporation plus faible qu'en été.

Dans l'agglomération de Ouargla, des variations journalières importantes ont été observées (cf. fig. (III-10)). Elles sont à mettre en relation avec les variations de niveau dans le réseau d'assainissement. Quand une station de pompage est arrêtée, l'eau reflue non seulement dans

le réseau mais aussi dans le chevelu des branchements particuliers et se répand dans la nappe, faisant monter son niveau. Le phénomène inverse se produit à la remise en route de la station.

Il a été réalisé 7 groupes de 3 piézomètres pour observer ces variations. Sur les deux mois de la durée des mesures, l'on ne distingue pas de tendance générale, ni à la baisse, ni à la hausse du niveau piézométrique, mais des fluctuations qui peuvent être très rapides. Le niveau piézométrique peut varier de plusieurs dizaines de centimètres en quelques heures.

Près de la station de pompage Ouled Naceur, le 14 octobre 2001, le niveau piézométrique est remonté de 31 centimètres au P1, de 16 centimètres au P2 est de 42 centimètres au P3 en moins de quatre heures (cf. fig. (III-11)).

A la station Sidi Amrane, le niveau piézométrique dans le P1 est descendu de 68 centimètres entre le 15 octobre 2001 à 16 h et le 16 octobre à 10 h pour remonter de 56 centimètres entre le 16 à 10 h et 17 octobre 2001 à 8 h.

Dans un jeu de piézomètres, les mesures sont cohérentes d'une série de mesures à l'autre. Les mouvements piézométriques sont similaires sur tous les piézomètres d'un même jeu entre deux séries de mesures.

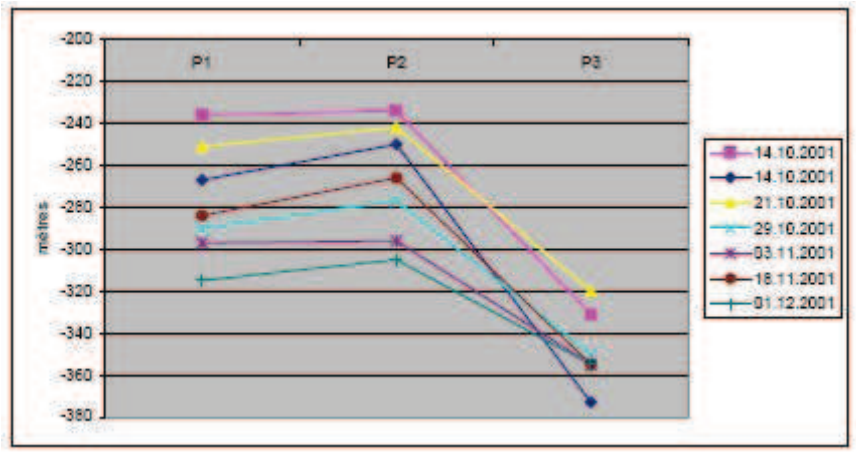

Fig. (III-11) Piézométrie au abord de la station de pompage Ouled Naceur -Hamdat **[05]**

IV.1 INTRODUCTION

La nappe phréatique de la région de Ouargla avec sa nature agressive forme l'assiette d'un nombre important d'ouvrages hydraulique et génie civil qui reposent sur celle-ci, parmi les éléments agressifs contenus dans la nappe nous citons : le chlore, le carbone et le sulfate. Les analyses chimiques des eaux de cette nappe, effectuées par l'Agence Nationale des Ressources Hydriques (ANRH), sont représentées sur le tableau (IV-1) ci-après qui résume la concentration de ces éléments :

Tableau (IV-1)- la concentration des éléments agressif dans la cuvette de Ouargla [09]

	Concentration maximale (mg/l)	Concentration minimale (mg/l)
Chlore (Cl^-)	185000	685
Carbonate (HCO_3)	655	24
Sulfate (SO_4)	115000	688

Le béton armé est le matériau de construction le plus répandu dans le domaine du génie civil. Néanmoins, la méconnaissance de sa performance à long terme, et l'impact incertain de l'environnement sur son comportement, rendent difficile une évaluation précise de la durabilité des ouvrages construits avec ce matériau.

Lorsqu'une structure est mise en service, elle est susceptible de se dégrader, l'origine de cette dégradation peut être mécanique, physique ou chimique.

- **1- Facteurs mécaniques :**
  - Dépassement des contraintes (σ_{ad}) ou des déformations (ε_{ad}) admissibles ($\sigma > \sigma_{ad}$, $\varepsilon > \varepsilon_{ad}$)

  qui donnent naissance à des fissures qui favorisent la décroissance de la durabilité du béton armé. Exemple : passage de grands camions sur une conduite.

  - les charges accidentelles telles que le séisme ou bien les catastrophes naturelles.
  - les charges thermiques dues à l'écart de température.

- **2- Facteurs physiques:**

- La porosité :

La porosité indique les pores dans la matrice cimentaire qui favorisent la diffusion des eaux chargées et l'absorption capillaire notamment pour les petits pores.

- **La perméabilité (pores ouverts) :**

La perméabilité d'un milieu poreux correspond à son aptitude à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz) sous l'effet d'un gradient de pression. Elle dépend fortement du réseau poreux et de sa connectivité. Un béton perméable est un béton non durable**.**

- **3- Facteurs chimiques :**

Les facteurs chimiques se traduisent par les réactions d'échange entre le béton et le milieu agressif. Ils sont souvent les plus importants, puisque le béton peut se dégrader par réaction chimique (dissolution, gonflements) à partir de ses constituants.

Etant donné que les causes chimiques sont les plus important dans la dégradation de la durabilité du béton, dans ce qui suit, nous nous intéressons qu'au mécanisme de dégradation chimique entre le béton et les solutions chimiques agressives environnantes.

IV.2 DEFINITION DU BETON :

Le béton est issu d'un mélange ciment, eau, granulats, et souvent adjuvants, réalisé suivant des proportions bien déterminées en fonction des caractéristiques que l'on veut obtenir.
L'ensemble doit être homogène. La pâte résultante des réactions entre le ciment et l'eau forme l'élément le plus actif du béton.
Les étapes de la fabrication du béton sont résumées dans la figure (IV-1)
Parmi la grande variété de ciments, un des plus couramment utilisé est le ciment portland CEM 1 composé de clinker, de gypse (≈5%) et éventuellement d'ajouts (<5%). Le clinker, obtenu par broyage d'une roche artificielle produite par cuisson vers 1450°C d'un mélange de calcaire et d'argile en proportion moyenne 80% - 20 %, est composé de :

- silicate tricalcique, $3CaO.SiO_2$ ou C_3S (≈60-65%)
- silicate dicalcique, $2CaO.SiO_2$ ou C_2S (≈20-25%)

- aluminate tricalcique, $3CaO.Al_2O_3$ ou C_3A (≈5-10%)
- ferroaluminate tétracalcique, $4CaO.Al_2O_3.Fe_2O_3$ ou C_4AF (≈5-10%)

L'eau est avec le ciment l'ingrédient le plus important du béton. Elle remplit à la fois une fonction physique conférant au béton frais les propriétés rhéologiques d'un liquide, et une fonction chimique contribuant au développement de la réaction d'hydratation du ciment et par la suit à la résistance mécanique du béton.

Les granulats sont composés de roches carbonatées ($CaCO_3$, $MgCO_3$, $CaMg(CO_3)_2$) ou siliceuses (SiO_2). Agglomérés par le liant pour former une pierre artificielle, ils constituent dans les conditions normales, les squelettes inertes du béton, lui conférant sa compacité et participant à sa résistance mécanique.

Au cours de son hydratation, le ciment réagit chimiquement avec l'eau. En effet, sous l'action de l'eau, les espèces du ciment, légèrement soluble dans l'eau passent en solution dans la phase aqueuse pour donner des ions :

- calcium Ca^{2+}
- potassium K+
- sodium Na+
- hydroxyde OH-
- silicate $SiO_4H_2^{2-}$, $SiO_4H_3^{-}$, $Si_2O_7H_4^{2-}$
- aluminate $Al(OH)_4$, AlO_2
- sulfate SO_4^{2-}

Ces ions se combinent en composés hydratés lorsque les concentrations ioniques sont telles que les produits de solubilité des hydrates sont dépassés.

Le produits d'hydratation majeurs sont les silicates de calcium hydratés C-S-H et la portlandite ou hydroxyde de calcium $Ca(OH)_2$ ou CH qui résultent de la réaction chimique suivante :

C_3S

} + H2O → C-S-H + $Ca(OH)_2$ **[15]**

C_2S

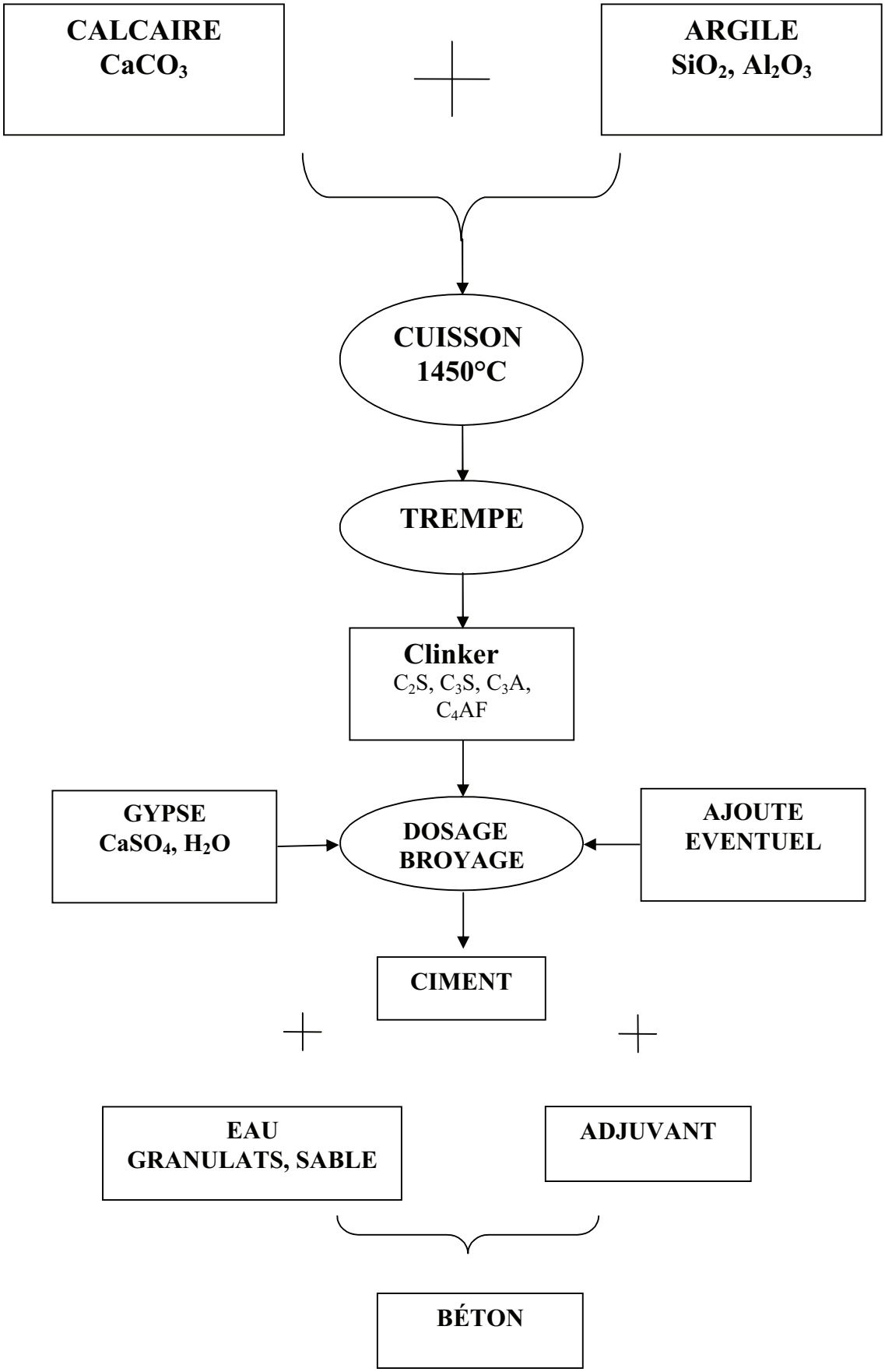

Figure (IV-1) : procédé de fabrication de ciment et du béton [15]

IV.3.DEGRADATION DE BETON D'ENROBAGE

IV.3.1 LA CARBONATATION DE BETON :

IV.3.1.1. Introduction :

La carbonatation des bétons correspond à un ensemble de mécanismes physico-chimiques qui résultent de l'instabilité de phases $Ca(OH)_2$ et $C-S-H$ de la matrice cimentaire sous l'action du dioxyde de carbone CO_2, cette description phénoménologique occulte la complexité des mécanismes de dissolution et de précipitation et de transferts réellement mis en jeu.

Dans le premier temps, en revient sur quelques des propriétés du CO_2 puis, on décrite les mécanismes réactionnels entre les hydrates du bétons et le CO_2, on aborde ensuite quelques généralités sur la corrosion des aciers liée à la carbonatation ; ces rappel sont l'occasion de présenter l'importance de mesurer avec précision le degré de carbonatation pour évaluer le risque réel de corrosion des armateur, les conséquences de la carbonatation sur la microstructure et l'état hydrique du matériau sont également rappelées.

IV.3.1. 2.Quelques généralités sur le dioxyde de carbone :

Toutes les considérations sur le comportement du béton sont généralement fondées sur l'hypothèse que l'air constituant le milieu ambiant ne réagit pas avec la pâte de ciment hydraté. Cependant, dans la réalité, l'air contient du CO_2 qui, en présence d'humidité, réagit avec le ciment hydraté ; l'agent réel est le CO_2 dissout dans la solution interstitielle des pores. **[16]**

IV.3.1.2.1 Le dioxyde de carbone dans l'atmosphère :

L'action du CO_2 se manifeste à de faibles concentrations telles celles que l'on retrouve en milieu rural, où la fraction volumique en CO_2 est d'environ 0,03%. Dans un local mal ventilé, ce pourcentage peut atteindre 0,1% ; dans grandes villes, le pourcentage moyen est de 0,3% et peut atteindre 1%.

« Chaussadent » montre que l'humidité relative influence peu la fraction volumique du CO_2 dans le mélange gazeux. En assimilant le CO_2 à un gaz parfait, sa concentration (en mol.L^{-1})

$$[CO_2] = \alpha_{CO_2} \frac{P_{atm}}{RT} \qquad \text{(IV-1)} \qquad [16]$$

- α_{co_2} est la fraction volumique en CO_2
- R la constante de gaz parfaits (8,32 J.mol^{-1}.K^{-1}),
- T(K) la température absolue
- p_{atm} (Pa) la pression atmosphérique.

La figure (IV-2) présente la concentration en CO_2 en fonction da la fraction volumique du CO_2, pour une température de 20° C et une pression atmosphérique de 10^5 Pa. **[16]**

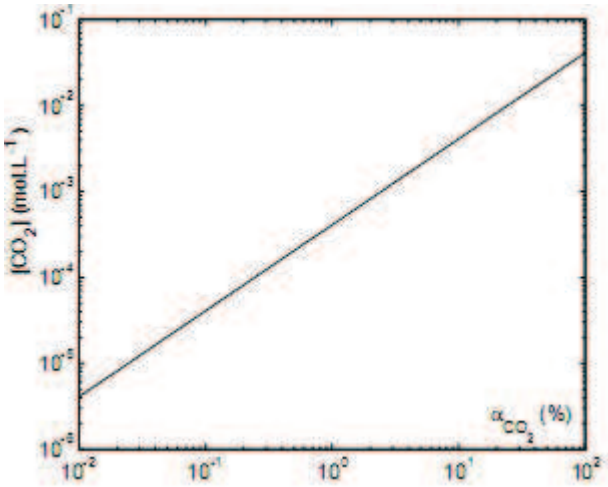

Fig. (IV.2) – concentration en CO_2 dans la phase gazeuse en fonction de la fraction volumique α_{co_2} (à 20° C et sous une pression atmosphérique de 10^5 Pa). [16]

IV.3.1 2.2 Le dioxyde de carbone en solution aqueuse :

Lorsqu'une solution est soumise à une pression partielle de CO_2, le gaz se dissout et s'hydrate sous forme d'acide carbonique H_2CO_3, selon la réaction chimique (IV-2) :

$$CO_2 + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3 \qquad \text{(IV-2)}$$

A l'équilibre, la loi de henry exprime la concentration en H_2CO_3 dans la solution, en fonction de p_{co_2}, la pression partielle en CO_2 :

$$[H_2CO_3] = H_{P_{CO_2}} \quad \text{.....(IV-3)}$$

Avec $p_{co_2} = \alpha_{co_2} p_{atm}$

H est la constante de henry pour le CO_2 (mol.L^{-1}.Pa^{-1}). Elle dépend de la nature de l'électrolyte étudié et de la température. Pour une solution suffisamment diluée, on montre que H diffère peu de la constante de Henry H_0 pour l'eau pure. **[16]**

En fonction de la concentration en CO_2 en phase gazeuse, la loi de henry s'écrite aussi :

$$[H_2CO_3] = K_H [CO_2] \qquad \text{(IV-4)}$$

Avec $K_H = RTH_0$

Dans l'eau, l'acide carbonique H_2CO_3 se comporte comme un diacide faible dont la dissociation a lieu en deux phases, désignées par les réactions.

$$H_2CO_3 + OH^- \leftrightarrow HCO_3^- + H_2O \qquad \text{(IV-5)}$$

$$K_1 = \frac{[HCO_3^-]}{[OH^-][H_2CO_3]} \qquad \text{(IV-6)}$$

$$HCO_3^- + OH^- \leftrightarrow CO_3^{2-} + H_2O \qquad \text{(IV-7)}$$

$$K_2 = \frac{[CO_3^{2-}]}{[OH^-][HCO_3^-]} \qquad \text{(IV-8)}$$

Chacune de ces réactions est caractérisée par une équation d'équilibre (cf. équations (IV.6) et (IV.8)) écrite en considérant que l'activité chimique des ions est égale à leur concentration. Cette hypothèse est acceptable lorsque la solution est suffisamment diluée. « Usdowski » [16] démontre en effet que, pour le système $CO_2 - H_2O$, ceci est le cas pour une pression partielle en CO_2 inférieure à 10^5 Pa. Ainsi, les coefficients d'activité $\gamma_i = a_i / [i]$ (a_i : l'activité chimique, $[i]$: la concentration de l'espèce i) sont proches de l'unité et l'erreur commise en assimilant les activités aux concentrations n'excède pas l'incertitude sur la détermination expérimentale des constantes d'équilibre. **[16]**

A chacune de ces deux réactions de dissociation (IV.5) et (IV.7) correspond une acidité de l'acide carbonique H_2CO_3 : l'ion bicarbonate HCO_3^- et l'ion carbonate CO_3^{2-}.A l'équilibre, ces deux acidités ont des domaines de prédominance disjoints comme l'illustre la figure (IV.3) : à 20° C, pour un pH supérieur à 10,3 c'est l'ion CO_3^{2-} qui prédomine et pour un pH compris entre 6,3 et 10,3 c'est l'ion HCO_3^-. Au cours de la carbonatation, le pH de la solution interstitielle du béton passe d'une valeur très basique, proche de 13, à une valeur inférieur à 9. L'existence de domaines de prédominance disjoints a donc un impact important sur le processus de carbonatation.

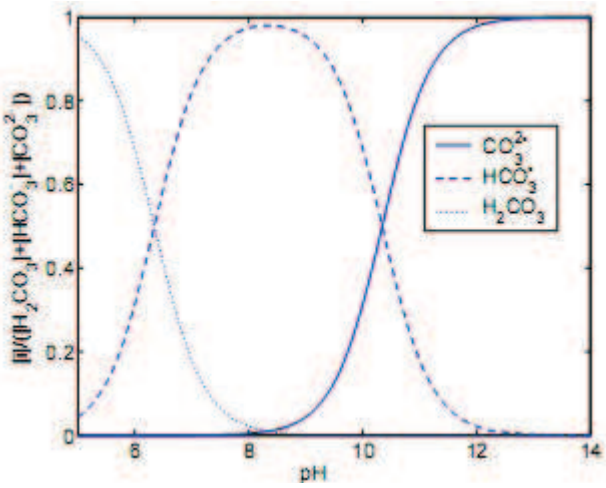

Fig. (IV.3) – fractions molaires des H_2CO_3, HCO_3^- et CO_3^{2-} en fonction du pH (à 20°Cet à l'équilibre). [16]

La réaction (IV.9) traduit l'autoprotolyse de l'eau et l'équation ((IV.10)) est l'équilibre associé.

$$H_2O \leftrightarrow OH^- + H^+ \qquad \text{(IV-9)}$$

$$K_E = [OH^-][H^+] \qquad \text{(IV-10)}$$

IV.3.1.3.Données physico-chimiques générales sur le dioxyde de carbone :

Le tableau (IV.2) rassemble quelques données sur le CO_2 à l'état gazeux et à l'état absorbé dans une solution aqueuse. On retiendra que les coefficients de diffusion en phase aqueuse du dioxyde de carbone ont un ordre de grandeur 10^4 fois plus faible qu'en phase gazeuse. **[16]**

Tableau (IV.2) – caractéristiques du dioxyde de carbone en phase gazeuse et en phase liquide. **[15]**

Diamètre des molécule de CO_2 à l'état gazeux (nm)	0,426
Libre parcours moyen des molécules de CO_2 gazeux à 0°C (nm)	63
Viscosité dynamique du CO_2 gazeux à 20°C (Pa.s)	1.48
Coeff. De diffusion du CO_2 gazeux à 20°C ($m^2.s^{-1}$)	$1,6.10^{-6}$
Coeff. De diffusion du H_2CO_3 à 20°C ($m^2.s^{-1}$)	$7,2.10^{-10}$
Coeff. De diffusion du HCO_3^- à 20°C ($m^2.s^{-1}$)	$11,8.10^{-10}$
Coeff. De diffusion du CO_3^{2-} à 20°C ($m^2.s^{-1}$)	$9,6.10^{-10}$

IV.3.1.4. La carbonatation des hydrates du béton :

Le CO_2, issu de l'environnement, pénètre sous forme gazeuse dans le milieu poreux qu'est le béton, se dissout dans la solution interstitielle des pores de la matrice cimentaire et réagit sur certains composés du béton pour former des carbonates de calcium. Les mécanismes

prépondérants sont ceux de la carbonatation de la portlandite $Ca(OH)_2$ et des silicates de calcium hydraté $C-S-H$.**[15]**

IV.3.1.4.1 Carbonatation de la portlandite $Ca(OH)_2$:

Les réactions d'hydratation des phases du clinker C_2S (la bélite) conduisent à la formation de portlandite $Ca(OH)_2$ **[15]** qui se cristallise sous formes de plaquettes hexagonales empilées dans les pores les plus larges laissés entre les grains de ciment en cours d'hydratation. Les cristaux de portlandite forment ainsi des agglomérats dont la taille, d'une dizaine de micros, augmente avec le rapport E/C. Chaussadent et al. [16] observent, au microscope électrique à balayage sur des fractures fraîche de pâtes de ciment, l'évolution de la taille moyenne des cristaux de portlandite en fonction du E/C. Les résultats sont consignés dans le Tableau (IV.3). **[16]**

Tableau (IV.3) – **Taille moyenne des amas de cristaux de portlandite en fonction de l'age (conservation endogène) et du rapport E/C de pâtes de ciment. [16]**

	Taille moyenne des cristaux de $Ca(OH)_2$ (μm)	
E/C	1 mois d'age	2 mois d'âge
0,25	4 - 10	8 - 15
0,35	10 - 20	10 - 30
0,45	10 - 30	20 - 40
0,60	80 - 100	100 - 120

Le passage en solution du CO_2 suivant les réactions (IV.2), (IV.5) et (IV.7) entraîne une baisse de la concentration en ions OH^- dans la solution interstitielle des pores, ce qui réduit le PH . Pour rétablir la basicité du milieu, la portlandite se dissout suivant la Réaction(IV.11).

$$Ca(OH)_2 \leftrightarrow Ca^{2+} + 2OH^- \qquad \text{(IV-11)}$$

$$K_p = [Ca^{2+}][OH^-]^2 \qquad \text{(IV-12)}$$

Les ions calcium ainsi libérés précipitent avec les ions carbonates suivant la réaction (IV-13) pour former du carbonate de calcium $CaCO_3$.

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \leftrightarrow CaCO_3 \qquad \text{(IV-13)}$$

$$K_c = [Ca^{2+}][CO_3^{2-}] \qquad \text{(IV-14)}$$

La figure (IV.4) illustre l'intervention combinée des trois phases : gazeuse, aqueuse et solide au cours du processus de carbonatation de la portlandite.

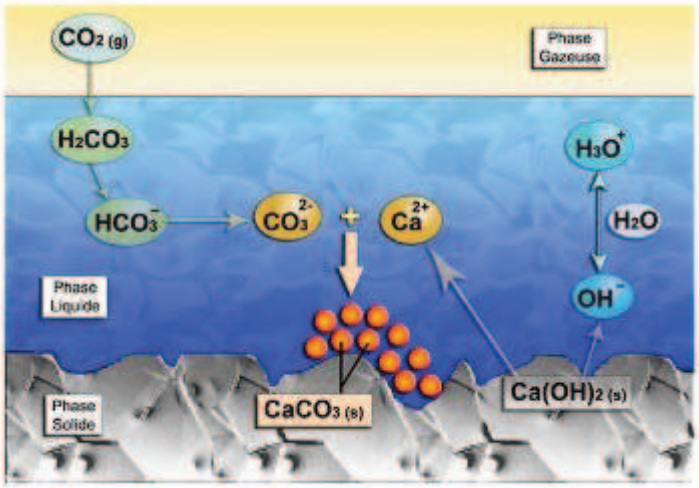

Fig. (IV.4)- Mécanisme de carbonatation de $Ca(OH)_2$ **[16]**

Dans le cadre d'une approche simplifiée, le mécanisme réactionnel de carbonatation de $Ca(OH)_2$ est synthétisé par la réaction chimique hétérogène suivante : **[15]**

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \rightarrow CaCO_3 + H_2O \qquad \text{(IV-15)}$$

L'inconvénient de cette formulation est qu'elle masque toutes les étapes intermédiaires du mécanisme. En revanche, elle a l'avantage d'indiquer que la carbonatation de la portlandite s'accompagne globalement d'une libération d'eau de structure. **[16]**

Les ions Ca^{2+} peuvent également réagir avec les ions HCO_3^- pour former des complexes tels que $CaHCO_3^+$ et $Ca(HCO_3)_2$, notamment lorsque les ions HCO_3^- sont prépondérants (pour un pH inférieur à 10,3 (cf. figure (IV.4)). Cowie et Glasser indiquent cependant que ces composés sont minoritaires dans les matériaux cimentaires Carbonés car, contrairement au carbonate de calcium $CaCO_3$, le bicarbonate de calcium $Ca(HCO_3)_2$ n'existe pas à l'état solide et ne peut pas précipiter. C'est pourquoi, on considère, dans la suite, que les ions Ca^{2+} précipitent uniquement sous forme de $CaCO_3$.**[16]**

Il est possible de calculer la concentration en CO_2 en phase gazeuse pour laquelle le système $Ca(OH)_2$ - CO_2 - $CaCO_3$ - H_2O est à l'équilibre : il faut alors associer aux équilibres (IV-4), (IV-6), et (IV-8) de dissolution- dissociation du CO_2 en phase aqueuse les équilibres (IV-12) de dissolution de $Ca(OH)_2$ et (IV-14) de précipitation des carbonates de calcium. Il vient :

$$[CO_2] = \frac{K_C}{K_H K_1 K_2 K_P} \qquad \text{(IV-16)}$$

A 20° C, on calcule $[CO_2] = 3.10^{-15}\, mol.L^{-1}$ (soit α_{co_2} =7,3.10^{-14} à la pression atmosphérique). Cette valeur est largement inférieure aux concentrations minimales qui sont observables dans l'atmosphère. De ce fait, les teneurs normales en CO_2 entraînent inévitablement la carbonatation de la portlandite.

Le pH de la solution interstitielle, qui correspond à l'équilibre du système $Ca(OH)_2$ - CO_2 - $CaCO_3$ - H_2O, est calculé en arrangeant les équations (IV-4), (IV-6), (IV-8), (IV-10), (IV-12) et (IV-16) avec la condition d'électro-neutralité de la solution aqueuse, c'est-à-dire :

$$2[Ca^{2+}] + [H^+] \leftrightarrow [HCO_3^-] + 2[CO_3^{2-}] + [OH^-] \qquad \text{(IV-17)}$$

Ce qui donne une équation dont la seule inconnue est la concentration en ions OH^- :

$$2\frac{k_p}{\left[OH^-\right]^2}+\frac{K_E}{\left[OH^-\right]}=\frac{K_C}{K_2K_P}\left[OH^-\right]+2\frac{K_C}{K_P}\left[OH^-\right]^2+\left[OH^-\right] \qquad \text{(IV-18)}$$

Une résolution numérique indique que la solution de cette équation correspond à un pH de 12,4. La portlandite opère donc un effet tampon en maintenant le pH autour de cette valeur. Alors que cet hydrate n'a que peu d'importance du point de vue de la résistance mécanique, cette caractéristique chimique lui confère un rôle fondamental dans le maintien de la durabilité des bétons, cependant, le pH d'un matériau cimentaire est généralement supérieur à 12,4. On explique ce phénomène par la présence, même mineure, dans la solution interstitielle d'ions OH^- provenant des oxydes alcalins Na_2O et K_2O issus du ciment éventuellement des additions minérales. **[16]**

IV.3.1.4.2. Carbonatation des silicates de calcium hydratés $C-S-H$:

Les $C-S-H$ proviennent, comme la portlandite, de l'hydratation des deux phases silicatées du clinker : C_3S et C_2S. La carbonatation des $C-S-H$ donne naissance à des carbonates de calcium, à un matériau siliceux hydraté (qualifié de gel de silice) et éventuellement à de l'eau libre. Cette réaction est considérée sous une forme topochimique (sans transport de matière ou phénomènes de dissolution-précipitation) entre phases hétérogènes :

$$C_xS_yH_z + xH_2CO_3 \rightarrow xCaCO_3 + ySiO_2.tH_2O + (x-t+z)H_2O \qquad \text{(IV-19)}$$

Dunster propose un mécanisme de carbonatation des $C-S-H$. En suivant cette réaction par triméthylsilylation et par chromatographie en phase gazeuse, il met en évidence le passage par des intermédiaires de haut poids moléculaire dans la formation du matériau siliceux amorphe. Le CO_2 dissout en solution arrache des ions calcium aux $C-S-H$ en libérant des anions silicates, les ions calcium précipitent avec les ions carbonates, tandis que les anions silicates peuvent se condenser avec d'autres silicates dans les $C-S-H$. Les espèces produites sont des intermédiaires qui peuvent à leur tour se condenser sur d'autres anions silicates pour finalement conduire à la formation de chaînes silicatées de plus en plus longues et de plus en plus pauvres en calcium, au point de mener à un matériau amorphe qui s'apparente à un gel de silice. Dunnster conclut que la carbonatation des $C-S-H$ correspond à un processus de

polymérisation des silicates formant des espèces qui ne sont plus représentatives des $C-S-H$ initiaux.

Grouves et al. Étudient également le mécanisme de carbonatation des $C-S-H$ présents dans des pâtes hydratées de C_3S. Les techniques utilisées sont la microscopie électronique à transmission, la diffraction X et l'analyse thermogravimétrique. Ils Indiquent encore que le $C-S-H$ externe Carbonaté garde une structure fibreuse, mais ces fibres sont constituées de silice microporeuse, noyées dans des microcristaux de carbonates de calcium. Le $C-S-H$ interne, quant à lui, devient inhomogène et se transforme en un gel microporeux très riche en silice. Donc Grouves et al. Suivent plus spécifiquement la carbonatation par résonance magnétique nucléaire. Ils constatent que les $C-S-H$ évoluent progressivement au cours de leur carbonatation avec un retrait du calcium et une polymérisation des silicates, jusqu'à donner naissance à un gel de $C-S-H$ pauvre en calcium qui se transforme, dans les derniers stades de la réaction, en un gel de silice. Ces résultats corroborent ceux de Dunster, mais également les nombreux travaux qui ont mis en évidence la réduction du rapport molaire $C/S\,(CaO/SiO_2)$ des $C-S-H$ par analyse X (cf. par exemple [koboyashi et al.,1994]).**[16]**

Grouves et al. mettent l'accent sur le fait que leurs observations proviennent de carbonatation avec du CO_2 pur, ce qui accélère considérablement la réaction de carbonatation par rapport à ce qu'elle aurait été en milieu atmosphérique. Leur principale remarque est qu'il faut rester très pondéré en ce qui concerne l'interprétation des résultats portant sur des tests de carbonatation accélérée. Sous carbonatation atmosphérique, ils observent en effet que les $C-S-H$ continuent à se polymériser à un degré élevé, mais sans formation de gel de silice. Certes, une attention particulière doit être portée à l'exploitation de résultats obtenus dans des ambiances de CO_2 pur comme modèle pour les pâtes carbonatées à l'air ; cependant, il faut souligner que les résultats obtenus par Grouves et al. Correspondent sans doute à une carbonatation naturelle partielle, puisque celle-ci n'a duré que deux mois et qu'elle a porté sur une tranche de pâte de C_3S de 0,5 mm d'épaisseur, tandis que Dunster a pu identifier par triméthylsilylation en carbonatation naturelle du gel de silice sur un pâte de ciment broyée, de rapport E/C équivalent, après trois mois de carbonatation naturelle. Il est donc difficile de trancher sur l'existence d'une différence de structure des $C-S-H$ selon les deux modes opératoires : carbonatation accélérée carbonatation naturelle.

Ces $C-S-H$, qui représentent la pH ase hydratée la plus importante dans la pâte de ciment, confèrent au matériau béton l'essentiel de sa résistance mécanique. En revanche, ils ont un pouvoir tampon sur le pH de la solution interstitielle plus faible que la portlandite. Par conséquent, leur prise en compte dans le mécanisme de carbonatation n'est pas indisponible. Néanmoins, ces hydrates induisent des modifications importantes de la microstructure qui doivent, quant à elles, être prises en compte. De plus, le fait que les $C-S-H$ consomment du CO_2 peut interférer avec la carbonatation de la portlandite. Ce point doit également être intègre dans les modèles. **[16]**

IV.3.1.4.3.Carbonatation des autres constituants des matériaux cimentaires :

Le C_3A (l'aluminate tricalcique) s'hydrate avec l'eau pour former des aluminates de calcium hydratés. L'hydratation du C_3A donne également de l'ettringite (le trisulfoaluminate de calcium) et du monosulfoaluminate de calcium qui sont créés à partir des sulfates présents dans le ciment.
Les aluminates hydratés sont sensibles à la carbonatation. Des études (notamment [Sauman et Lach,1972]) indiquent qu'ils se carbonatent en produisant des carbonates de calcium, des hydroxydes d'aluminium et de l'eau.

La carbonatation de l'ettringite et du monosulfoaluminate de calcium produit du gypse qui est très soluble dans l'eau et très réactif. Elle peut donc conduire à des réactions secondaires [Grandet,1975] [Nshikawa et al.,1992][Xiantuo et al.,1994][Zhou et glasser,2000] [Kouznetsova et al]. Ainsi, si les produits de carbonatation se trouvent en présence de portlandite et d'eau, il peut se reformer de l'ettringite à partir des aluminates et du gypse libérés par la carbonatation.

Ces hydrates sont présents en petite quantité dans les matériaux cimentaires usuels à teneurs en sulfates et/ou en aluminates modérées (faible teneur en C_3A pour les ciments prise mer (PM) et/ou eaux sulfatées (ES)). De plus, ils se carbonatent très vite, c'est pourquoi, leur carbonatation est généralement négligée dans la modélisation.

Il en est de même pour les alcaline Na_2O et K_2O contenus dans le ciment ou les additions minérales. En fait, tout se passe comme si la modélisation pouvait débuter quand la phase

préliminaire de carbonatation de ces éléments est achevée. C'est l'approche que nous retiendrons dans la modélisation. **[16]**

IV.3.2. ACTION DES SULFATES :

Les eaux souterraines et les eaux d'infiltration venant en contact avec les sols sulfatiques se chargent en ions SO_4^{2-} dont la solubilité est donnée, à titre indicatif, dans le tableau (IV-4) il faut noter qu'elle dépend de la température et de la présence éventuelle d'autres sels. C'est ainsi que la solubilité du gypse dans une eau chargée en chlorure de sodium peut être très fortement accrue. Par ailleurs, le gypse et l'anhydrite montrent un maximum de solubilité vers 40°C. les fortes teneurs en sulfates des eaux souterraines sont dues essentiellement aux sulfates alcalins et au sulfates magnésium.**[17]**

Tableau (IV-4) : solubilité de différents sulfates dans l'eau, à 20°C.

Sulfate	Solubilité (g/l)
K_2SO_4	111
Na_2SO_4	58
Na_2SO_4, $10H_2O$	194
$MgSO_4$, $6H_2O$	440
$FeSO_4$, $7H_2O$	260
$CaSO_4$	2,1
$CaSO_4$, $2H_2O$	1,2

IV.3.2.1.Processus d'attaque par les sulfates seuls :

La dégradation des bétons par les sulfates est due principalement à des phénomènes d'expansion en relation avec la cristallisation d'ettringite, dite ettringite «secondaire». La formation de cette ettringite expansive est à distinguer de l'ettringite «primaire» obtenue aux premiers stades de l'hydratation des ciments portland par réaction du gypse, car cette ettringite primaire n'est jamais expansive.

Schématiquement, la formation de l'ettringite en deux étapes est résumée ci-après :

a) formation de gypse dit «secondaire» par opposition au gypse «primaire» ajouté au ciment comme régulateur de prise. La formation du gypse secondaire résulte d'une réaction de substitution entre la portlandite et le sulfate. Par exemple, avec le sulfate de sodium :

$$Ca(OH)_2 + NaSO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4.2H_2O + 2NaOH \qquad \text{(IV-20)}$$

Si la teneur en sulfate est élevée (supérieure à 1000mg/l) et si la concentration locale en ions Ca^{2+} et SO_4^{2-} dans la phase liquide interstitielle du béton excède le produit de solubilité du gypse, ce dernier précipite. Le volume du solide précipité représente un peu plus du double de celui des produits de départ et une expansion peut se manifester. Mais, dans la majorité des cas, cette réaction reste limitée dans la mesure où le gypse se forme selon un processus de dissolution et de cristallisation dans les espaces libres de la pâte de ciment durcie. **.[17]**

b) réactions entre le gypse secondaire et les aluminates de calcium du ciment formant l'ettringite. Plusieurs scénarios sont envisageables :

- soit à partir de reliquats de C_3A anhydre :

$$C_3A + 3CaSO_4.H_2O + 24 - 26H_2O \rightarrow C_3A.3CaSO_4.H_{30-32} \qquad \text{(IV-21)}$$

- soit à partir de l'aluminate tétracalcique hydraté C_4AH_{13} ou monosulfoaluminate de calcium $C_3A.CaSO_4.H_{12}$

$$C_3ACaSO_4.18H_2O + 2Ca(OH)_2 + 2SO_4 + 12H_2O \rightarrow C_3A.3CaSO_4.32H_2O \qquad \text{(IV-22)}$$

IV.3.4. ACTION DES CHLORURES :

Substitution $Mg^{2+} \rightarrow Ca^{2+}$

a) $MgCl_2 + Ca(OH) \rightarrow CaCl_2 + Mg(OH)_2$

soluble précipité

b) $CaCl_2 + C_3A + 10H_2O \rightarrow C_3A.3CaCl_2.10H_2O$ (sel de friedel)

Monochloroaluminate, instable donne en présence de sulfate $C_3A.3CaSO_4.32H_2O$

Gonflement **[23]**

IV.4 – CORROSION DES ARMATURES DANS LE BETON ARME

IV.4.1 – CONTEXTE DE LA DEGRADATION DES ARMATURES

Le béton armé, comme matériau de construction, associe le béton avec des armatures métalliques. Ainsi, le béton d'enrobage fournit une barrière physique et une protection chimique due à son alcalinité **[18] [19]**. A la surface d'un acier enrobé par la pâte de ciment hydraté, il se forme une fine couche de produits adhérents qui protègent l'acier.

Cette protection est efficace pour une forte valeur du pH (pH >13,0).

La rupture du micro-film protecteur est due à la présence des ions chlorures ou à la carbonatation du béton. L'enrobage apporte ainsi une protection physique aux aciers quand il a une certaine imperméabilité.

D'une façon générale, le mécanisme de corrosion se décompose en deux phases distinctes. La première est l'initiation de la corrosion (les chlorures entrent dans le béton et la teneur de cet agent dépasse un seuil critique, ou la profondeur de carbonatation dépasse l'épaisseur de l'enrobage). La deuxième étape consiste en la croissance de la corrosion des armatures. La Figure (V-5) illustre les étapes de la corrosion de l'armature. **[20]**

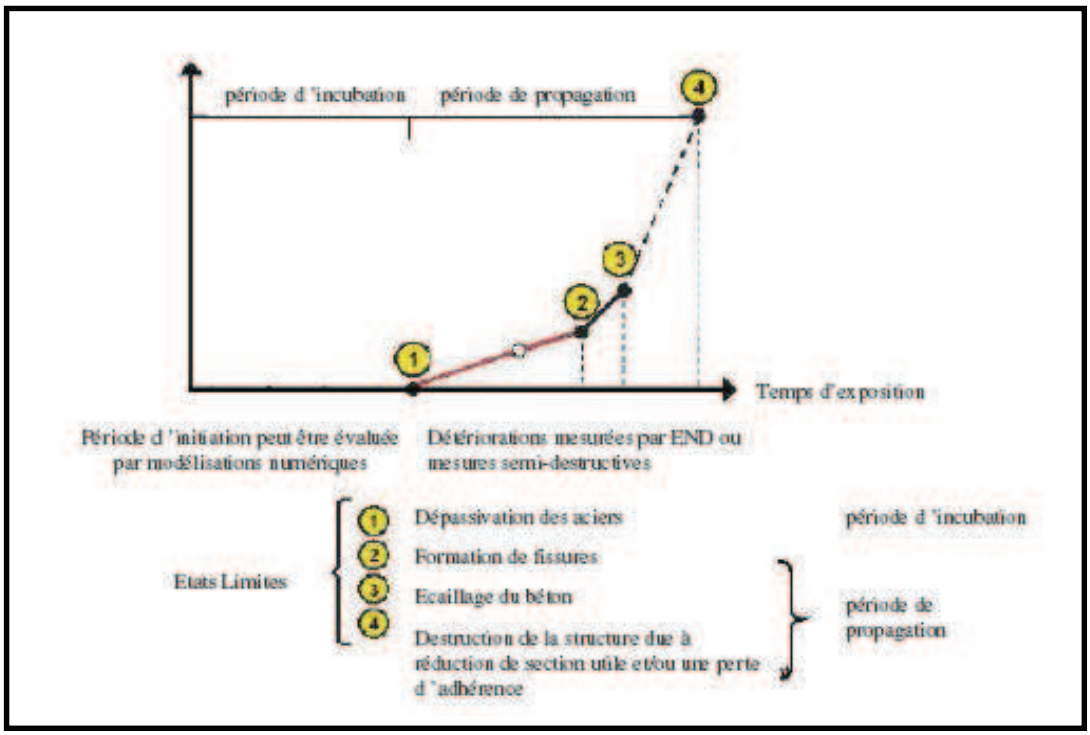

Fig.(*IV*.5) –Représentation simplifiée de l'évolution de la corrosion des armatures dans le béton armé **[21]**

IV.4.1.1 – L'interface entre l'acier et le béton sain

L'exposition des armatures à l'air permet que celles-ci soient recouvertes d'une couche naturelle de rouille. Vue la porosité élevée de cette rouille, l'eau de gâchage du béton frais pénètre par capillarité à travers ses pores et des cristaux de ferrite de calcium hydraté peuvent être formés ($4CaO\ FeO_3\ 13\ H_2O$) **[20]**

L'hydratation du ciment produit également l'hydroxyde de calcium $[Ca(OH)_2]$ qui assure un pH élevé à la solution interstitielle. D'une façon générale, les constituants à base d'alcalins du ciment, notamment de calcium et, dans une échelle moins importante de potassium et de sodium, contribuent à la réserve alcaline du béton [Almusallan, 2001] et [Ishida, 2000].

Dans la zone de contact du béton et de la couche de rouille formée pendant le stockage, l'hydratation du béton est perturbée. Ceci est vérifié par un affaiblissement de la résistance mécanique de cette pâte [Raharinaivo, 1998]. Ainsi, entre le béton sain et l'acier, des couches superposées peuvent être identifiées. La première, est une couche non influencée par les

aciers; une zone intermédiaire entre le béton sain et la couche la plus proche du la deuxième, qui est métal assure une transition entre les propriétés mécaniques et la microstructure. Enfin, la troisième, fortement adhérente à l'acier et étanche, est responsable de la protection de l'acier ou, en d'autres termes, de sa passivation. Plus exactement, sous la rouille, l'armature est recouverte d'une fine couche protectrice de produits blancs, à base de ferrite et de hydroxyde de calcium **[20].**

IV. 4.2. INFLUENCE DES CHLORURES SUR LE BETON ARME

IV 4.2.1. Ions de chlorures dans les matériaux cimentaires

Les chlorures peuvent être rencontrés dans un milieu poreux cimentaire sous plusieurs formes : Chlorures libres en solution, physiquement liés à la matrice, chimiquement liés et éventuellement cristallisés.

a- Chlorures libres

Ces ions sont capables de se déplacer danse la phase liquide sous gradient de concentration, tout comme la vapeur dans l'air. Leur mouvement dans un milieu poreux non saturé sera intimement lié à celui de la phase liquide. En particulier, la disparition de la continuité de la phase liquide (annulation de la perméabilité au liquide), sera également un seuil de transfert pour les ions qui resteront prisonniers dans les îlots. Les chlorures libres sont considérés comme les principaux acteurs dans les processus de corrosion des armatures. [21][22]

b- Chlorures fixés

Plusieurs facteurs ont de l'influence sur la quantité de chlorures fixés :

- La concentration en chlorures libres : plus la concentration en chlorures dans la solution des pores est élevée, plus la fixation des chlorures est importante.
- La quantité de liant : la quantité de chlorures fixée est une fonction linéaire de la quantité de liant.

- La surface spécifique : plus la surface spécifique du ciment est grande, plus le nombre de sites de fixation est grand.
- La température : l'élévation en température tend à diminuer la fixation des chlorures.
- La présence d'autres espèces ioniques : particulièrement les hydroxydes et les alcalins. L'augmentation du pH diminue la fixation des chlorures. De plus, la quantité de chlorures fixée est différente selon le type des cations associés aux chlorures.

Deux types de fixation des chlorures peuvent être distingués :

- Les chlorures adsorbés sur les gels de C-S-H.
- Les chlorures fixés par les aluminates.[21][22]

b-1- Chlorures et gels de C-S-H :

Les gels de C-S-H sont le siège d'une adsorption physico-chimique des chlorures ainsi que d'un piégeage au sein des feuillets. L'adsorption possédant une faible énergie d'activation et une faible chaleur de réaction, elle est très facilement réversible. Les chlorures intercalés dans les feuillets sont probablement beaucoup plus fermement liés.[22]

b-2-Chlorures et aluminates :

L'hypothèse la plus plausible est une combinaison des chlorures avec les aluminates de calcium de la pâte de ciment durcie. Le terme généralement usité de «chimisorption » est quelques peu abusif pour caractériser ce phénomène. En effet, il ne s'agit pas d'une sorption au sens strict du terme, mais simplement d'un équilibre de précipitation, en compétition avec ceux des autres hydrates de la pâte de ciment. Ce phénomène est a priori tout aussi réversible que la sorption proprement dite sur les gels, puisqu'une diminution de la concentration en chlorures entraînera un décalage de l'équilibre dans le sens de la disparition du précipité [22].

b-3- Chlorures cristallisés :

Localement dans le milieu poreux, la concentration en chlorures de la solution interstitielle peut atteindre la limite de solubilité de cristaux tels que NaCl ou $CaCl_2$. Il y a donc possibilité de précipitation de sels dans le réseau. On peut considérer ces chlorures comme « fixés », à condition qu'on puisse effectivement les considérer comme immobiles et liés au squelette solide[22]

IV 4.2.2 La corrosion induite par la présence des ions chlorure – aspect physico-chimique

Tant que le microfilm protecteur dû au ciment sain existe, l'acier dans le béton reste intact. Cependant, Les ions chlorure Solubles en eau. Une fois dissous dans l'eau, les ions pénètrent dans l'ouvrage par le béton de l'enrobage.

La nature du produit formé à la surface de l'acier est modifiée par les chlorures. Il apparaît une réaction de dissolution (appelée anodique ou d'oxydation) dans laquelle les ions ferreux dissous sont formés (anode). Les électrons libres réagissent à la surface de la barre d'acier dans la zone dite cathode (Figure (IV.6)). Ces électrons réduisent l'oxygène gazeux dissous dans l'eau, de façon à générer les ions hydroxyles. Les deux réactions élémentaires d'oxydation et de réduction sont simultanées.

$$Fe(solide) \Rightarrow Fe^{2+}(aqueuse) + 2e^{-}(anode) \qquad \text{(IV-23)}$$

$$O_2(aqueuse) + 2H_2O + 4e^{-} \Rightarrow 4OH^{-}(aqueuse)(catode) \qquad \text{(IV-24)}$$

Dans les cas les plus courants, les ions ferreux dissous se combinent avec les ions hydroxyles de façon à former les hydroxydes.

$$Fe^{2+}(aqueuse) + 2OH^{-}(aqueuse) \Rightarrow 2Fe(OH)_2(anode) \qquad \text{(IV-25)}$$

Cet hydroxyde $[Fe(OH)_2]$ peut continuer à s'oxyder et former de la rouille anhydre $[Fe_2O_3]$ ou de la rouille hydratée $[Fe(OH)_3]$ et du $FeOOH$, sachant que :

$$Fe_2O_3 + H_2O \Rightarrow 2[FeOOH] \qquad \text{(IV-26)}$$

$$2Fe(OH)_3 \Rightarrow Fe_2O_3 + 3H_2O \qquad \text{(IV-27)}$$

En l'absence de chlorure, les produits formés à la surface de l'acier protègent celui-ci : c'est la passivation.

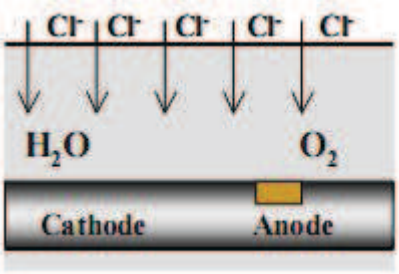

Figure (VI.6) -Représentation simplifiée du processus de corrosion par chlorures dans les armatures. **[20]**

Si des ions chlorures arrivent au contact de l'acier et que leur teneur atteint un seuil critique la couche n'est plus protectrice et la corrosion peut commencer. En conséquence, les ions chlorures pénétrés dans le béton contribuent à l'activation de la surface des armatures de façon à former l'anode, la surface encore passivée fonctionnant comme cathode.

D'après certains auteurs qui ne tiennent pas compte de la rouille verte, les réactions dans l'anode se déroulent comme suit :

$$Fe^{2+} + Cl^- + 2H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + 2H^+ + Cl^- \qquad \text{(IV-28)}$$

$$4Fe(OH)_2 + 2H_2O + O_2 \rightarrow 4Fe(OH)_3 \qquad \text{(IV-29)}$$

On note, aussi, dans les réactions liées à la corrosion que les ions chlore ne sont pas présents dans la rouille, même si on les trouve dans les étapes intermédiaires de la réaction.
On remarque encore que la porosité de la pâte de ciment est un facteur de grande influence dans la corrosion, puisque le pont entre l'anode et la cathode se fait à partir de la solution interstitielle d'une part et de l'armature, d'autre part. Les principaux paramètres qui ont une influence sur la résistivité électrique du béton sont : l'humidité, le système poreux de la pâte de béton durci et la composition ionique de la solution interstitielle.

IV-4.2.3 – La pénétration des ions chlorures dans le béton arme

Le phénomène de transport dans le béton se montre très complexe, parce que le béton est un en eau variable. De ce fait, les mécanismes de matériau hétérogène, poreux et avec une teneur transport dans le béton font intervenir des forces physiques (diffusion, absorption capillaire, etc.) et, de tension superficielle (électro-osmose, etc.) d'une part, et les réactions chimiques d'autre part.

Le transport des ions chlorures dissous dans la solution interstitielle peut se faire, par des mouvements de l'eau (absorption capillaire) ou par diffusion (Figure (IV.7)). Dans le premier cas, un gradient d'humidité se forme dans le béton et les chlorures sont entraînés par l'eau (convexion). Dans la deuxième situation, les ions se déplacent dans l'eau due à une différence de gradient de concentration. Stewart affirme que la pénétration de chlorures est plus fortement affectée par la diffusion, et il utilise le cas particulier de la loi de Fick pour décrire la diffusion des chlorures à l'intérieur du béton.**[20]**

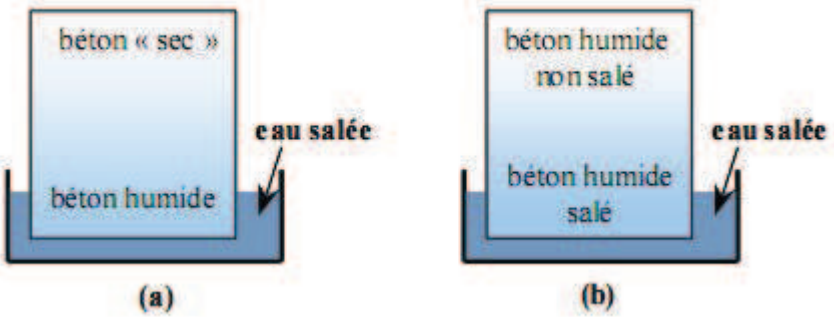

Figure (IV.7)–Représentations schématiques des transports des chlorures dissous dans le béton (a) absorption capillaire (b) diffusion

IV-4.2.4 – La diffusion des ions chlorure dans le liquide interstitiel

La diffusion des ions chlorure dans la phase liquide à l'intérieur du béton a été modélisée selon priori que le béton est saturé et un cas particulier de la deuxième loi de Fick. Cette loi suppose, a que le flux des ions est dans un régime stationnaire ou non (Figure (IV.8)). De plus, on considère un coefficient de diffusion constant (indépendant du temps, de la localité et de la concentration initiale de chlorures) et une teneur en chlorures initiale nulle en tout point du béton.

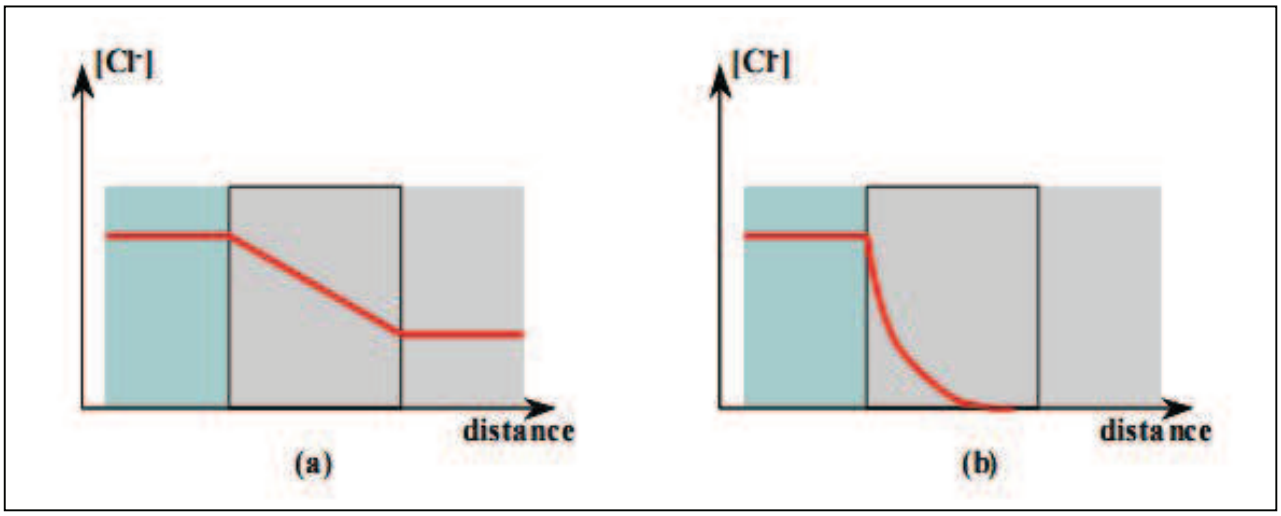

Figure (IV.8) – Profils de teneur en chlorure pénétrant dans une plaque de béton, en régime (a) stationnaire et (b) non stationnaire

En tenant compte de la loi de conservation de masse, on obtient :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \qquad \text{(IV-30)}$$

Où D est le coefficient de diffusion des ions chlorure dans le matériau. Une solution pour cette équation différentielle considérant un milieu isotrope semi-infini est (Figure (IV.9))

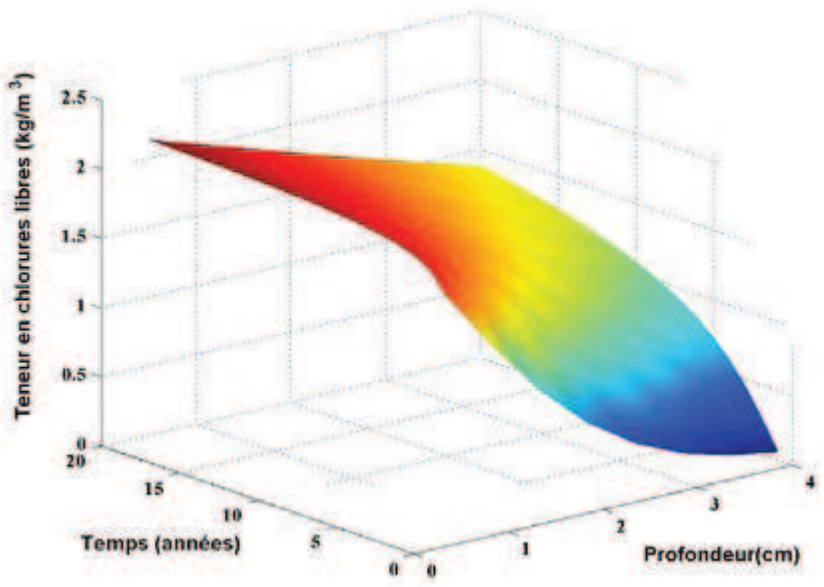

Figure (IV.9) – Surface de simulation de la teneur en chlorures à la profondeur x et au temps t (Coefficient de diffusion uniforme) **[20]**

IV-4.2.5 - Seuil critique de la contamination par chlorures

Le seuil critique est la teneur en chlorure au-delà de laquelle la corrosion des armatures est importante.

Selon la synthèse proposée par Glass, les seuils critiques des chlorures peuvent être établis par la teneur totale en ions chlorures, la concentration en chlorures libres contenue dans la solution interstitielle du béton et le rapport des ions chlorure libre et des ions hydroxyde $[Cl^-][OH^-]$

La teneur de chlorures totaux (chlorures libres + chlorures liés) est la valeur la plus courante et, aussi dans de nombreuses recommandations, elle est considérée comme une valeur représentative de l'initiation de la corrosion. Cette valeur est exprimée par rapport au poids du ciment avec une large plage de valeurs attribuées dans la littérature (0,17% à 2,5%) Selon Glass, son utilisation se justifie car les ions chlorures liés forment une réserve d'ions capable de contribuer au mécanisme de corrosion localisé. Ils représentent de cette façon, un risque à l'intégrité de la structure.

La grande dispersion observée dans les valeurs représentatives de la teneur critique en chlorures peut être attribuée à la difficulté de définir avec précision le début de la corrosion. En outre, de nombreux paramètres sont en jeu, par exemple, le rapport eau/ciment (dosage en ciment), la nature du ciment (fixation de chlorures, etc.) et celle des additifs éventuels (cendres, etc.), la température moyenne, l'humidité du béton et l'aération interne.
Parmi tous ces paramètres l'état de l'interface béton-acier a aussi un rôle non négligeable dans le processus de corrosion. Il semble que le glissement acier-béton à l'interface, à partir d'un certain niveau de chargement, peut provoquer une perte de cohésion acier-béton qui rend possible le démarrage de la corrosion si la concentration en chlorures le permet. [20]

IV.4.3. CORROSION DES ARMATEURS LIEE A LA CARBONATATION :

La carbonatation de la matrice cimentaire diminue le *pH* de la phase des pores du béton qui n'offre alors plus de protection à l'acier.

IV.4.3.1 Quelque généralités sur la corrosion électrolytique :

Si on immerge un métal dans un électrolyte, des ions du métal passent en solution.
Deux métaux différents immergés dans la même solution auront un potentiel différent et lorsqu'on relie les métaux par un conducteur, des électrons vont se déplacer du métal qui a le potentiel le plus bas (l'anode) vers le potentiel le plus élevé (la cathode). On réalise ainsi une pile électrolytique.

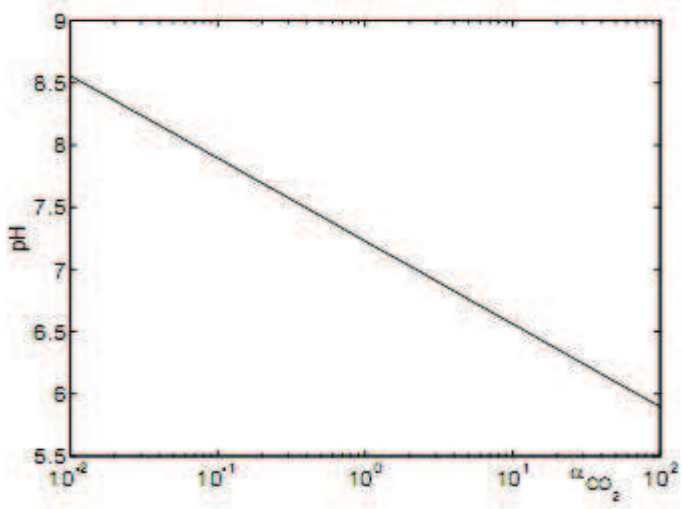

Fig. (IV.10) - pH **à l'équilibre du système** $CaCO_3$ **-** CO_2 **-** H_2O **en fonction de la fraction volumique en** CO_2 **.**

Un différent de potentiel peut également apparaître si un seul métal est utilisé et lorsque les deux électrodes sont placées dans des électrolytes différents. C'est ce qui se passe avec les armatures dans le béton armé : l'électrolyte se trouve dans les pores du béton et sa composition peut varier le long de l'armature, ce qui entraîne l'apparition de piles entre des points de potentiel différent.

Les réactions qui peuvent se produire sont les suivantes :

1) La dissolution du fer à l'anode : $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$

2) La décomposition de l'eau à la cathode : $H_2O + \frac{1}{2}O_2 + e^{-} \rightarrow 2OH^{-}$

3) La migration des ions OH^{-} vers l'anode : $Fe^{2+} + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2$

Une représentation schématique de ces réactions est donnée sur la figure (IV.11)

L'hydroxyde de fer (II) $Fe(OH)_2$ n'est pas stable en solution aqueuse aérée : en présence d'oxygène, il se transforme en hydroxyde de fer (III) $Fe(OH)_3$, puis en oxydes de fer (cf. figure (IV.5)). Selon les conditions, la composition des produits d'oxydation est variable et peut être représentée par la formule suivante : $(FeO)_x(Fe_2O_3)_y(H_2O)_Z$.[17]

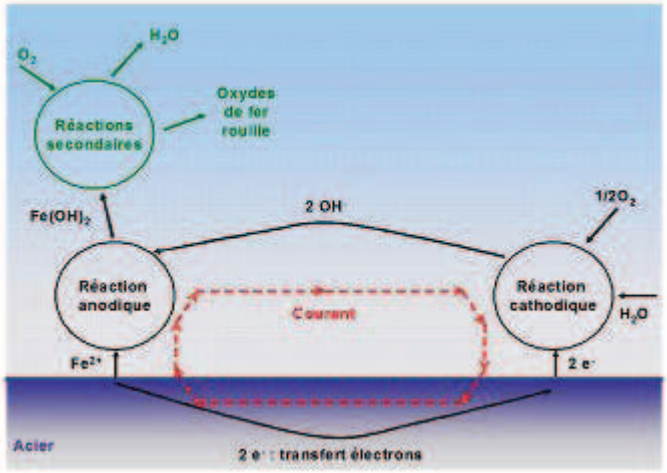

Fig.(IV.11)- Représentation schématique de la réaction de corrosion des aciers. **[16]**

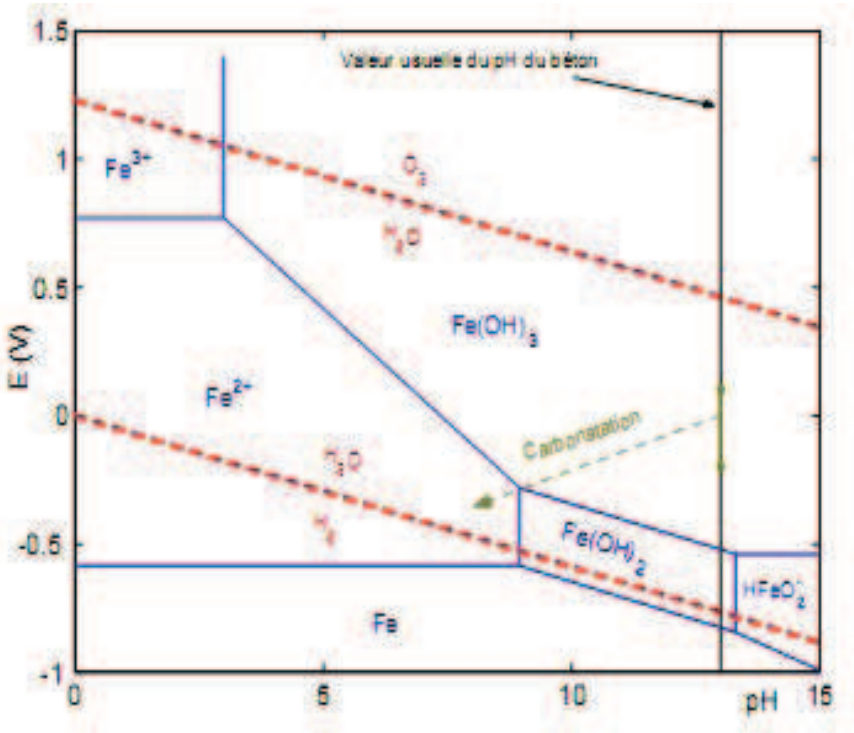

Fig.(IV.12) – diagramme de Pourbaix du système $Fe - H_2O$ à 25° C (le potentiel électrique est donné par rapport à l'électrode normale à hydrogène). **[16]**

Retenons qu'il y a trois facteurs qui rendent possible la corrosion :

a) La conductivité électrolytique du béton : la présence d'eau est essentielle. Elle réagit avec l'oxygène à la cathode et permet d'établir le circuit des charges électriques et des ions entre l'anode et la cathode ;

b) La présence d'oxygène : L'oxygène (en phase gazeuse) est nécessaire à la cathode où il se combine avec l'eau et les électrons pour former les ions hydroxyles OH^-. Si le béton est saturé d'eau, la corrosion des aciers n'est donc pas possible. De plus, la présence d'oxygène à l'anode modifie la composition chimique des produits de corrosion ;

c) Lorsque la corrosion a lieu, les réactions qui se produisent dépendent de la nature de l'électrolyte (essentiellement de son pH) et du potentiel électrique de surface des aciers. L'effet de ces facteurs est montrés sur le diagramme de Pourbaix simplifie du fer (figure (IV.12)). on distingue trois cas figure :

- Les zones de corrosion correspondant aux domaines de prédominance des espèces $Fe^{2+}, Fe^{3+}, HFeO_2^-$;
- une zones d'immunité sans corrosion correspondant au domaine d'équilibre du fer Fe : les ions métalliques ne peuvent s'échapper de la surface du métal ;
- deux zones de passivation correspondant à l'équilibre des hydroxydes de fer II $Fe(OH)_2$ et III $Fe(OH)_3$: à la place de la rouille se formes une pellicule protectrice d'hydroxydes de fer qui empêche la corrosion de l'acier.

IV.4.3.2 Corrosion des armatures du béton armé :

La solution dans les pores du béton est une solution alcaline qui a un pH proche de 13. Pour les structures exposées à l'air dans des conditions normales, les mesures de potentiel électrique des armatures donnent généralement des valeurs variant entre -0,2V et 0,1V. Dans un tel milieu, l'acier est passivé (cf. figure (IV.12)). Or, la carbonatation du béton entraîne une baisse du pH à une valeur d'environ 9. Dans ce milieu, l'armature voit alors son potentiel électrique chuter vers les valeurs négatives. Elle se retrouve dans une zone de corrosion. La pathologie qui apparaît est une corrosion généralement se traduisant

par une diminution progressive de la section des armatures. De plus, la formation de rouille expansive exerce une pression sur le béton entourant l'armature. Cette pression est souvent suffisante pour provoquer l'éclatement du béton d'enrobage.

La présence d'eau est très importante pour la corrosion car elle diminue la résistance électrique. Ainsi, la corrosion est essentiellement un problème pour les bétons humides, mais non saturés d'eau puisque la vitesse de diffusion de l'oxygène devient comparativement nulle dans l'eau par rapport à celle dans l'air. On estime généralement que la vitesse de corrosion est maximale pour une humidité relative proche de 95%.

En plus de la carbonatation, la présence de chlorures dans l'eau des pores du béton est également défavorable du point de vue de la corrosion. Ces chlorures proviennent de l'eau de mer et/ou des sels de déverglaçage. Ils détruisent le film passivant qui protége le métal. La destruction de cette protection se produit localement sur les surfaces les plus sensibles, ce qui conduit à l'apparition de piqûres qui deviennent de petites anodes formant des piles de corrosion actives avec un pH très bas, d'environ 4à5.la processus de Corrosion des armatures par les chlorures s'amorce lorsque les chlorures atteignent l'armature en concentration suffisante pour dépassiver l'acier. Cette concentration limite est d'autant plus importante que le pH de la solution interstitielle est élevé, puisque le seuil critique de dépassivation des aciers correspond à un rapport $[Cl^-]/[OH^-]$proche de 0,6. Dés lors, lorsque des chlorures sont présents dans les bétons carbonatés, le seuil de dépassivation est atteint plus facilement. En effet, une concentration en chlorures 10^4 fois plus petite suffit à initier la corrosion dans un matériau carbonaté, ce qui est confirmé expérimentalement par Chaussadent et Dron. La encore, ceci justifie que le pH doit être une donnée de sortie indisponible des modèles de carbonatation.

IV.4.3.3 – Seuil critique de la carbonatation :

La carbonatation dans le béton est provoquée par les réactions chimiques entre le dioxyde de carbone et les produits de l'hydratation du béton. La principale conséquence de la carbonatation est la baisse du pH de la solution interstitielle dans les zones entièrement carbonatées. De cette façon, si le front de carbonatation avance vers l'armature, le pH à la proximité des aciers atteint la valeur de 9 environ. L'armature est alors dépassivée.

Donc, le seuil critique pour la carbonatation peut être défini par le fait que l'armature est au contact d'un béton carbonaté (pH < 9). De plus, l'humidité du béton doit rester entre 60% et 70%, car un béton saturé limite le mécanisme global de carbonatation par la diffusion des ions carbonatés en solution; inversement un béton sec ne permet pas que le gaz passe en solution **[20]**

V.1 Introduction :

Après avoir abordé dans le chapitre précédent l'impact des éléments chimiques agressifs dissoutes dans les eaux de la nappe phréatique sur le béton et le mécanisme des interactions chimiques entre ces éléments et le béton ainsi que les barres d'armature, et pour en savoir plus à propos de l'impact des eaux de la nappe phréatique du bassin de Ouargla sur les ouvrages hydrauliques et génies civil, une analyse chimique des eaux de cette nappe a été entreprise à fin de déterminer le taux de concentration de ces éléments agressifs.

V.2 Conduite de l'analyse chimique :

Les échantillons d'eau prélevés de la nappe phréatique ont été mis dans des bouteilles en plastiques nettoyées à l'eau distillée et puis lavées par les eaux de cette nappe. Après avoir prélevé l'échantillon, nous écrivons sur chaque bouteille la zone d'échantillonnage et la température de l'eau lors de ce prélèvement.

L'analyse chimique des éléments $(Cl^{-}, SO_4^{-2}, Zn^{+2}, Fe^{+2})$ a été faite en France dans le cadre des travaux d'unité de recherche, alors que l'analyse des éléments $(HCO_3^{-}, Mg^{+2}, Ca^{+2})$ a été réalisée au niveau de l'Algérienne des eaux à Ouargla, et l'analyse chimique des éléments (K^{+}, Na^{+}, PH) a été menée au laboratoire d'analyse chimique à l'Université de Kasdi Merbah à Ouargla. Le tableau (V-1) montre les nomenclatures utilités.

Tableau (V-1) : Nomenclature des échantillons dans le reste de l'étude :

Commune	zone d'échantillonnage	nomenclature
Ain Beida	Ain Beida	**(I-1)**
	Adjadja	**(I-2)**
Ouargla	Sidi Abderahman 1 (ksar)	**(II-1)**
	Sidi Abderahman 2 (ksar)	**(II-2)**
	L'université	**(II-3)**
	Saiid	**(II-4)**
	Saiid1	**(II-5)**
	Bouamer	**(II-6)**

	Quartier Enasser (parc d'attraction)	**(II-7)**
	Quartier Enasser (à côté de la route RN49)	**(II-8)**
Rouissat	Sokra	**(III-1)**
	Rouissat	**(III-2)**
N'goussa	N'goussa à côté du stade	**(IV-1)**
	N'goussa Entrée de la ville	**(IV-2)**
	N'goussa centre	**(IV-3)**

V.3 Le potentiel d'Hydrogène

Le Potentiel d'Hydrogène est un indice permettant de mesurer l'activité de l'ion hydrogène dans une solution. C'est un indicateur de l'acidité (pH inférieur à 7) ou de l'alcalinité (pH supérieur à 7) d'une solution.

Les résultats des analyses des eaux de la cuvette sont donnés comme suite:

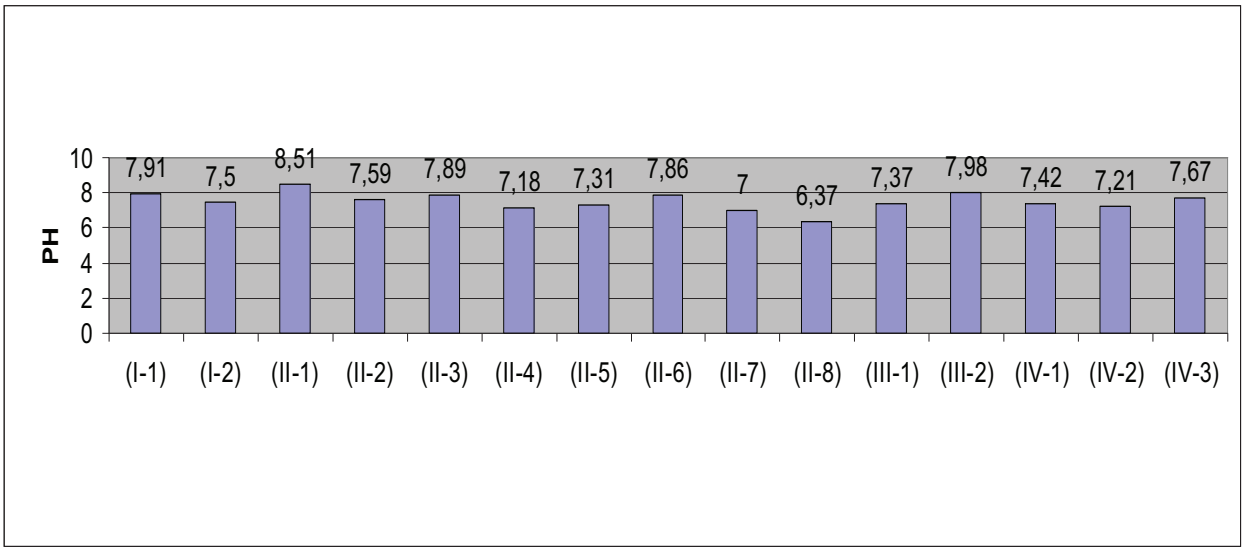

Fig. (V-1) : Le pH des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

Fig. (V-2) .Répartition du pH au niveau de la cuvette de Ouargla

D'après les résultats obtenus montrés sur la figure (V.1), on note que l'ensemble des échantillons présentent une eau légèrement alcaline sauf la zone du quartier ennaser où nous touchons une légère acidité.

Nous remarquons que les valeurs du pH relatifs aux puits d'eau destinées l'alimentation sont proches de celles trouvée au niveau de la nappe superficielle, néanmoins, la valeur du pH relative au puits d'eau est légèrement supérieur à celle de la nappe phréatique comme le montre la figure (V-2). Il semble que la nappe phréatique, relative aux quartiers où les centres de vie sont plus anciens, est plus alcaline comparativement aux quartiers qui sont plus récents. A ce propos, la variation de la valeur du pH entre les puits et la nappe alimentée, peut se justifier par le fait que le sol existant tend à diminuer l'alcalinité des eaux de la nappe ou l'existence d'autres facteurs tels que les résidus ménagers (activités humaines).

V.4 Concentration des éléments chimiques :

Concentration de Ca^{++}:

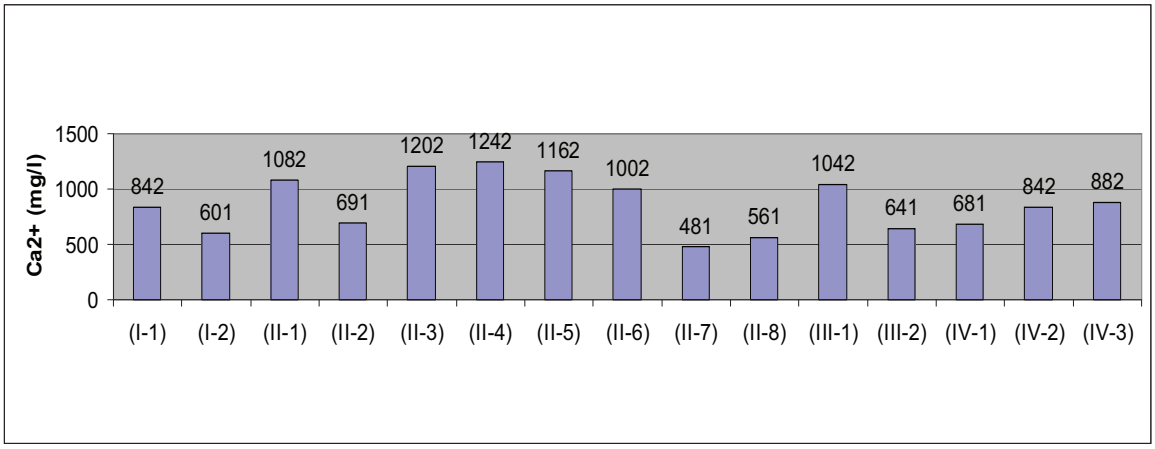

Fig. (V-3) : La concentration en Ca^{+2} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

Fig. (V-4). Répartition des Concentrations de Ca2+ sur la cuvette de Ouargla

Grâce à la courbe graphique (V-3), on note que la Concentration en Ca^{+2} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est comprise entre 1242mg/l et 481 mg/l, qui correspondent respectivement au quartier Said Otba ayant la valeur maximale et au quartier Nasr ayant la valeur minimale.

Il semble que les valeurs les plus élevées du Ca^{+2} au niveau de nappe phréatique sont attribuées aux centres de vie les plus anciens bien que le résultat obtenu par l'analyse des eaux de la nappe de Rouissat ne concorde pas avec cette tendance.

Concentration de Mg^{+}:

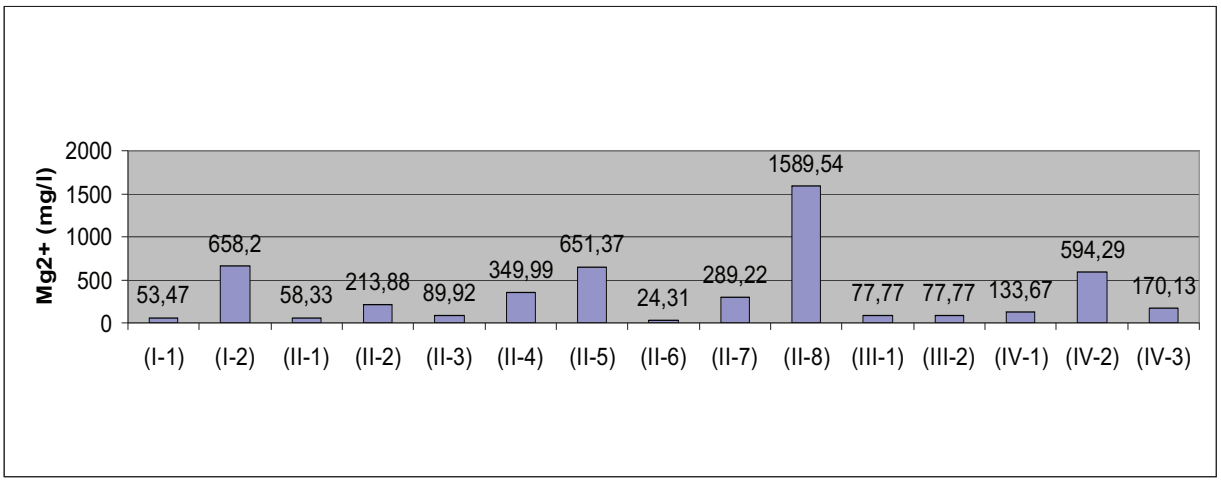

Fig. (V-5) : La concentration en Mg^{+2} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

Grâce à la Figure (V-6), à l'exception de la valeur de 1589 mg /l trouvée au quartier Ennacer, la Concentration en Mg^{++} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est comprise entre 658.2 mg/l et 24,31 mg/l, qui correspondent respectivement au quartier Adjadja et au quartier Bouamer.

Relativement aux résultats d'analyse, il semble qu'il n'y a pas une relation directe entre l'ancienneté du centre de vie ou l'activité humaine et la concentration du Mg^{++}.

Fig. (V-6). Répartition des Concentrations de Mg^{+} sur la cuvette de Ouargla.

Concentration de Na^+:

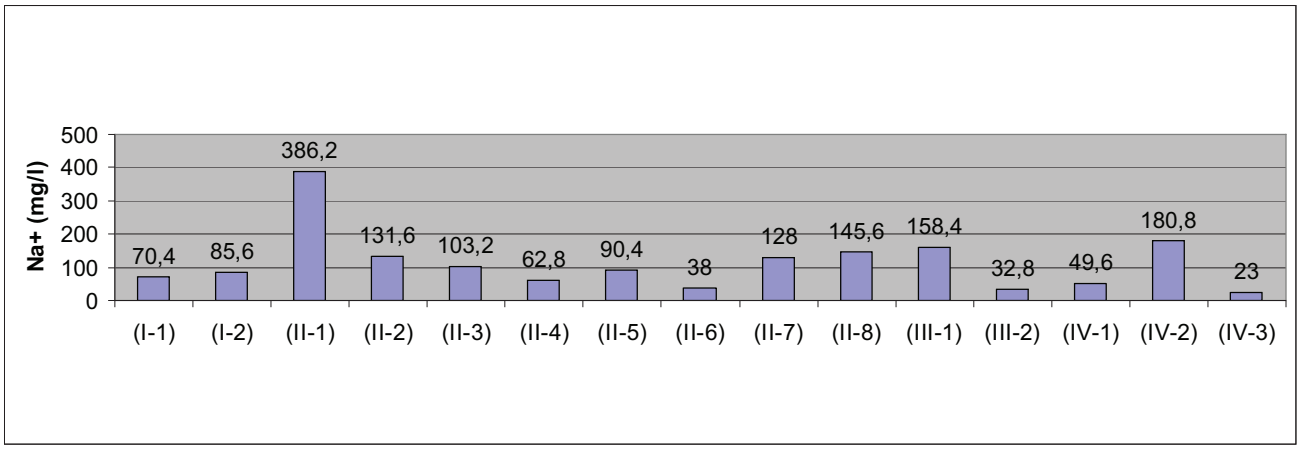

Fig. (V-7) : La concentration en Na^+ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

D'après la figure (V-8), on remarque que la Concentration en Na^+ dans les eaux de la nappe phréatique du la cuvette de Ouargla, à l'exception de Sidi Abderrahmane I(Ksar) ayant une concentration de 386,2 mg/l, elle est comprise entre 180.8 mg/l et 23 mg/l qui représentent respectivement les quartiers Ksar et N'goussa.

Fig. (V-8). Répartition des Concentrations de Na^+ dans la cuvette de Ouargla

Concentration de K^+:

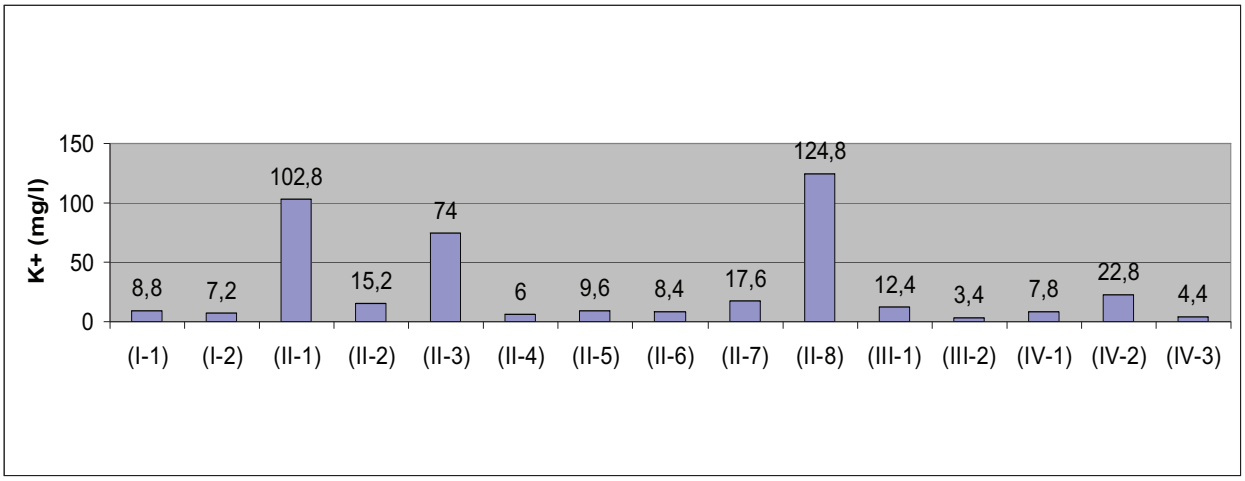

Fig. (V-9) : La concentration en K^+ dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

De la figure (V-10), on note que le Concentration en K^+ dans les eaux de la nappe phréatique du la cuvette de Ouargla est comprise entre 22.8 mg/l et 3,4 mg/l , à l'exception des trois zones à savoir : l'université (institut d'hydraulique), Sidi Abderrahmane I (Ksar) et Quartier Ennasr ayant respectivement les valeurs 74, 102.8 et 124.8 mg/l.

Fig. (V-10). Répartition des Concentrations de K^+ sur la cuvette de Ouargla

Concentration de SO_4^{2-} :

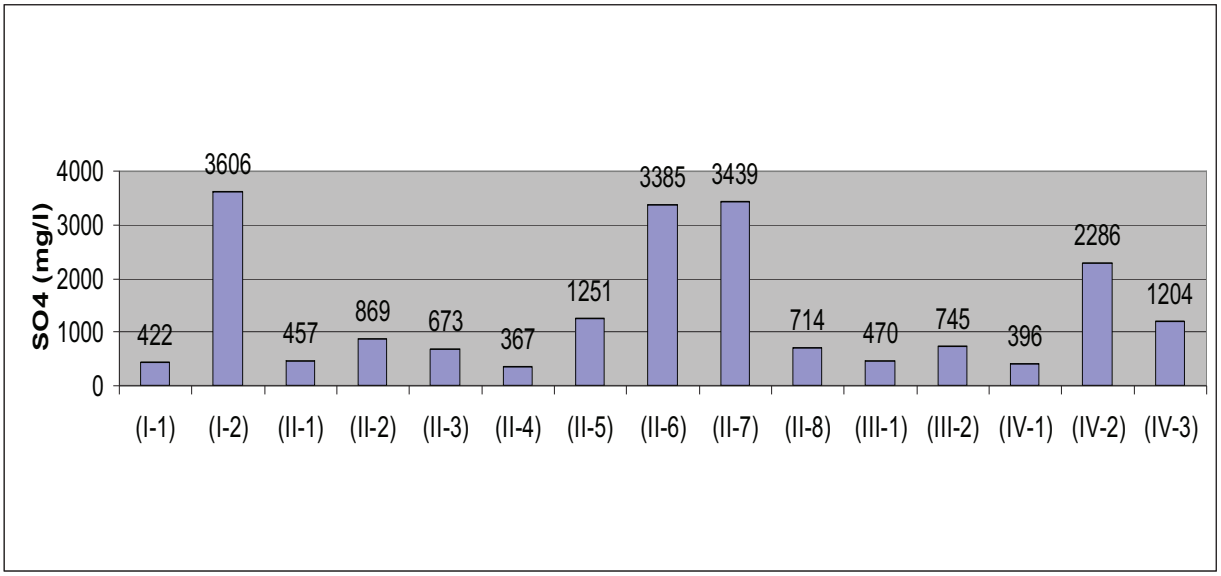

Fig. (V-11) : La concentration en SO_4^{2-} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

La concentration en SO_4^{-2} dans les eaux de la nappe phréatique du la cuvette de Ouargla, d'après la figure (V-12), est comprise entre 3606 mg/l et 367 mg/l qui correspondent respectivement au quartier Adjadja ayant la valeur maximale et le quartier Said commune de Ouargla ayant la valeur minimale.

Fig. (V-12). Répartition des Concentrations de SO_4^{2-} sur la cuvette de Ouargla

Tableau (V-2) Concentration du SO_4^{-2} dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla.

Commune	Nom du Puits	Zone	Concentration SO_4^{2-} (mg/l)	
			Au niveau du Puits	Au niveau de la zone
Ouargla	- Lala mimona	- Sdi abderahmane Ksar	620	457,47
	- Gara nord	- Sidi abderahmane 2	720	868,99
	- Ifri silice	- L'université	676	673,42
	- Ifri	- Said Otba	686	366,65
	- Said	- Said otba1	650	1250,55
Rouissat	- Hdeb 1	- Sokra	610	469,55
		- Rouissat		744,72
Ain Beida	- Hdeb 2	- Ain Beida	580	421,99
		- Adjadja		3606,36
N'Goussa	- N'Goussa	- Stade	800	395,67
		- Entrée de la ville	960	2286,11
		- Centre ville	965	1203,97

D'après les résultats trouvés, on remarque que la concentration du SO_4^{2-} au niveau de la nappe phréatique est assez forte et varie entre 966 mg/l et 1250 mg/l. alors que celle des puits varie entre 580 et 965 mg/l. De même, on remarque que ces variations ne concordent pas entre elles. à titre d'exemple, le puits de Hdeb ayant une concentration de 610 mg/l et qui alimente Sokra et Rouissat qui représentent respectivement 421,99 et 744,72 mg/l au niveau de leurs nappes phréatiques.

Concentration du Cl^- :

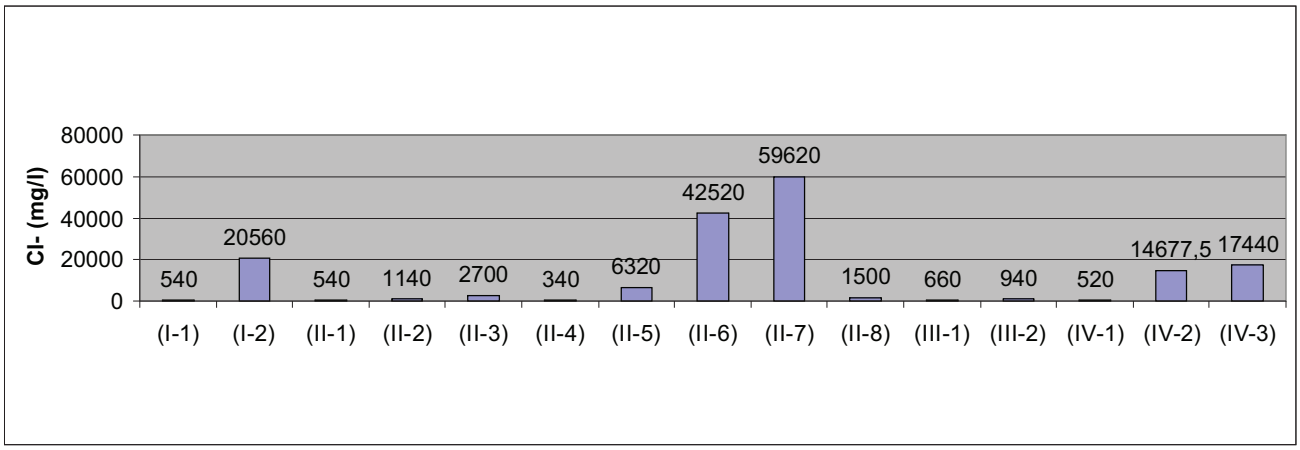

Fig. (V-13) : La concentration en *Cl* dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

La concentration en Cl^- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla, selon la figure (V-14), est comprise entre 59620 mg/l et 340 mg/l qui correspondent respectivement au quartier Nasr et le quartier Said Otba.

Fig. (V-14). Répartition des Concentrations de Cl^- sur la cuvette de Ouargla

Tableau (V-3) Concentration en Cl^- dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla

Commune	Nom du Puits	Zone	Concentration Cl^- (mg/l)	
			Au niveau du Puits	Au niveau de la zone
Ouargla	- Lala mimona - Gara nord	Sdi abderahmane Ksar Sidi abderahmane 2 Said Otba Said otba1 L'université	360 515	540 1140 340 6320 42520
Rouissat	- Hdeb 1	- Sokra - Rouissat	435	660 940
Ain Beida	- Hdeb 2	- Ain Beida - Adjadja	400	540 20560
N'Goussa	- N'Goussa 1 - N'Goussa 2	- Stade - Entrée de la ville - Centre ville	455 850	17440 520 14677,5

D'après le tableau (V-3), on remarque que la concentration en Cl^-, au niveau des puits qui alimentent les différentes zones de Ouargla, est assez inférieure à celle trouvée au niveau de leurs nappes phréatiques à l'exception de N'Goussa (entrée de la ville) qui ne convient pas à cette constatation.

Cette constatation affirme l'existence d'autres sources d'ions Cl^- dans la nappe phréatique telles que les eaux ménagères, les engrais, le tissu végétal et les sols…etc.

Concentration du HCO_3^- :

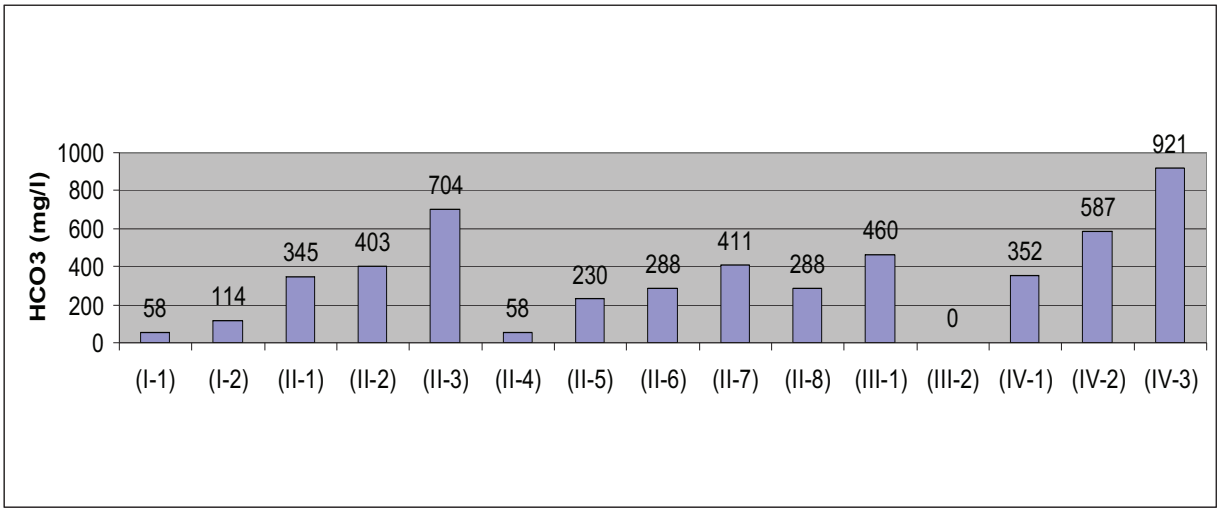

Fig. (V-15) : La concentration en HCO_3^- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

La concentration en HCO_3^- dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla, selon la figure (V-5), est comprise entre 921 mg/l jusqu'à uniquement des traces. Ceci correspond respectivement à N'Goussa et Rouissat.

Fig. (V-16). Répartition des Concentrations du HCO_3^- à la cuvette de Ouargla

Tableau (V-4) Concentration en HCO_3^- dans les puits et la nappe phréatique de Ouargla.

Commune	Nom du Puits	Zone	Concentration HCO_3^- (mg/l)	
			Au niveau du Puits	Au niveau de la zone
Ouargla	- Lala mimona	- Sdi abderahmane Ksar	85	345,28
	- Gara nord	- Sidi abderahmane 2	85	402,83
	- Ifri silice	- L'université	76	703,84
	- Ifri	- Said Otba	79	57,54
	- Said	- Said otba1	140	230,18
Rouissat	- Hdeb 1	- Sokra	125	460,37
		- Rouissat		372,33
Ain Beida	- Hdeb 2	- Ain Beida	67	57,54
		- Adjadja		114,42
N'Goussa	- N'Goussa	- Stade	124	351,92
		- Entrée de la ville	110	586,53
		- Centre ville	73	920,75

D'après le tableau (V-4), la concentration en HCO_3^- au niveau de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est toujours supérieure à celle des puits qui l'alimentent à l'exception des zones Said Otba et Ain beida.

Concentration du Zn^{2+} :

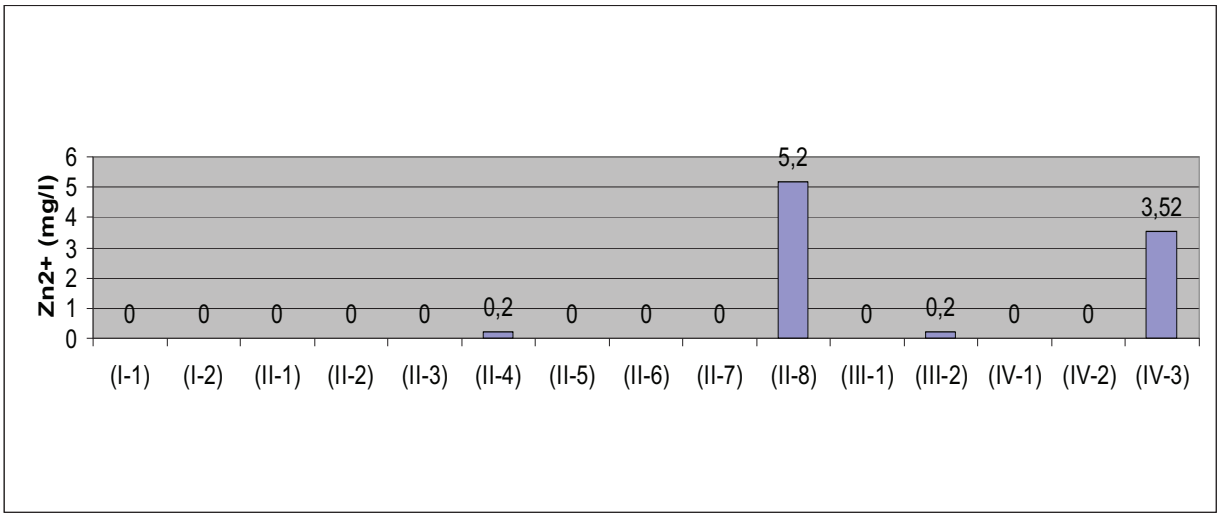

Fig. (V-17) : La concentration en Zn^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

A partir du graphe (V-8), on remarque que la concentration du Zn^{2+} au niveau de la cuvette est assez faible étant donnée qu'elle est nulle dans la plus part des échantillons, à l'exception du quartier Nasr où on enregistre 5,2 mg/l et N'goussa 3,52 mg/l.

Fig. (V-18). Répartition des Concentrations de Zn^{2+} sur la cuvette de Ouargla

Concentration de Fe^{2+} :

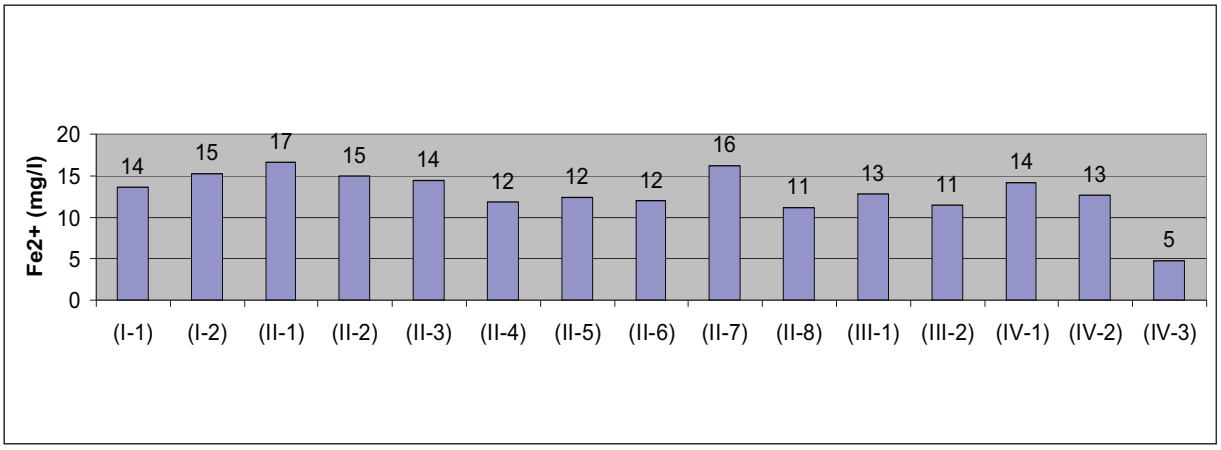

Fig. (V-19) : La concentration en Fe^{2+} dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla

D'après la figure (V-9), on remarque que la concentration du Fe^{2+} au niveau de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est pratiquement homogène comprise entre 17 et 11 mg/l à l'exception de N'Goussa où nous avons enregistré une valeur de 5 mg/l.

Fig. (V-20). Répartition des Concentrations de Fe^{2+} sur la cuvette de Ouargla

V.5 Analyse de l'influence des éléments chimiques sur le béton.

Parmi les éléments chimiques agressifs sur béton, on note le chlore, le dioxyde de carbone, le sulfate et le magnésium.

V.5.1 Influence du pH sur le béton dans la cuvette de Ouargla

Selon la norme préconisée par le CTC qui stipule que lorsque la valeur du pH est supérieure à 6.5 aucun danger vis-à-vis du béton n'est à craindre. Et étant donné que l'ensemble des échantillons prélevés de la nappe phréatique de Ouargla présentent une valeur de pH supérieure à la dite norme, le béton projeté dans ces zones ne risque aucun danger. La seule valeur inférieur à 6.5 qui est de 6.37 trouvée au quartier Nasr, est classée dans la plage faible selon la même norme.

V.5.2 Influence du chlore sur le béton dans la cuvette de Ouargla.

D'après la littérature le seuil du chlorure ne doit pas dépasser 0.17 % à 2.5% du poids de ciment [19]. Ceci est équivalent à une concentration qui varie entre 595 à 8750 mg/l. Les résultats trouvés dans la nappe phréatique indiquent que nous avons déjà cinq endroits au niveau de la cuvette de Ouargla qui dépassent la fourchette citée donc ils sont objet du risque de chlorure s'agissant des quartiers Enasr (parc), Bouamer, Adjadja et N'Goussa. Les quartiers qui sont dans la plage de la fourchette (qui sont l'objet de jugements non précis) Sidi aderrahmane II, l'université, Said I, Nasr (coté de la route), Sokra et Rouissat. Bien que les quartiers Ain-Beida, Sidi Abderrahmane I, Said et N'Goussa (coté du stade) ne présentent jusqu'à présent aucun risque vis-à-vis de l'attaque de chlorure.

V.5.3 Influence du dioxyde de carbone sur le béton dans la cuvette de Ouargla.

Les spécifications du CTC au sujet de la concentration du dioxyde de carbone indiquent que celle-ci ne présente aucun risque si elle est inférieure à 15 mg/l, et elle est considérée comme très fortement agressive si elle est plus de 100 mg/l. en comparant ceci aux résultats trouvés au niveau de la cuvette de Ouargla, on constate que plus part des Ouvrages en béton implantés dans la nappe phréatique de Ouargla risque fortement la carbonatation étant donné que la concentration en HCO_3 en ces zones dépasse le seuil préconisé. A l'exception des zones Ain-Beida et Said Otba qui sont classés comme milieu modéré et Rouissat qui n'a présenté que des traces.

V.5.4 Influence du sulfate sur le béton dans la cuvette de Ouargla.

Selon les spécifications édictées par le CTC, la cuvette de Ouargla peut être classée en plusieurs degrés d'agressivité à savoir : Adjadja, Bouamer et Quartier Nacer (parc) classés comme zones de forte agressivité (de 3385 à 3606 mg/l), Sidi Abderahmane II, l'Université, Said I, Quartier Nacer (à coté de la route), Rouissat et N'Goussa (entrée de la ville) qui sont classés comme zones d'agressivité modérée, alors que les autres zones sont classées comme zones de faible agressivité.

V.5.5 Influence de la concentration du magnésium sur le béton dans la cuvette de Ouargla.

Une concentration de moins de 100 mg/l est considérée sans effet selon les spécifications du CTC alors qu'au-delà de 3000 mg/l l'agressivité de celle-ci est classée comme très forte. Les résultats obtenus d'après l'analyse chimique des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla en terme de concentration en ions de magnésium montre qu'il existe un seul endroit (Quartier Nacer coté de la route) qui est classé en zone de forte agressivité. Les zones de moyenne agressivité sont à ce titre : Adjadja, Said, Said1 et N'Goussa (entrée de la ville). Sont considérés comme de faible agressivité les zones : Sidi Abderahmane II, Quartier Nacer(Parc) et N'Goussa, alors que les autres zones sont classées comme zones ne présentant aucun risque.

V.5.5 constatations in situe :

Dans ce qui suit nous allons présenter quelques constatations réelles de la dégradation de béton, dans la cuvette de Ouargla avec dés photos dans les quelles nous voyons en claire l'ampleur de la remontée de la nappe, ainsi que la dégradation continue des couches du béton.

Photo n°1: niveau de la nappe lors de la pose d'un réseau d'assainissement. conduites en béton

Photo n°2: affleurement de la nappe phréatique.

Photo n° 3 : niveau de la nappe sous la fondation d'une construction.

Photo n°4: gonflement et carbonatation du ciment et dépôt de couches de sel sur les parois du mur.

Photo n° 5 : corrosion d'une armature au niveau de la fondation d'une construction.

Photo n° 6 :Dégradation de l'acier et du béton à la base d'un poteau éléctrique

Photo n° 7 : Fissuration au niveau d'un mur causée par la corrision des armatures

Photo n° 8 :Rénouvation des ouvrages hydrauliques avant expiré leur durée de vie

Photo n° 9 :Affaissement du sol sous certaines routes

Photo n° 10 :Rénovation des ouvrages hydrauliques avant expiré leur durée de vie

Photo n° 11 : Fissuration rapide dans un nouveau regard.

Photo n° 12 : Elevation du niveau d'eau dans les canaux d'évacuation.

Photo n° 13 :Corrosion des armatures au niveau des regards

VI.1 Conclusions :

De l'analyse de l'impact des eaux de la nappe phréatique du bassin de Ouargla sur les ouvrages en béton armé, on peut conclure ce qui suit :

1- La zone de Ouargla soufre du problème de la remontée des eaux de la nappe phréatique ayant divers aspects justifiée par un bilan hydrique positif évalué à 228 millions de mètre cube en 2006.

2- Les ouvrages hydrauliques en béton armé notamment ceux destinés à l'alimentation en eau potable, l'irrigation ou l'assainissement ont connu plusieurs rénovations dans un temps court loin de la durée de vie théorique qui leur a été proposée.

3- D'après les études antérieures établies sur le phénomène de la remontée des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla, on constate que malgré les ouvrages de drainage réalisés au cours des années précédentes le niveau de la nappe du bassin de Ouargla est très proche de la surface et présente même des affleurements et que les fluctuations annuelles sont très faibles.

4- Les valeurs du pH relatifs aux puits d'eau destinées l'alimentation sont proches de celles trouvée au niveau de la nappe superficielle, néanmoins, la valeur du pH relative au puits d'eau est légèrement supérieur, Il semble que l'alcalinité des eaux de la nappe phréatique est fonction de l'ancienneté de l'activités humaines du quartier considéré. En outre, la norme préconisée par le CTC indique que la valeur du pH au niveau de la nappe phréatique de Ouargla ne présente jusqu'à présent aucun risque pour les ouvrages en béton armé.

5- La concentration en ions de magnésium dans la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla est hétérogène d'un endroit à l'autre. Selon la norme du CTC, l'agressivité est, à ce propos, variable de très fort à agressivité nulle.

6- Cinq endroits au niveau de la cuvette de Ouargla dépassent largement la fourchette de concentration en chlorure soit 0.17 % à 2.5% du poids de ciment. Les mesures adéquates de lutte, à ce titre, s'imposent pour les ouvrages existants ainsi que les ouvrages future projetés.

7- La concentration en dioxyde de carbone dans la cuvette de Ouargla, indique que la plupart des Ouvrages en béton implantés dans la nappe phréatique de Ouargla risque fortement la carbonatation étant donné que la concentration en HCO_3 en ces zones dépasse le seuil préconisé.

8- La concentration du sulfate, au niveau de la nappe phréatique de Ouargla, est assez variable et d'après la norme du CTC, elle présente plusieurs degrés d'agressivité selon l'endroit choisi.

VI.2 Recommandations

1- Les données physico-chimiques de la nappe phréatique de Ouargla semblent insuffisantes pour décrire d'une façon très claire le comportement de la nappe. De ce fait, un nombre plus important de piézomètre bien réparti sur l'ampleur de la cuvette peut décrire mieux la variation en espace de ces données.

2- Le recours aux matériaux locaux qui s'adaptent avec les données climatiques de la région et physico-chimiques de la nappe phréatique de Ouargla, est d'une nécessité cruciale afin de garantir la durée de vie escomptée des ouvrages projetés dans la cuvette.

3- Le suivi des variations des données de la nappe et la mise en place des moyens adéquats nécessaire pour mieux maîtriser la dégradation qui touche les ouvrages existants afin de prédéfinir leur durabilité et prendre les mesures de lutte au moment opportun.

4- Les éléments chimiques néfastes aux ouvrages en béton armé dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla sont présents à des degrés variables selon l'endroit, l'établissement de carte d'iso-concentartion où l'établissement d'un zoning s'impose afin d'orienter les constructeurs vers les types de ciment et précautions à prendre en compte lors de la conception, la confection et la mise en place du béton dans chaque endroit.

5- Le lancement d'une étude qui contribue à la définition de la source réelle des éléments chimiques néfastes dans les eaux de la nappe phréatique de la cuvette de Ouargla s'impose afin d'assurer un système de lute fructueux bien adapté aux ouvrages implantés dans l'assiette de la cuvette de Ouargla.

6- Lancement d'une étude empirique qui peut éclaircir mieux l'impact des éléments chimiques néfastes sur la durabilité des ouvrages en béton armé implantés dans l'assiette de la cuvette de Ouargla.

ملخص:

إن المناطق الصحراوية للجنوب الشرقي الجزائري تعاني منذ عدة سنوات من المشاكل البيئية الناجمة عن ظاهرة صعود المياه للطبقة السطحية، ولذلك يكمن محور هذه الدراسة حول تأثيرات هذه الظاهرة بالنسبة لمنشآت الري والهندسة المدنية.

إن ظاهرة صعود المياه ناجمة عن الضخ المفرط لمياه الطبقات الجوفية العميقة نحو الطبقة السطحية، مما أدى إلى ظهور عدة مشاكل مرتبطة فيما بينها كظهور المياه على السطح، هبوط التربة تحت بعض المنشآت كالمباني والطرق، عدم استقرار بعض المنشآت مما يؤدي إلى تشققها وبالتالي التقليل من مدة صلاحيتها. يتمثل المشكل الأكبر في التأثير الكيميائي للمياه الصاعدة على المنشآت والمتمثل في تآكل الخرسانة والتسليح نتيجة التفاعلات الكيميائية.

ومن بين تأثيرات هذه الظاهرة، نلاحظ أن شبكات الري لحوض ورقلة شهدت عددا كبيرا من أشغال إعادة الـتأهيل والتجديد دون أن تستوفي هذه الشبكات مدة الصلاحية المحددة لها.

لأجل كل ذلك، هذه الدراسة تتكون من:

1- معرفة خصائص ظاهرة المياه في منطقة الدراسة.
2- دراسة آلية التآكل للخرسانة وحديد التسليح.
3- التحليل الكيميائي لمياه الطبقة السطحية وخاصة العناصر الضارة مع إنشاء خريطة منحنيات التركيز **(Carte d'iso-concentration).**
4- ترجمة نتائج التحليل الكيميائي من أجل تدوين الخلاصة والتوجيهات وكذلك محاور البحث المستقبلية.

الكلمات الرئيسية: الطبقة السطحية، الاستدامة، تذبذب،الأساس ، تآكل

Résumé

Les régions du SUD-EST Algérien soufrent depuis plusieurs années des problèmes environnementaux et écologiques causés par la remontée des eaux de la nappe phréatique. L'impact néfaste de ce phénomène se manifeste par :

- la dégradation de la palmeraie.
- La dégradation des réseaux routiers.
- La dégradation des structures voir leurs fondations.

La présente étude s'est axée sur l'impact de la remontée de la nappe sur la dégradation chimique des ouvrages hydrauliques et de génie civil influencés par cette remontée.

Le phénomène de remontée dans la cuvette de Ouargla est dû au pompage des eaux d'une façon abusive des nappes profondes (sénonnien, méopliocène, albien) dans la première nappe. Ainsi, beaucoup de problèmes ont surgie entre autres l'affleurement de la nappe, l'affaissement du sol sous certaines constructions et routes, l'instabilité de l'assise de certains ouvrages qui conduit à leur fissuration et par la suite l'affectation de leur durabilité. En addition, le grand problème subsiste en l'effet chimique de cette nappe sur les ouvrages hydrauliques et génies civils qui se traduit par la dégradation du béton et de l'acier.

Parmi les conséquences de ce phénomène de remontée, les réseaux hydrauliques de la zone de la cuvette de Ouargla ont connu un nombre important de réhabilitation et rénovation en d'hors des délais habituels de leur durée de vie.

A ce propos, notre étude s'est consacrée à :

- la caractérisation du phénomène de remontée dans la zone d'étude.

- Etude du mécanisme de la corrosion du béton et de l'acier

- Analyse chimique des eaux de la nappe phréatique notamment les éléments néfastes avec l'établissement de carte d'iso- concentration.

- Interprétation des résultats d'analyse pour en fin éditer des conclusions et recommandations. Ainsi que les axes de recherche futurs.

Mots clés : Nappe phréatique, durabilité, fluctuation, fondation, corrosion.

Bibliographie

[1] – Rapport des activités mensuelles de la direction de l'hydraulique de la wilaya de Ouargla (DHW Ouargla) du 1985 au 2008

[2] - Rapport des activités mensuelles au niveau de l'office national d'assainissement (ONA Ouargla) du 1998 au 2008

[3] –"Études D'assainissement Des Eaux Résiduaires, Pluviales Et D'irrigation. Mesures Complémentaires De Lutte Contre La Remontée De La Nappe Phréatique" (mission II- Investigations, essais de pompage et bilans d'eau, établissement des cartes piézométriques, diagnostic des captages d'eau et mesures de réhabilitation, de protection des ressources en eau), juillet 2002, Bureau d'études B.J suisse.

[4] - Mémoire de fin d'étude d'ingéniera de Garib A/Alaziz, 2007, département géologie, Université Kasdi Merbah Ouargla

[5] -"Etudes D'assainissement Des Eaux Résiduaires, Pluviales Et D'irrigation. Mesures Complémentaires De Lutte Contre La Remontée De La Nappe Phréatique" (mission IA reconnaissance et diagnostic de l'assainissement), juillet 2002, Bureau d'études B.J suisse.

[6] - UNESCO (1970). Projet ERESS : Etude des ressources en eau du Sahara septentrional. Rapport final - Paris.

[7] - Contribution à l'étude et l'établissement du bilan hydrologique de la cuvette de Ouargla (Sahara Nord-Est septentrional)

[8] - Système aquifère du Sahara Septentrional. Observatoire du Sahara et du Sahel (OSS) Octobre 2003

[9] -ANRH Ouargla

[10] - Etude du Plan Directeur Général de Développement des Régions Sahariennes – Ministère de l'Agriculture et de la Pêche C.D.A.R.S. /Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, C.I.G (ARMINES) 1999)

[11] - hydrologie – Andrée moussé

[12] - service météorologie Ouargla

[13] - Contribution à la gestion optimale de la ressource en eau mobilisée «choix de formule empirique pour l'estimation de l'évapotranspiration potentielle "ETP" dans les régions de Tébessa et Annaba». Mémoire de magister, LADLANI Ibtissem, 174p,

[14] - ROCHE .M.A (1973). L'hydrogéologie de la haute Saoura et l'erg occidental. Travaux de collaboration bult N° 47, 240p.

[15] - Etude du mécanisme d'action du monofluorophosphate de sodium comme inhibiteur de la corrosion des armatures métalliques dans le béton, Thèse doctorat, université pierre et marrie curie paris, 200p

[16] - Modélisation de la carbonatation atmosphérique des matériaux cimentaires – prise en compte des effets cinétiques et des modifications microstructurales et hydriques, Mickael THIERY Thèse doctorat, université de paris, 331p

[17]- Durabilité de béton, écoule française du béton, 1992, 453p

[18] Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars, Construction and Building Materials, ALMUSALLAM, Vol.15, Janvier 2001, pp 361-368.

[19] -Some considerations on the effect of chloride ions on the corrosion of steel reinforcements embedded in concrete structures, Magazine of Concrete Research, GONZÁLES, J.A. et al ,Vol.50, Nº 3, September, 1998, pp 189-199.

[20] - Contribution a l'analyse probabiliste de la performance des ponts en béton armé des armatures métalliques dans le béton, Thèse de doctorat, Rita de Cássia SILVA, 225p

[21] - La durée de vie des ouvrages en béton armé situés sur la façade atlantique, Report n°2-1, Stéphanie BONNET et Abdelhafid KHELIDJ, 34p

[22] - Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour prolonger la durée de service des infrastructures (ponts, centrales nucléaires), Thèse de doctorat, Mahmoud ISMAIL, INSA Toulouse, 234 p

[23] – durabilité du béton a base de laitier, KRIKRE Abdelouahed, thèse magister , 1992,127p

Sommaire

Dédicaces

Remerciements

Liste de tableaux

Liste de figures

Liste de photos

Chapitre I : Introduction Générale (Problématique)

Introduction Générale: (Problématique)…… 01

Chapitre II- Généralités sur la zone d'étude

II. 1 Situation géographique……..……..… 04

II-2: Géomorphologie ……...……..… 05

II.3: Hydrogéologie ……...……..… 06

II.3.1. Nappe du continental intercalaire (C.I.) ……... 07

II.3.2 Les nappes du Complexe Terminal C.T…… 10

II.3.3 La nappe phréatique ……..…….. 11

II.4. Données hydriques et climatiques de la zone d'étude……. 14

II.4.1. Introduction ……..……..… 14

II.4.2. Définition du cycle hydrologique …….. 14

II.4. 3 Données climatiques de la zone d'étude……..…….. 15

II.4.4. Caractérisation climatique de la zone d'étude ……19

II.4.5. L'évaporation, l'évapotranspiration……..……..……..… 22

II.4.6. Calcul du bilan hydrique ……..……..……..… 28

Conclusion……..……..…..… 32

Chapitre III- Etudes antérieures sur le phénomène de la remontée.

III .1-Introduction ……..……..…..... 33

III.2- Analyse du phénomène de remontée de la nappe phréatique ……...…..… 34

III.2.1 Avant 1956 (date du premier forage à l'Albien) …….....…..… 34

III.2.2. Après 1956 ……..…….…..… 34

III.2.2.1 Etat en 1968 ……..……..… 36

III.2.2.2 Améliorations apportées par le réseau d'assainissement ……... 40

III.2.2.3 Travaux récents ……..…..… 40

Chapitre IV. Effet de la remontée de la nappe phréatique sur la dégradation des ouvrages hydraulique et Génie Civil.

IV.1 Introduction ……..…..… 47

IV.2 Définition du béton ……..…..… 48

IV.3.Dégradation de béton d'enrobage ……51

IV.3.1 La Carbonatation de béton : …….…..…..… 51

IV.3.2. Action des sulfates : ……....…..… 62

IV.3.4. Action des chlorures …….……..…..… 64

IV.4 – Corrosion des armatures dans le béton armé ……..64

IV.4.1 – Contexte de la degradation des armatures ……..… 64

IV. 4.2. Influence des chlorures sur le béton armé……...…..… 66

IV.4.3. Corrosion des armateurs liée à la carbonatation ……..…..…..… 73

Chapitre V : Analyse physico-chimique des eaux de la nappe phréatique de la cuvette de ouargla.

V.1 Introduction : ……..…..… 79

V.2 Conduite de l'analyse chimique……..…..… 79

V.3 –Le potentiel d'hydrogène …..……..…..… 80

V.3 -Concentration des éléments chimiques : ……..……..…..… 82

Concentration de Ca^{++}:……..…..… 82

Concentration de Mg^{++}:……..…..… 84

Concentration de Na^{+}:……..…..…85

Concentration de K^{+}:……..…..… 88

Concentration de SO_4^{2-} :……..……..…..90

Concentration de Cl^{-} :……..…..… 93

Concentration de HCO_3^{-} :……..….96

Concentration de Zn^{2+} :……..…....99

Concentration de Fe^{2+} :……..…..101

Chapitre VI : Conclusions et recommandations

VI.1 Conclusions ……..…..… 108

VI.2 Recommandations …….……..…..… 109

Bibliographies