



N° d'ordre

Année

**UNIVERSITÉ ABDELMALEK ESSADI
FACULTÉ DES SCIENCES
TÉTOUAN**

THÈSE

Présentée

Pour l'obtention du

DOCTORAT EN SCIENCES

Par :

ABDELILAH LAMRIBAH

Discipline : BIOLOGIE

Spécialité : BIOLOGIE DE L'ENVIRONNEMENT

Influence de la pollution urbaine sur la qualité microbienne et physicochimique des eaux souterraines de la nappe phréatique de Martil au Maroc

Soutenue le 25 janvier 2014 à 10h devant le Jury :

Pr. RIADI Hassan	<i>Professeur et vice doyen de la Faculté des Sciences de Tétouan</i>	Président
Pr. LABRAIMI Mustapha	<i>Professeur à la Faculté des Sciences de Rabat</i>	Rapporteur
Pr. ARAKRAK Abdelhay	<i>Professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger</i>	Rapporteur
Pr. BOUZIANE Hassan	<i>Professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan</i>	Rapporteur
Pr. ZINEBI Sanaa	<i>Professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan</i>	Examinatrice
Pr. SAOUD Younès	<i>Professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan</i>	Directeur

À la mémoire de **Mohamed Hassan Benajiba**, mon ex-professeur, encadrant et ex responsable de l'UFR qui a apporté une contribution essentielle et décisive à ce travail. Sans son orientation, sa disponibilité, sa ténacité, son esprit d'analyse et surtout sa capacité de trouver les alternatives tout au long de ma recherche, cette étude n'aurait pu voir le jour.

DEDICACES :

À ma très chère mère;

À mon très cher père;

Pour votre amour

Pour tous vos sacrifices

Pour tout l'enseignement que vous m'avez transmis

En témoignage de mon éternelle reconnaissance

À mes sœurs et frères pour votre soutien moral et encouragement permanent

À ma femme pour tes efforts de longue haleine à la maison et avec les enfants pour

que je puisse poursuivre mes études

À ma fille Hafsa, mes fils Tarik et Nabil, en vous souhaitant d'emprunter le chemin

de la connaissance

À mes professeurs

À mes collègues du travail

À mes collègues de l'étude

REMERCIEMENTS

Tout d'abord merci à **Dieu Tout Puissant** de m'avoir armé de foi, de courage et de patience tout au long de ce travail, en me permettant de concilier travail, étude et famille.

Je remercie vivement le professeur **ERRAMI Mohammed**, Doyen de la Faculté des Sciences de Tétouan pour l'opportunité qui m'a offerte d'approfondir mes connaissances dans le domaine de l'environnement au sein de la Faculté des sciences de Tétouan, et pour son aide et facilités qui m'ont été présentés tout au long de mon travail.

Je me dois d'exprimer toute ma gratitude au professeur **SAOUD Younès** qui a pris la responsabilité de m'encadrer après la lourde perte du professeur Mohamed Hassan Benajiba. Je vous remercie pour votre encadrement, encouragement, soutien, corrigés, révision de traductions et autres. Je suis fier d'être passé sous votre direction.

Je tiens à remercier les membres de Jury qui me font le grand honneur d'accepter de juger mon travail. Ma reconnaissance va aux :

RIADI Hassan, professeur et vice doyen de la Faculté de Sciences de Tétouan, chargé de la recherche et de la coopération scientifique

LABRAIMI Mustapha, professeur à la Faculté des Sciences de Rabat

ARAKRAK Abdelhay, professeur à la Faculté des Sciences et Techniques de Tanger

BOUZIANE Hassan, professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan

ZINEBI Sanaa, professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan

SAOUD Younès, professeur à la Faculté des Sciences de Tétouan

Je tiens à présenter mes remerciements à messieurs **AMNIOUL Ali** et **ACHBUN Mohamed**, respectivement actuel et ancien président du conseil communal de la ville de Martil pour la permission administrative, l'encouragement et le soutien de mener ce travail à terme. Qu'ils trouvent là mes vifs remerciements et ma reconnaissance.

Ma reconnaissance va à messieurs et **LEZRAK Mohamed** et **KABLI Abdelkrim**, respectivement actuel et ancien pacha de la ville de Martil pour la permission, l'encouragement et les facilités administratives nécessaires qu'ils m'ont apportés pour l'accomplissement de ce travail.

J'apprécie l'aide du professeur **Mohamed IDDA OMAR**, président de la Commune Urbaine de Tétouan et professeur à la Faculté des sciences de Tétouan pour m'avoir accueilli au laboratoire de l'environnement, et au laboratoire des analyses microbiologiques de la

Commune Urbaine de Tétouan, et mis à ma disposition le matériel et les produits nécessaires. Veuillez agréer l'expression de mon estime et de ma reconnaissance.

Je suis reconnaissant au docteur **AHRIKAT Mustapha**, directeur de la division d'hygiène à la Commune Urbaine de Tétouan pour son aide, ses facilités, sa disponibilité, ses conseils et l'attention qu'il m'a réservés durant mon stage, et tout au long de mon travail. Qu'il trouve là un vif remerciement.

Je tiens à remercier madame **BLAHOVÁ Drahomíra**, directrice du service Bibliothèque & Archives de l'Université vétérinaire et pharmaceutique de Brno en République tchèque pour l'aide en matériel bibliographique qu'elle m'a procuré tout au long de ma recherche. Soyez sûre de ma sincère reconnaissance (merci/děkuji)

Ma reconnaissance et mes remerciements vont aux jeunes dames **AMAJOUD Nadia** et **OULED-ZIAN Ouissal**, cadres et éminentes laborieuses du laboratoire d'analyses microbiologiques des eaux et des denrées alimentaires de la Commune Urbaine de Tétouan. Votre sérieux, votre compétence et votre sens de savoir et du suivi m'ont énormément marqué.

Ce travail n'aurait vu le jour sans la présence, l'aide et les pertinents conseils de messieurs **BENZAKOUR Mouad** et **MAFTAHI Abdelah**, cadres au laboratoire de l'environnement de la commune de Tétouan. Je suis fier de votre suivi, vos observations et votre coopération. Veuillez trouver mon estime et ma reconnaissance.

Je remercie également tout le personnel du laboratoire de l'environnement et du laboratoire des analyses microbiologiques de la commune de Tétouan, mesdames et messieurs **AOULAD MANSOR Naoual**, **KINANI Asmaâ**, **SADAOUI Darifa** et **BENAZZOUC Abdellah** qui ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail.

Mes remerciements vont à madame le docteur **DIRECTRICE du centre de santé** à Martil, à madame **DERDABI Izzat** docteur directrice du laboratoire des analyses médicales, et à monsieur **BENZAIDI Mohamed** docteur vétérinaire du secteur privé à Martil pour leur coopération et leurs pertinentes informations présentées dans l'enquête parallèle.

Ma gratitude va à vous madame **FDIL Fatiha**, ingénieur directrice du service qualité de l'eau à l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos à Tétouan et à **toute votre équipe** pour l'aide et le matériel que vous m'avez procurés pour les analyses des échantillons de Oued Laou.

Gracias a señor **Paco**, director de la Biblioteca Universitaria de Martil por su acogida y ayuda en el instituto, y su servicio del internet.

Je remercie **tous les gens et propriétaires** des puits à Martil et à Tétouan qui m'ont fait confiance, et m'ont amicalement accueilli dans leurs propriétés, jardins ou domiciles et m'ont présenté volontairement aide, coopération et remarques nécessaires.

*L'insalubrité de l'eau de boisson et l'absence de traitement des eaux usées tuent chaque année des milliers de personnes, dont beaucoup d'enfants.
(Organisation de Coopération et de Développement Économiques, OCDE ; 2008)*

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	II
REMERCIEMENTS	III
TABLE DES MATIÈRES	VI
RESUMÉ	XI
ABSTRACT	XII
LISTE DES FIGURES	XIII
LISTE DES TABLEAUX	XV
LISTE DES ACRONYMES ET ABRÉVIATIONS	XVI
INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
I: ESQUISSE BIBLIOGRAPHIQUE	6
1. PRÉSENTATION DU MILIEU D'ÉTUDE	7
1.1. Situation démographique et socioéconomique	7
1.1.1. Population	7
1.1.2. Situation socioéconomique	7
1.1.2.1. Pêche	8
1.1.2.2. Agriculture	8
1.1.2.3. Activités de commerce et de service	9
1.2. Situation géomorphologique	9
1.2.1. Géologie du bassin versant	9
1.2.2. Pédologie	12
1.2.3. Utilisation du sol	13
1.2.4. Précisions sur la géométrie de l'aquifère	15
1.3. Climatologie	16
1.3.1. Température et précipitations	16
1.3.2. Les vents	21
1.3.3. Évaporation	22
1.3.4. La flore et la faune	23
1.3.5. Autres facteurs climatiques	24
1.3.5.1. Insolation	24
1.3.5.2. Humidité relative	24
1.4. Caractéristiques hydrologiques et qualité de l'eau de la Région	24
1.4.1. Bassin versant de l'oued Martil	24
1.4.2. Oued Martil	26
1.4.3. Piézométrie et régime de la nappe	26
1.4.4. Approvisionnement en eau	28

1.4.4.1. D'où provient l'eau souterraine ?	28
1.4.5. Les puits à Martil	30
1.4.6. L'eau potable de la région	31
1.5. Pollution de l'eau souterraine et problématique de l'assainissement dans la zone d'étude	32
1.5.1. Evénements généraux influençant sur la qualité des eaux souterraines	32
1.5.2. Types de polluants	33
1.5.3. Assainissement : description, état actuel et contraintes	35
1.5.3.1. Notion et principe d'assainissement	35
1.5.3.2. Assainissement liquide à Martil : réalités et contraintes	37
1.5.4. Sources de pollution des eaux souterraines dans la zone d'étude.....	39
1.5.4.1. Oued Martil	39
1.5.4.2. Pollution industrielle	41
• Industrie métallurgique et galvano-technique	41
• Industrie chimique	41
• Industrie de textile	42
• Pollution organique	42
1.5.4.3. Eaux usées et fosses septiques	43
1.5.4.4. Elevage	45
1.5.4.5. Ordures ménagères.....	46
2. RISQUES PATHOLOGIQUES LIÉS A LA POLLUTION DE L'EAU	47
2.1. Notion de risque	47
2.2. Quelques données liées aux maladies hydriques dans le monde et au Maroc	50
2.3. Microorganismes des excréta	54
2.3.1. Virus	55
2.3.2. Bactéries	57
2.3.2.1. Bactéries indicatrices de la pollution fécale	57
a) Coliformes totaux	58
b) Coliformes fécaux	59
c) Streptocoques fécaux	59
2.3.3. Protozoaires pathogènes	60
2.4. Maladies infectieuses à transmission hydrique	61
2.4.1. Généralités	61
2.4.2. Quelques maladies hydriques d'origine virale	61
2.4.2.1. L'hépatite A	61
2.4.2.2. La poliomyélite	62
2.4.2.3. Autres infections virales	62
2.4.3. Quelques maladies hydriques d'origine bactérienne	64
2.4.3.1. Diarrhées et autres gastro-entérites aiguës	64
2.4.3.2. Fièvres typhoïdes et paratyphoïdes	65
2.4.3.3. Choléra	66

2.4.3.4. Salmonellose	67
2.4.3.5. Dysenterie bacillaire	67
2.4.3.6. Campylobactériose	68
2.4.3.7. Yersiniose	68
2.4.4. Quelques maladies hydriques d'origine parasitaire	69
2.4.4.1. Cryptosporidiose	70
2.4.4.2. Giardiose (giardiase)	71
2.4.4.3. Amibiase	71
2.4.4.4. Ankylostomose (ankylostomiase, uncinariose)	72
2.4.4.5. Trichocéphalose (trichocéphaliase, trichuriose)	72
2.5. Épizooties des animaux domestiques liées à la pollution hydrique	74
2.6. Facteurs influençant la diffusion et la survie des microorganismes dans le sol et les eaux souterraines	76
2.6.1. Température	77
2.6.2. Texture du sol	77
2.6.3. pH	77
2.6.4. Teneur en matières organiques	78
2.6.5. Autres facteurs (pluviométrie, compétition)	78
2.7. Contamination de l'eau par des éléments chimiques et son impact sur la santé ...	82
2.7.1. Génotoxicité	83
2.7.2. Cancérogénicité	84
2.7.3. Neurotoxicité	84
2.7.4. Problèmes de reproduction.	84
2.7.5. Effets sur le comportement	85
2.7.6. Cas des pesticides	85
2.7.7. Cas des métaux lourds	86
2.7.8. Cas des produits pharmaceutiques	86
II. ÉTUDE MICROBIOLOGIQUE	88
1. Matériel et méthodes.....	88
1.1. Caractérisation des puits	88
1.2. Campagnes de prélèvements	91
1.3. Analyse de laboratoire : principes et méthodes	92
2. Résultats et discussion	93
2.1. Analyse des résultats au niveau des puits et secteurs	93
2.2. Influence probable de la saisonnalité	101
2.3. Comparaison de nos résultats avec ceux d'autres études	102
2.3.1. A Martil	102
2.3.2. Autres régions du Maroc	103
2.3.3. Dans le monde	104
2.4. Essai de dépistage de pathologies liées à la contamination fécale des eaux de puits dans la commune de Martil	105

3. Conclusion de la partie microbiologique	107
III ÉTUDE PHYSICOCHIMIQUE	108
1. Matériel et méthodes	108
1.1. Campagnes de prélèvements	108
1.2. Analyse de laboratoire (principes, appareillage et méthodes)	108
2. Résultats et discussion	110
2.1. Potentiel d'hydrogène (pH)	110
2.2. Conductivité électrique	111
2.3. Total des solides dissous (TSD)	113
2.4. Salinité	115
2.5. Oxygène dissous	117
2.6. Turbidité	119
2.7. Dureté totale (TH)	122
2.8. Ions calcium	124
2.9. Ions magnésium	126
2.10. Ions chlorures et ions sulfates	128
2.11. Nitrates et nitrites	132
3. Comparaison de nos résultats avec ceux d'autres études	139
3.1. Campagnes de prélèvement à Oued Laou	139
3.2. Autres régions du Maroc	141
3.3. Dans le monde	145
4. Possibilité de présence d'autres substances chimiques dans la nappe de Martil	146
5. Conclusion de la partie physicochimique	148
IV DISCUSSION GÉNÉRALE	149
1. Eaux de la nappe de Martil et potabilité	149
2. Possibilité de production de l'eau potable dans la nappe de Martil	149
3. Prévention et lutte contre la pollution des puits.....	153
3.1. Localisation et hygiène des puits	153
3.2. Désinfection d'un puits	154
3.3. Quantités de désinfectants applicables à un puits de surface	156
4. Attributions des communes locales dans le domaine de la gestion et de la protection de l'eau au Maroc	157
5. Problématique de normes de potabilité	159
V CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS	163
• Au niveau de l'équipement, de la gestion et de la réhabilitation	164
• Au niveau de la recherche	165

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	166
--	-----

ANNEXES (Résultats détaillés des analyses microbiologiques et physicochimiques)	179
--	-----

Tableau annexe 1 : Evolution bimestrielle des concentrations des CT

Tableau annexe 2 : Evolution bimestrielle des concentrations des CF

Tableau annexe 3 : Evolution bimestrielle des concentrations des SF

Tableau annexe 4 : Evolution saisonnière du pH

Tableau annexe 5 : Evolution saisonnière de la conductivité électrique

Tableau annexe 6 : Evolution saisonnière du TSD

Tableau annexe 7 : Evolution saisonnière de la salinité

Tableau annexe 8 : Evolution saisonnière des teneurs en oxygène dissous

Tableau annexe 9 : Evolution saisonnière de la turbidité

Tableau annexe 10 : Evolution saisonnière de la dureté totale

Tableau annexe 11 : Evolution saisonnière des teneurs en ions calcium

Tableau annexe 12 : Evolution saisonnière des teneurs en ions chlorures

Tableau annexe 13 : Evolution saisonnière des teneurs en ions magnésium

Tableau annexe 14 : Evolution saisonnière des teneurs en ions sulfates

Tableau annexe 15 : Evolution bimestrielle des concentrations des nitrates

Tableau annexe 16 : Evolution bimestrielle des concentrations des nitrites

RÉSUMÉ

Au Maroc, la pénurie des ressources en eau est aggravée par la détérioration de leur qualité sous l'effet des rejets polluants liquides et solides. Dans ce contexte, la plaine de Martil, renfermant dans son sous-sol un potentiel hydrique important, subit actuellement une pression anthropique de plus en plus inquiétante. La morphologie et la structure géologique facilitent le transfert des polluants dans le système aquifère. À défaut d'être traitées, les eaux usées de la ville ne sont actuellement (2011) collectées que partiellement et déversées dans la nature sans aucun traitement. Pour évaluer la contamination microbienne et l'état physicochimique de la nappe de la Commune, une étude a été menée durant une année (2010-2011). Un total de 15 puits a été retenu pour des analyses bactériologiques et physicochimiques des eaux souterraines.

Des analyses bimestrielles de coliformes totaux (CT), coliformes fécaux (CF) et streptocoques fécaux (SF), ont été réalisées. L'isolement des germes microbiens a été fait sur des milieux de culture sélectifs selon la technique des membranes filtrantes. Les résultats ont révélé une contamination importante de la nappe phréatique par les dits agents bactériens. Sur les 270 analyses de CT, CF et SF (90 analyses pour chaque groupe de bactéries), 100%, 96,67% et 92,23% respectivement des résultats se sont révélés positifs. Toutefois, les concentrations des indicateurs microbiens suivis diffèrent selon l'emplacement des puits par rapport aux différentes sources estimées de contamination.

Pour les paramètres physicochimiques, ont été déterminés : le pH, la conductivité électrique des eaux, le total des solides dissous (TSD), la salinité, l'oxygène dissous, la turbidité, la dureté totale, les teneurs en calcium, magnésium, sulfates, chlorures, nitrates et nitrites. Ces deux derniers éléments ont été dépistés bimestriellement, tandis que les autres paramètres ont été analysés de façon saisonnière. Les résultats enregistrés pour les nitrates ont varié de 2,39 à 56,88 mg/L, et 20% dépassent la valeur maximale admise (VMA) marocaine (50 mg/L). Concernant les nitrites, les concentrations ont été comprises entre 0,001 et 4,574 mg/L. 16,66% ont été supérieurs à la VMA (0,5 mg/L). L'étude n'a pas révélé d'influence significative de la saisonnalité sur les concentrations des nitrates et nitrites dans la zone d'étude. Pour Les autres paramètres, la conductivité va de 580 à 2937 μ S/cm, la salinité varie entre 0,3 et 1,5 g/L, l'oxygène dissous se trouve dans une fourchette de 0,65 et 6,01 mg/L, les valeurs en ions calcium ont une moyenne de 104,5 mg/L, les teneurs en magnésium ont une moyenne de 80,38 mg/L, les ions chlorures marquent une moyenne de 175,85 mg/L et les teneurs en sulfates ont une moyenne de 150,83 mg/L.

Le travail a conclu que les eaux souterraines de la nappe de Martil sont impropres à la consommation humaine directe. Toutefois, il serait possible de produire de l'eau potable dans quelques secteurs ; mais la problématique de la pollution de toute la nappe ou seulement de quelques secteurs reste posée.

Mots clés :

Indicateurs de la contamination fécale ; paramètres physicochimiques ; eaux souterraines ; eaux usées domestiques ; pollution ; Martil ; Maroc

Influence of urban pollution on microbial and physicochemical quality of groundwater in the aquifer of Martil (Morocco)

Summary

In Morocco, the scarcity of water resources is exacerbated by the deterioration of their quality as a result of liquid and solid waste pollutants. In this context, the plain of Martil, containing in its basement a significant water potential is undergoing anthropogenic pressure increasingly worrying. Morphology and geological structure facilitate the transfer of pollutants in the aquifer system. Failing to be treated, the wastewater of the Martil city are currently and partially collected and discharged into nature without treatment.

To assess the microbial contamination and physico-chemical state of the water of the Commune, a study was conducted during one year (2010-2011). A total of 15 wells was used for bacteriological and physico-chemical analyzes of groundwater. Bimonthly analyzes of total coliforms (TC), fecal coliforms (FC) and fecal streptococci (FS) were performed. Isolation of microbial germs was done on selective culture media according to membrane filter technique.

The results revealed significant contamination of groundwater by bacterial agents. Of the 270 analyzes of CT, CF and SF (90 analysis for each group of bacteria), 100%, 96.67% and 92.23% respectively of the results were positive. However, the concentrations of microbial indicators followed differ depending on the location of wells in relation to different sources of contamination estimated.

Several physico-chemical parameters were determined: pH, electrical conductivity of water, total dissolved solids (TDS), salinity, dissolved oxygen, turbidity, total hardness, the calcium, magnesium, sulfates, chlorides, nitrates and nitrites. These last two elements were screened every two months, while the other parameters were analyzed seasonally. The results recorded for nitrate ranged from 2.39 mg / L to 56.88 mg / L. 20% were above the Moroccan standard (50 mg/L). On nitrite concentrations were between 0.001 and 4.574 mg / L. 16.66% were above the Moroccan standard (0.5 mg/L). The study revealed no significant effect of seasonality on the concentrations of nitrates and nitrites in the study area. For other parameters, the conductivity goes from 580 to 2937 μ S/cm, salinity varies between 0.3 and 1.5 g / L, dissolved oxygen is in the range of 0.65 and 6.01 mg / L the values of calcium ions have an average of 104.5 mg / L, magnesium contents have an average of 80.38 mg / L, chloride ions score an average of 175.85 mg / L and sulphate content have an average of 150.83 mg / L.

The work concluded that the groundwaters of the Martil aquifer are unfit for human direct consumption. However, it would be possible to produce drinking water in some areas. But the problematic of pollution of the whole groundwater or only some areas remains unanswered.

Keywords:

Indicators of fecal contamination; physicochemical parameters; groundwater; domestic wastewater; pollution; Martil, Morocco

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Bassin versant de l'oued Martil ; p 10
Figure 2	Photographie aérienne générale de la Commune Urbaine de Martil ; p 11
Figure 3	Carte lithologique du bassin versant de Martil ; p 13
Figure 4	Graphiques sectoriels démontrant l'utilisation du sol à la commune Martil dans les années 1966, 1997 et 2003 ; p 14
Figure 5	Fluctuations des températures de l'année 2010 à Tétouan ; p 17
Figure 6	Fluctuations des températures de l'année 2011 à Tétouan ; p 17
Figure 7	Carte du bassin versant de Oued Martil ; p 25
Figure 8	Carte piézométrique de l'aquifère de Martil en mars et juillet 1996 ; p 27
Figure 9	Le cycle naturel de l'eau ; p 29
Figure 10	Activités humaines comme sources de contamination des eaux souterraines ; p 33
Figure 11	Principaux composants de l'assainissement ; p 36
Figure 12	Quelques aspects de pollution de oued Martil ; 40
Figure 13	Carte des principaux points noirs de l'assainissement liquide à la zone Cabo Negro de Martil ; p 44
Figure 14	Photographies de quelques sources de pollution de la nappe phréatique de Martil ; p 44
Figure 15	Contamination de l'eau par les microorganismes entéropathogènes issues de production animale ; p. 45
Figure 16	Relation entre l'agent pathogène, l'hôte et les voies de transmission possibles des infections causées par les microorganismes des excréta ; p 49
Figure 17	Mortalité et charge de maladies (en % et en 2002) dues à des défaillances des réseaux d'approvisionnement en eau et d'assainissement et à une hygiène défectueuse en Corée, Mexique, Turquie, OCDE, les BRICS et le reste du monde ; p 51
Figure 18	Types d'agents pathogènes décelés dans les éclosions survenues via la voie hydrique au Canada de 1974 à 2001 (n = 150) (les autres bactéries comprennent <i>Aeromonas hydrophilia</i> , <i>Bacillus cereus</i> , <i>Enterobacter hafniae</i> , <i>E. coli</i> pathogène, <i>Pseudomonas spp.</i> et <i>Staphylococcus aureus</i> ; p 52
Figure 19	Voies de transmission des virus intestinaux humains ; p 56
Figure 20	Situation géographique de la zone d'étude au nord du Maroc avec position des communes de Martil et de Tétouan et emplacement des puits prospectés (Les puits sont désignés de P1 à P15) ; p 88
Figure 21	Emplacement des sources estimés de pollution de la nappe au niveau des secteurs choisis ; p 90
Figure 22	Quelques échantillons de coliformes et SF sur boîte de Pétri (réalisé au laboratoire de l'environnement) ; p 94
Figure 23	Graphiques de concentrations des CT en UFC/100 ml d'eau ; p 96
Figure 24	Graphiques de concentrations des CF en UFC/100 ml d'eau ; p 97
Figure 25	Graphiques de concentrations des SF en UFC/100 ml d'eau ; p 98
Figure 26	Pourcentage de dépassement du seuil de 200 UFC /100 ml pour les CT selon les secteurs étudiés ; p 99

LISTE DES FIGURES (suite)

Figure 27	Pourcentage de dépassement du seuil de 200 UFC /100 ml de CF selon les secteurs étudiés ; p 100
Figure 28	Pourcentage de dépassement du seuil de 200 UFC /100 ml de SF selon les secteurs étudiés ; 100
Figure 29	Pourcentage des échantillons dont les concentrations en SF, CF et CT dépassent 200 UFC/100 ml, selon les saisons sèche et humide ; 101
Figure 30	Evolution saisonnière du pH au niveau des puits prospectés ; p 111
Figure 31	Evolution saisonnière de la conductivité et des teneurs en TSD des eaux des puits prospectés ; p 114
Figure 32	Evolution saisonnière de la salinité dans les puits prospectés ; p 116
Figure 33	Moyennes des concentrations de salinité dans les secteurs étudiés ; p 117
Figure 34	Evolution saisonnière des teneurs en oxygène dissous au niveau des puits prospectés ; p 118
Figure 35	Moyennes des teneurs en oxygène dissous dans les secteurs prospectés ; p 119
Figure 36	Evolution saisonnière de la turbidité au niveau des puits prospectés ; p 121
Figure 37	Evolution saisonnière de la dureté totale (TH) au niveau des puits prospectés ; p 123
Figure 38	Répartition des moyennes de TH au niveau des différents secteurs ; p 124
Figure 39	Evolution saisonnière des teneurs en ions calcium au niveau des puits prospectés ; p 125
Figure 40	Evolution saisonnière des teneurs en magnésium au niveau des puits prospecté. ; p 127
Figure 41	Répartition des moyennes de concentration en magnésium dans les secteurs étudiés ; p 128
Figure 42	Evolution saisonnière des teneurs en chlorures et en sulfates dans les puits prospectés ; p 130
Figure 43	Répartition des moyennes de concentrations en chlorures dans les eaux de puits des secteurs prospectés ; p 131
Figure 44	Répartition des moyennes de concentrations de sulfates dans les eaux de puits des secteurs prospectés ; p 132
Figure 45	Graphiques de concentrations des nitrates ; p 133
Figure 46	Graphiques de concentrations des nitrites ; p 134
Figure 47	Moyennes des teneurs en nitrates dans les eaux des puits des secteurs prospectés ; p 137
Figure 48	Moyennes des teneurs en nitrites dans les eaux des puits des secteurs prospectés, p 138
Figure 49	Carte montrant les secteurs où l'eau souterraine est susceptible d'être exploitée pour la production de l'eau potable (secteurs désignés en bleu) ; p 153

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Précipitations mensuelles dans la région de Tétouan de 1969/1970 à 2010/2011. Agence du bassin hydraulique du Loukkos ; p 19 et 20
Tableau 2	Précipitations annuelles dans la région de Tétouan de 1969/1970 à 2010/2011. Agence du bassin hydraulique du Loukkos ; p 21
Tableau 3	Moyennes mensuelles de l'évaporation à Tétouan durant la période allant de 1953 à 1981 ; p 23
Tableau 4	Quantités de matières fécales excrétées par différentes catégories d'animaux d'élevage ; p 46
Tableau 5	Composition des déchets ménagers à Tétouan ; p 47
Tableau 6	Répartition des décès au Maroc à cause des maladies infectieuses et intestinales durant l'année 2010 en % selon la catégorie d'âge ; p 53
Tableau 7	Evolution du nombre de nouveaux cas de typhoïdes et de l'hépatite virale au Maroc, période 2002-2011 ; p 53
Tableau 8	Incidence de la typhoïde et de la dysenterie dans la ville de Biskra ; Algérie de 1999 à 2003 ; p 54
Tableau 9	Virus intestinaux humains se rencontrant dans l'eau ; p 64
Tableau 10	Classification des <i>Escherichia coli</i> et caractéristiques épidémiologiques de leurs maladies ; p 65
Tableau 11	Bactéries pathogènes opportunistes isolés de l'eau potable ; p 69
Tableau 12	Principaux types de protozoaires potentiellement présents dans les eaux usées urbains, avec indication des maladies qu'ils peuvent provoquer ; p 70
Tableau 13	Espèces de <i>Giardia</i> et leurs principaux hôtes ; p 72
Tableau 14	Principaux types d'helminthes potentiellement présents dans les eaux usées urbains avec indication des maladies qu'ils provoquent ; p 73
Tableau 15	Excrétion de microorganismes entéropathogènes par les animaux domestiques ; p 75
Tableau 16	Facteurs influençant la diffusion des microorganismes dans le sol ; p 79
Tableau 17	Facteurs influençant la survie des bactéries et des virus dans le sol ; p 80
Tableau 18	Temps de survie de certains agents pathogènes après excrétion dans l'eau et le sol ; p 81
Tableau 19	Piézométrie et types d'usage des puits prospectés (de p 1 à p 15) ; p 91
Tableau 20	Impact probable des eaux de puits contaminés sur la santé humaine et animale dans la commune Urbaine de Martil ; p 105
Tableau 21	Concentrations de quelques éléments chimiques analysés au niveau de huit puits prospectés à Oued Laou ; p 140
Tableau 22	Qualité globale des eaux souterraines au Maroc durant l'année 2007/2007 ; p 144
Tableau 23	Principales substances actives des insecticides et raticides employés par la Commune Urbaine de Martil pour les campagnes de démoustication et de dératisation ; p 147
Tableau 24	Quelques éléments physicochimiques et microbiologiques de classification des eaux utilisées pour la production de l'eau potable ; p 150
Tableau 25	Quantité requise d'eau de Javel pour la désinfection d'un puits ; p 156
Tableau 26	Agents chimiques et temps de contact pour rendre l'eau de boisson potable ; p 156
Tableau 27	Comparaison de VMA de quelques paramètres de l'eau potable pour le Maroc, la France et l'OMS ; p 161
Tableau 28	Grille de classification des eaux souterraine selon les critères d'usage de l'ONEP ; p 162
Tableau 29	Classification des eaux par rapport aux normes de potabilité d'après Scholler ; p 162

LISTE DES ACRONYMES ET ABREVIATIONS

ABHL :	Agence du bassin hydraulique du Loukkos
ABHOE :	Agence du bassin hydraulique d'Oum Er-rbia
CDC	Centers for Disease Control and Prevention
CF	Coliformes fécaux
CT	Coliformes totaux
FUM	Forum Urbain Maroc
OD	Oxygène dissous
OIE	Office International des Épizooties
OMD	Objectifs du Millénaire pour le Développement
OMS	Organisation Mondiale de la Santé
ONE	Office National de l'Electricité
ONEP	Office National de l'Eau Potable
PCB	Polychlorobiphényles
PED	Pays en voie de développement
RDE	Régie de Distribution des Exploitations
SF	Streptocoques fécaux
TH	Titre Hydrotimétrique ou dureté totale
TSD	Total des solides dissous
UFC	Unité formant colonie
UNT	Unité Néphélométrique de Turbidité
VMA	Valeur maximale admise

INTRODUCTION

GÉNÉRALE

L'eau est une ressource renouvelable menacée en permanence par des pollutions, généralement, d'origine anthropique dans ses variantes urbaine, agricole et industrielle. L'accès à une eau potable et suffisante est une condition indispensable à la santé, un droit humain élémentaire et une composante clé des politiques efficaces de protection sanitaire.

L'Assemblée Générale des Nations Unies a déclaré la période allant de 2005 à 2015 Décennie Internationale d'Action «L'eau source de vie » (OMS, 2004). Toutefois, en 2012 ; 800 millions de personnes dans le monde n'avaient toujours pas accès à l'eau potable¹, selon la statistique utilisée dans les cadres des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) des Nations unies (DOS SANTOS, 2012).

Concernant les pays méditerranéens, ils sont confrontés, et vont l'être encore plus dans les années à venir, à l'enjeu majeur d'assurer leur croissance économique et la satisfaction des besoins vitaux de leurs populations avec des ressources en eau réduites, et pour certains déjà insuffisantes. Plus de la moitié des pays méditerranéens se trouveront dans des situations de pénurie d'eau structurelles qui risquent d'être aggravées par le fait que dès à présent, une partie des sources d'approvisionnement sont non durables (IME, 2008)

Quant au Maroc, il connaît actuellement une situation de stress hydrique, c.- à -d. moins de 1000 m³/ hab./an, et devrait connaître une pénurie d'eau (moins de 500 m³/ hab./an) après 2025 (TAZI et al., 2001). L'urbanisation croissante et le développement économique contribuent à la dégradation qualitative des eaux souterraines.

La frange littorale de la commune de Martil a vu se développer une urbanisation intense. La conjonction entre croissance résidentielle et touristique, dans un contexte de planification absente ou déficiente, avec un développement rapide de l'habitat clandestin et insalubre en liaison directe avec l'explosion démographique et l'urbanisation accélérée qui le caractérisent, font de Martil un cas d'école en matière de mutations des aires périurbaines littorales et sublittorales dans le Nord-Ouest du Maroc.

Cette réalité ajoutée à un littoral méditerranéen particulièrement fragile et défavorable à une forte concentration urbaine engendre des risques importants de dégradation de la qualité des eaux souterraines.

¹ Eau potable : Eau qui, à l'état naturel ou après traitement, convient à la consommation humaine et répond aux exigences de la législation sur les denrées alimentaires (aspect, odeur et goût, qualité physique, chimique et bactériologique. OFEFP, 2004)

A travers le monde ; Les sources urbaines de pollution des eaux souterraines se trouvent très variés. Elles sont ponctuelles et non ponctuelles. Selon l'Association Canadienne des Eaux Souterraine (ACES, 1999), on peut citer comme sources ponctuelles de pollution : fosses septiques installées sur place, épandage d'eaux usées ou de boues d'épuration, cimetières, décharges municipales, fuites ou déversements d'usines de fabrication, décharges municipales, déchets d'élevage, fuites de réservoirs ou de pipelines et autres. Comme sources non ponctuelles de contamination, il s'agit à titre d'exemple d'engrais utilisés sur les terres agricoles, les pesticides utilisés sur les terres agricoles et dans les forêts et autres (ACES, 1999).

Tous ces produits polluants passent à travers le sol ou via les eaux de ruissellement et rivières pour s'infiltrer vers la nappe phréatique. Les véritables ampleurs et impacts de la pollution urbaine sur les eaux souterraines ne sont pas encore connus, et il est difficile de les déterminer avec précision en raison de la complexité des contaminants, leur transformation et leur devenir dans les nappes. Il est également difficile de prédire leur mouvement dans les eaux souterraines. Les changements climatiques pourraient exacerber les impacts négatifs de la rareté, de la disparité spatio-temporelle et de la forte dégradation qui caractérisent les ressources en eau dans la région étudiée.

Les eaux souterraines de la nappe de Martil sont connues par leur faible piézométrie et par conséquent par la facilité de leur exploitation incontrôlée. En effet, l'absence d'adduction d'eau potable dans quelques secteurs ou chez quelques catégories fragiles de la population pousse cette population à exploiter les eaux de puits pour tous les usages y compris la boisson, incitée dans cela par la gratuité de ces eaux. De plus, et avec la dominance du niveau de vie moyen à faible, on s'attend à l'usage de puits, même en présence d'eau courante.

La consommation alimentaire des eaux souterraines pose la problématique de probables impacts sur la santé des utilisateurs. L'analyse microbiologique et physicochimique de l'eau souterraine est susceptible de nous informer sur la nature et le degré des risques sanitaire et environnemental engendrés par une nappe polluée.

L'importance du dépistage des germes indicateurs de la contamination fécale (CT, CF, SF) découle de la réalité que les eaux contaminées par ces familles bactériennes sont susceptibles d'être contaminées aussi par toute une série d'agents pathogènes viraux, bactériens et parasitaires, et pouvant engendrer de graves épidémies ou épizooties.

Le volet physicochimique propose d'étudier le degré de contamination des eaux souterraines par les nitrates et nitrites. Ces éléments, en dépassant les normes prescrites, sont incriminés dans l'étiologie d'autres maladies, comme le cancer, la méthémoglobinémie et des défaillances dans des processus de la reproduction et de la physiologie hormonale. Les autres éléments physicochimiques nous indiqueraient l'état des lieux des eaux souterraines probablement influencées par la formation naturelle du sol de la nappe et aussi par la pollution anthropique.

Le but de cette étude est d'établir un état de lieu de la qualité bactériologique et physico chimiques des eaux souterraines de la nappe de Martil, et d'évaluer par conséquence l'impact de la pollution urbaine hétérogène sur ladite qualité.

Dans la partie théorique, outre une présentation du milieu d'étude contenant un aperçu démographique, socioéconomique, hydro-géomorphologique et environnemental, on a essayé de chercher dans la bibliographie les risques sanitaires liés à une consommation d'eau polluée par des agents microbiens et chimiques, en mettant l'accent sur les principales maladies hydriques d'origine virale, microbienne et parasitaire. Une partie d'informations bibliographiques a été axée sur l'analyse des facteurs et des conditions aidant à la diffusion et à la survie des agents pathogènes dans le sol et dans les eaux souterraines, et aux mécanismes aboutissant à la contamination de l'homme ou l'animal.

Dans la partie pratique de la thèse, plusieurs axes ont été abordés. Il s'agit de :

- Dépister les principales sources ponctuelles anthropiques de pollution des secteurs et puits prospectés.
- Constater et mesurer la piézométrie des puits choisis.
- Préciser la nature de l'usage de chaque puits par son propriétaire
- Dépister les germes indicateurs de la contamination fécale (coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux). L'étude s'est intéressée à évaluer le degré de contamination de la nappe par les dits indicateurs et constater et analyser l'évolution spatio-temporelle de la contamination au niveau de chaque puits.

Le volet physicochimique avait pour but d'évaluer le degré de contamination des eaux souterraines de la nappe par les nitrates et les nitrites, et essayer de trouver un lien entre les sources estimées de pollution et les concentrations des dits éléments ; dépister les valeurs des autres paramètres physicochimiques et évaluer l'importance de la pollution urbaine sur leurs fluctuations spatio-temporelles dans la zone d'étude. Les éléments

dépistés sont le pH, le total des solides dissous (TSD), la salinité, la conductivité électrique, l'oxygène dissous, la turbidité, la dureté totale, les ions calcium, magnésium, sulfates et chlorures.

L'étude a essayé également :

- D'évaluer la potabilité directe des eaux souterraines des différents secteurs et puits choisis par l'étude ;
- D'analyser la possibilité de production de l'eau potable à partir des eaux souterraines de la nappe de Martil, et d'essayer de localiser les secteurs probablement valables pour cette production.
- De mener une comparaison de la qualité microbiologique et physicochimique des eaux souterraine de Martil avec d'autre régions marocaines, maghrébines et à travers le monde pour donner une idée sur le niveau de pollution des nappes ici et ailleurs.

Finalement, le travail sera récapitulé par une conclusion et des recommandations pour lutter contre la pollution des eaux souterraines, pour une bonne hygiène des puits, pour une prise de conscience environnementale, et la prévention des risques et impacts liés à la pollution urbaine de la nappe de Martil.

I

ESQUISSE

BIBLIOGRAPHIQUE

1. PRESENTATION DU MILIEU D'ETUDE

1.1. Situation démographique et socioéconomique

1.1.1. Population

La Commune Urbaine de Martil s'étend sur une superficie de 33,50 km². La commune est limitée par la mer à l'Est, les municipalités de Mdiq et Tétouan, les communes rurales El Malalyienne et Azla. Son territoire abrite la ville de Martil et de petites agglomérations (Foum El Oullek, Mahjour, Souani, Groura etc.). La topographie se caractérise par deux unités distinctes : La plaine de Martil d'un millier d'hectares, presque entièrement au niveau de la mer et les collines Kodiat Taifor, avec des pentes de 25-30%, un point culminant à 332 m. Le contact avec la mer est constitué de falaises ou de longues et larges plages sablonneuses (KHABALI et al., 2011). Martil compte actuellement (2013) 55 377 habitants en tenant en compte le taux de croissance annuelle de 4,65% déclaré pendant le recensement de 2004.

Parmi quelques caractéristiques démographiques et sociales de la commune, on signale (FUM, 2006) :

Une taille moyenne des ménages de 4,82 ;

Plus de 35% de la population a moins de 15 ans, 60% entre 15 et 60 ans et 5% plus de 60 ans ;

Près de 40% sont célibataires, pour 55% de mariés ;

Le taux de scolarisation dépasse 80%, l'analphabétisme touche 38% (52% de femmes) ;

Le taux d'activité est de 35%, le chômage atteint 16,50% ;

Les salariés constituent 71% des actifs occupés.

Toutefois, la commune est connue par l'augmentation de la population durant la période estivale en dépassant les 300 000 résidents durant les deux mois de l'été, ce qui provoque une forte pression sur les différents services et infrastructure, les services de l'eau potable, de l'assainissement solide et liquide inclus (BMH, MARTIL, 2012)

1.1.2. Situation socioéconomique

La croissance démographique à Martil ne s'est pas accompagnée avant 2006 de création d'emplois en nombre suffisant, ce qui a engendré un fort taux de chômage. Le nombre de

demandeurs d'emploi a été estimé en 2006 à près de 32% de la population active effective ou 10% de la population totale (FUM, 2006).

Le revenu moyen déclaré est de 2480 DH par mois et par ménage, dont près de 68% est consacré aux dépenses d'alimentation et 22% au loyer et/ou à l'entretien du logement. La capacité d'épargne des ménages est donc très faible, voire nulle.

1.1.2.1. Pêche :

Le secteur de la pêche, bien qu'il n'est pas stratégique et peu prometteur dans la zone, reste un secteur important pour la diversification de la production et des sources d'emploi. Il constitue en plus de son apport économique non négligeable, un trait de culture pour les habitants, imprégnant notamment leurs habitudes culinaires. Le déversement en mer des eaux usées sans aucun traitement est à l'origine de la chute progressive des prises et des restrictions, voire interdictions, de pêche de certaines espèces (mollusques) dans la zone, par le ministère des pêches.

Le manque d'un port de pêche et des équipements d'accompagnement est un autre facteur limitatif au développement du secteur. Pourtant un premier projet de port avait été engagé au début des années 90, dans le cadre d'un accord d'échange avec la Roumanie ; les travaux sont interrompus depuis 1996.

D'autre part, le ministère des pêches a créé un point de débarquement aménagé, moins ambitieux que l'ancien projet comportant une digue.

1.1.2.2. L'agriculture :

La plaine de Martil, longtemps connue pour sa production de légumes frais très appréciés de la population de la région, est en constante régression sous l'effet de la pression de l'urbanisation, aussi bien d'utilisation touristique qu'immobilière et principalement non réglementaire.

La réduction progressive de la surface agricole (de 2400 ha dans les années 70, soit 70% du territoire actuel de la commune ; à un millier d'ha actuellement) se répercute évidemment sur la quantité de la production et le taux d'activité dans le secteur agricole, dont la répartition de l'utilisation, selon les types de cultures, était d'après le recensement général agricole de 1996, de 423 ha en céréales, 200 ha en légumineuse et cultures maraîchères, 446 ha en fourrage, 17 ha en plantes fruitières et 446 ha en jachère. Pour l'élevage, le recensement a dénombré un cheptel de 3475 têtes dont les deux tiers sont des bovins.

C'est l'élevage intensif de bovins (production du lait) qui connaît une certaine progression, encouragé par la proximité d'une coopérative laitière dynamique. Les unités de poulets et de poules pondeuses sont également présentes dans la zone. Ce recensement reste actuellement très approximatif à cause de la mutation importante survenue dans la nature de l'exploitation du sol durant la dernière quinzaine d'années (due à l'explosion de l'immobilier surtout)

1.1.2.3. Activités de commerce et services :

L'activité dominante est le commerce (près de 60%), suivie par les services (33% environ). L'artisanat et l'industrie n'occupent dans la structure de l'emploi dans la commune qu'un très faible taux.

1.2. Situation géomorphologique

1.2.1. Géologie du bassin versant

La région de Tétouan où se trouve la zone d'étude est située dans une partie de confluence de quatre unités géologiques distinctes :

Les formations du quaternaire forment la vallée de Martil (zone d'étude proprement dite). Son substratum imperméable est constitué de schistes paléozoïques au nord ouest et marnes bleus partout ailleurs.

Au nord et nord ouest se trouve la chaîne calcaire dénommé Haouz de Tétouan. Cette chaîne se prolonge de Sebta à Tétouan sur une longueur d'environ 40 km et une largeur de 1 à 4 km. Elle est principalement composée de calcaire bruts, de calcaire dolomitiques et de dolomies. A l'ouest et au nord-ouest, la zone des flyschs² qui se compose de terrains divers allant du cénozoïque à intercalations de grès calcaireux et de microbrèches calcaires. Son sommet est composé d'une série marno-gréseuse oligocène (STITOU EL MESSARI, 2002).

Selon HILALI et al. (2003), les niveaux aquifères sont contenus dans les alluvions plioquaternaires et se présentent comme une multicouche composée de deux niveaux aquifères (un aquifère captif et un aquifère phréatique) séparés par un niveau intermédiaire à comportement d'aquitard et/ou d'aquiclude³. L'hétérogénéité des différents faciès formant

² Flysch : Formation géologique composée de débris de grès ou de schistes

³ Aquiclude : Formation rocheuse peu perméable, qui s'oppose au passage de l'eau ou ne la conduit que très lentement

le système aquifère est à l'origine de l'importante diversité des caractéristiques hydrodynamiques de cet aquifère. Les marnes pliocènes forment le substratum de l'aquifère de Martil. Les plus grandes profondeurs du substratum sont localisées à proximité de la ville de Martil et diminuent progressivement au niveau des formations limitrophes de la plaine. L'aquifère intermédiaire à comportement d'aquiclude et/ou aquitard présente une extension spatiale discontinue ; Il montre des épaisseurs maximales de l'ordre de 30 m au niveau de la zone centrale.

Le territoire de la commune de Martil fait partie du littoral de Tétouan, qui constitue le meilleur tronçon de la côte méditerranéenne Nord du Maroc. Un linéaire de près de 50 km d'eau claire et plages sablonneuses avec comme seule interruption la colline boisée de Koudiat Taïfor. Un décor de montagne (la dorsale calcaire) entoure cet ensemble, offrant une variation de paysages et d'attraits et des possibilités de chasse et de randonnées.

Cette situation a permis, dès la fin des années 60, l'installation d'unités d'aménagement touristiques et projets divers, dont certains de renommé, avec marinas et autres équipements d'accompagnement (FUM, 2006). Les figures 1 et 2 présentent respectivement l'emplacement du bassin versant de l'oued Martil et une photo aérienne générale de la commune de Martil.

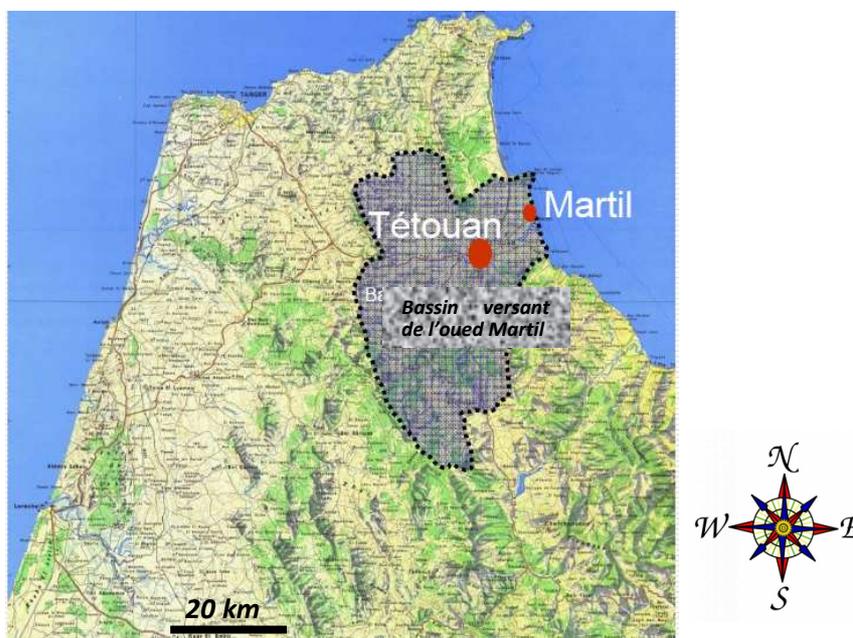


Figure 1 : Bassin versant de l'oued Martil. AUT (2011)



Figure 2 : Photographie aérienne générale de la Commune Urbaine de Martil (FUM, 2006)

Martil dispose en plus de l'atout particulier de la présence, dans ce paysage, d'une petite plaine. Ainsi, les attraits paysagers, la qualité des plages, et la présence d'équipements touristiques importants, permettent, en plus du tourisme balnéaire prédominant, de développer l'écotourisme sur les sites d'intérêts écologique (Koudiat Taifor ou massif de Cabo Negro, lagune Smir..) et un tourisme de découverte du monde marin, de croisière, de visite le long de la côte et de pêche.

La zone d'étude est caractérisée également par des reliefs atténués et la présence de plusieurs lignes de ruissellement avec une pente moyenne de 0,5% dirigée du nord vers le sud. La zone englobe également l'oued el Maleh qui est traversée par un talweg de moyenne importance qui draine un bassin versant d'environ 280 ha (ASTM-TMSA, 2010).

1.2.2. Pédologie

L'aquifère de Martil est localisé dans un éventail de faciès détritiques plioquaternaires (marnes argileuses, sables, conglomérats, graviers). Selon HILALI et al. (2003), Trois niveaux ont été distingués :

- Niveau inférieur représenté, essentiellement, par des sables, graviers et conglomérats.
- Niveau intermédiaire caractérisé par des sables argileux et parfois des argiles ou marnes.
- Niveau supérieur représenté par des sables, graviers et limons.

La totalité de la moitié ouest du bassin versant est dominée par les grès, argiles et calcaires des flyschs mauritaniens avec des « tâches » d'Ebouiiis et solifuxion. La partie Est est plus complexe et est caractérisée par la présence de la dorsale calcaire et une formation de marnes et des sables quaternaires dominant la vallée de Martil. Autres formations lithologiques sont présentes dans la partie Est comme les Grès et conglomérat d'Ametras Bettara, Grès et argile du Prédorsalien et autres. La figure 3 est une carte lithologique du bassin versant de Martil qui précise la nature lithologique des différentes parties et formations du bassin (STITOU EL MESSARI, 2002)

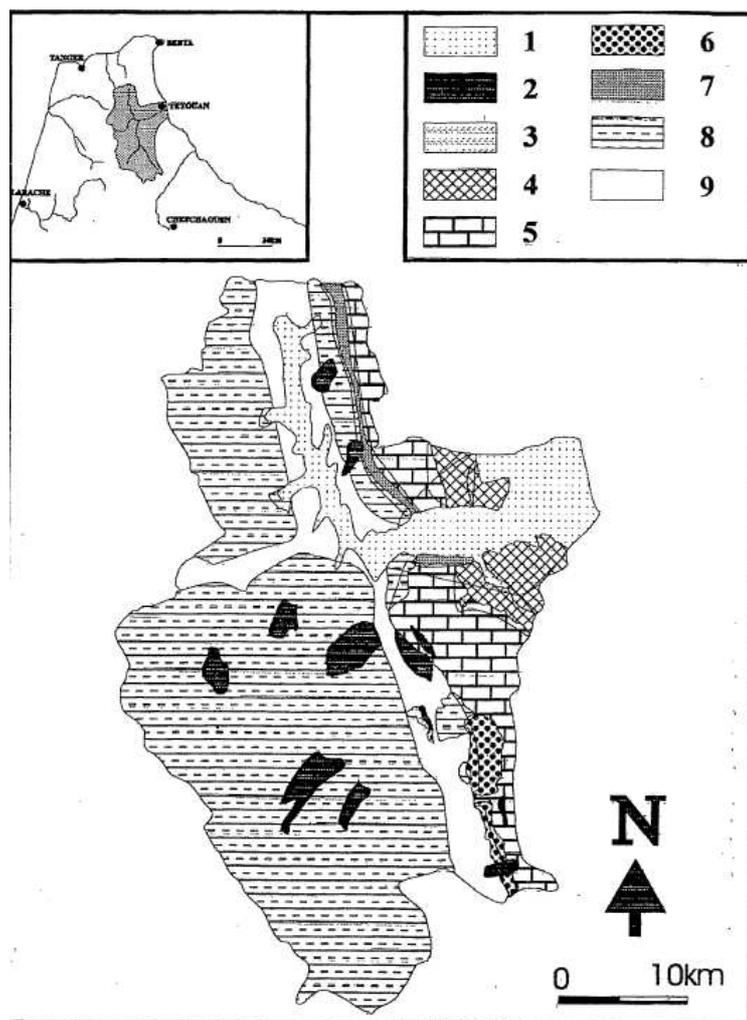


Figure 3 : Carte lithologique du bassin versant de Martil : 1 – Alluvions, marnes et sables quaternaires, 2 – Eboulis⁴ et solifluxion⁵ ; 3 – Retenue de barrage ; 4 – Schistes des nappes ghomarides ; 5 – Dorsale calcaire ; 6 – Grès⁶ et conglomérat d'Ametras Bettara ; 7 - Grès et argile du Prédorsalien ; 8- Grès, argile et calcaires des flyschs mauritaniens. 9 - Marne et argile de Tanger (STITOU EL MESSARI, 2002)

1.2.3. Utilisation du sol :

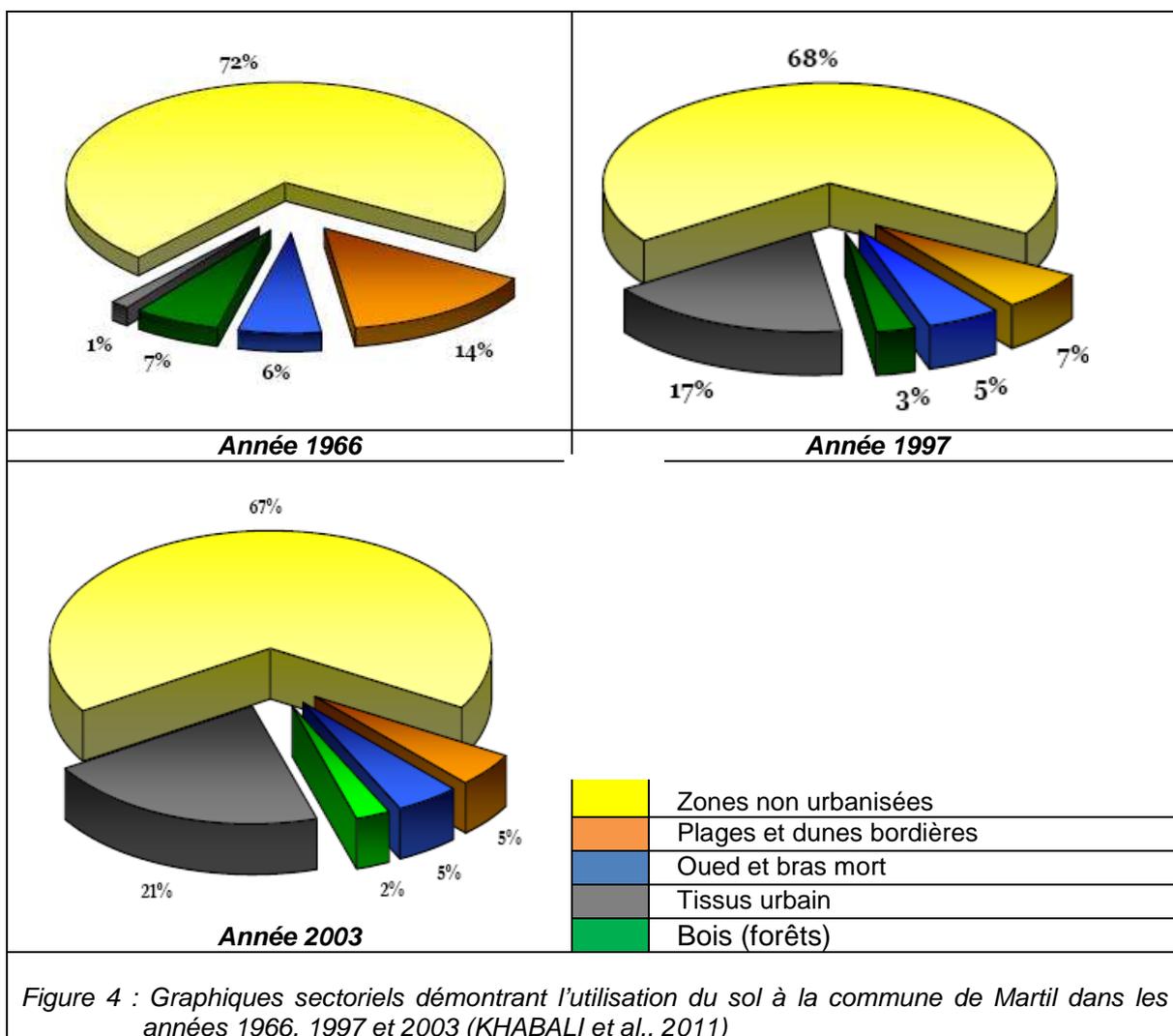
Les grandes utilisations du sol à la commune de Martil donnent un aperçu sur les éventuels impacts sur la nappe. Globalement, le bassin versant de l'oued Martil se divise en cinq catégories d'utilisation du sol. Il s'agit de zones non urbanisées, plages et dunes bordières, oueds et bras mort, zones verte (ou bois) et le tissu urbain. Toutefois, les grandes mutations qu'a connues la commune ont engendré un changement très accéléré

⁴ *Éboulis* : Amas de matériaux éboulés. Décombres, éboulement, écroulement, gravats

⁵ *Solifluxion* : Descente, sur un versant, de matériaux boueux ramollis par l'augmentation de leur teneur en eau liquide.

⁶ *Grès* : Roche sédimentaire siliceuse résultant de la cimentation naturelle d'un sable, et où les grains de quartz sont dominants.

du pourcentage d'utilisation du sol. En 1966, le tissu urbain ne présentait que 1% du total du sol de la commune pour grimper à 17% en 1997 et à 21% en 2003. Cette augmentation se faisait sur le compte de la surface verte et des plages et dunes bordières dont les surfaces en pourcentage ont chuté de 7% à 3% et à 2% pour la surface verte et de 14% à 7% et à 5% pour les plages et les dunes bordières pour les années 1966, 1997 et 2003 respectivement. La surface non urbanisée de la commune de Martil a enregistré une diminution de 72% à 68% et 67% pour les années 1966, 1997 et 2003 respectivement. La figure 4 (KHABALI et al., 2011) illustre le changement brutal d'occupation du sol sur la nappe de Martil en 1966, 1997 et 2003, changement qui ne sera pas sans conséquences négatives sur la qualité de la nappe.



1.2.4. Précisions sur la géométrie de l'aquifère :

Dans la plaine de Martil-Alila, le comportement hydrogéologique peut varier entre mono, bicouche et multicouche. Les niveaux aquifères sont localement séparés par un niveau discontinu. Ce dernier a des épaisseurs qui varient entre 0 et 35 m. c'est dans la partie centrale de la plaine de Martil qu'il prend les valeurs maximales (plus de 30 m), et suivant les différentes directions il s'atténue pour disparaître complètement en amont de la ville de Tétouan (Région de Tamouda) et au nord-ouest de la plaine de Alila (STITOU EL MESSARI, 2002)

Du point de vue de la granulométrie et de l'épaisseur, la formation hydrogéologique supérieure est formée d'un lithofaciès très variable caractérisé par une variation latérale. Le toit du substratum a été dressé et complété par les données fournies par les prospections géophysiques par sondages électriques verticaux effectués dans la plaine d'oued Alila en 1979, et celle de l'oued de Martil effectués en 1990. Ce toit présente une forme assez complexe et irrégulière. Plusieurs ondulations sont visibles, montrant l'existence d'une dépression dans la partie centrale de la plaine de Oued Martil, arrivant à une cote de -75 m. Celle-ci a une orientation WS-NE. Au-delà, plusieurs comportements sont visibles (STITOU EL MESSARI, 2002) :

- Dans le nord, il est moins profond, pour disparaître à Dar Skirej, puis il affleure après avoir gagné de la profondeur.
- Vers le sud, il s'atténue pour affleurer dans la région de Sidi Abdeslam. Vers l'Est, plusieurs ondulations sont visibles ; il perd de la profondeur pour prendre des cotes presque nulles pour affleurer à Tamouda.
- L'épaisseur de « l'horizon supérieure » est très variable et varie entre 0 et 25 m. le remplissage est important au nord de l'aquifère et plus particulièrement au nord de la ville de Martil et du paléochenal E-W. Il se développe selon une direction parallèle au lit actuel de l'oued Alila.

La formation hydrogéologique inférieure est complexe. Son épaisseur varie entre 0 et 30 m, et elle tend à diminuer dans le sens E-W, pour se biseauter vers le côté oriental. Cette formation disparaît dans la partie amont de Tétouan. Les grandes épaisseurs sont atteintes dans le secteur centro-oriental. Elle présente des caractéristiques propres comme la variation latérale de faciès qui passe de graviers en conglomérat. Globalement, ce niveau est considéré comme captif, et il est situé à des profondeurs comprises entre 0 et 25 m.

1.3. Climatologie

1.3.1. Température et précipitations

Le climat de la région d'étude est méditerranéen. Les températures moyennes annuelles sont d'environ 18°C. Les différences entre les maxima et les minima sont de l'ordre de 13°C. Les mois les plus chauds sont juillet et août avec des moyennes respectives de 24,2 et 24,8°C. Les mois les plus froids, janvier et février ont respectivement des moyennes de l'ordre de 12,2 et 12,8°C. (EL BARDAI, 2002).

L'analyse des températures mensuelles durant une période de 28 années (1969/1970-1997/1998) a permis de déduire une moyenne interannuelle de 17,1°C. Leur examen révèle d'importantes variations saisonnières. La température moyenne mensuelle la plus élevée est de 23,7°C en mois d'août, et la plus basse est de 11,17°C au mois de janvier. A l'échelle annuelle, les variations sont relativement importantes. Elles sont de l'ordre de 1,8°C avec un minimum de 16,4°C enregistré en 1972/ 1973, et un maximum de 18,8°C enregistré en 1986/1987.

Selon NABIL (2006), La pluviométrie moyenne de la région se situe autour de 600 mm, irrégulière dans le temps et dans l'espace. Les précipitations moyennes annuelles ne sont inférieures à 400 mm que pour les plaines côtières méditerranéennes à partir de Oued Laou. La tranche pluviométrique 400-600 mm s'étend sur les plaines méditerranéennes jusqu'à Sebta et s'éloigne de la côte progressivement en direction de l'Est. Les plateaux et basses collines reçoivent entre 600 et 800 mm/an. Jbel Ghorghiz et le couloir du haut Smir en direction de Ksar Sghir sont concernés par la tranche 600-800 mm/an. Les isohyètes⁷ paraissent plus fidèles à la topographie que les isothermes⁸. Or, l'altimétrie n'est pas le seul élément déterminant, la pente, la nature de la roche, la tectonique, les formations superficielles et les formations végétales et la continentalité ont leur importance.

Concernant la période d'étude ; l'année 2010 a enregistré des températures minimales et maximales respectivement de 8°C et de 34°C, avec une moyenne de 17,5°C. Durant l'année 2011, les températures minimales et maximales ont été respectivement de 6°C et de 38°C avec une moyenne de 18,2°C. Les fluctuations de températures à Tétouan, comme point météorologique le plus proche à la commune de Martil, durant la période d'étude sont illustrées dans les figures 5 et 6.

⁷ Isohyète : Se dit d'une ligne reliant sur une carte des points qui reçoivent la même quantité de précipitations en une période donnée

⁸ Isotherme : Courbe, ligne isotherme ; Courbe, ligne imaginaire passant par les points du globe où la température moyenne est la même.

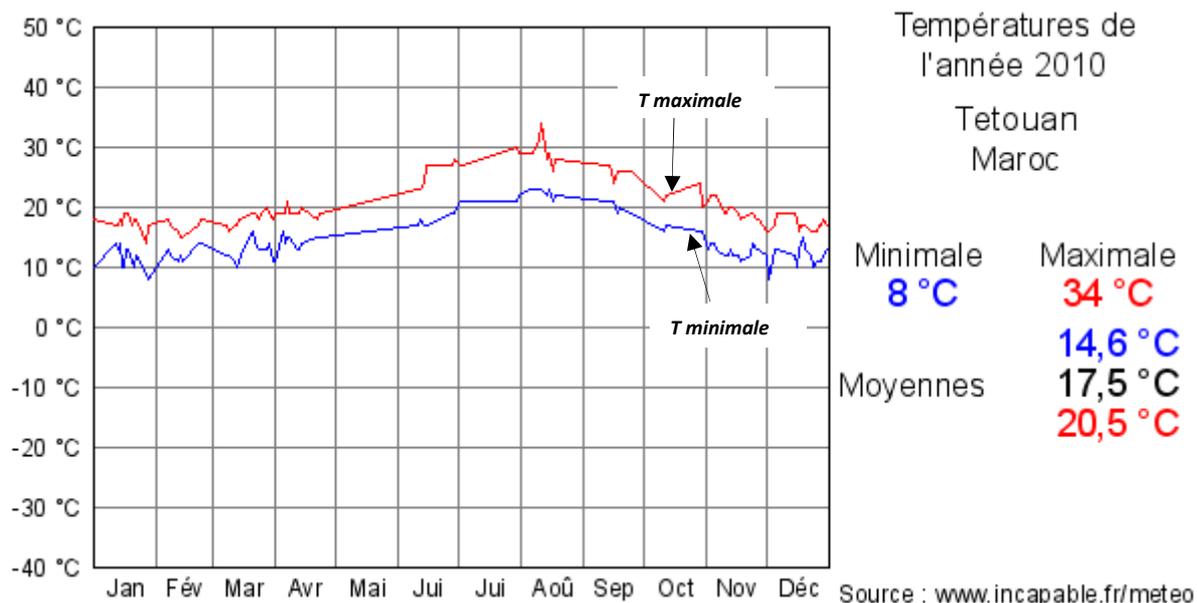


Figure 5 : Fluctuations des températures minimales et maximales et leurs moyennes à Tétouan durant l'année 2010

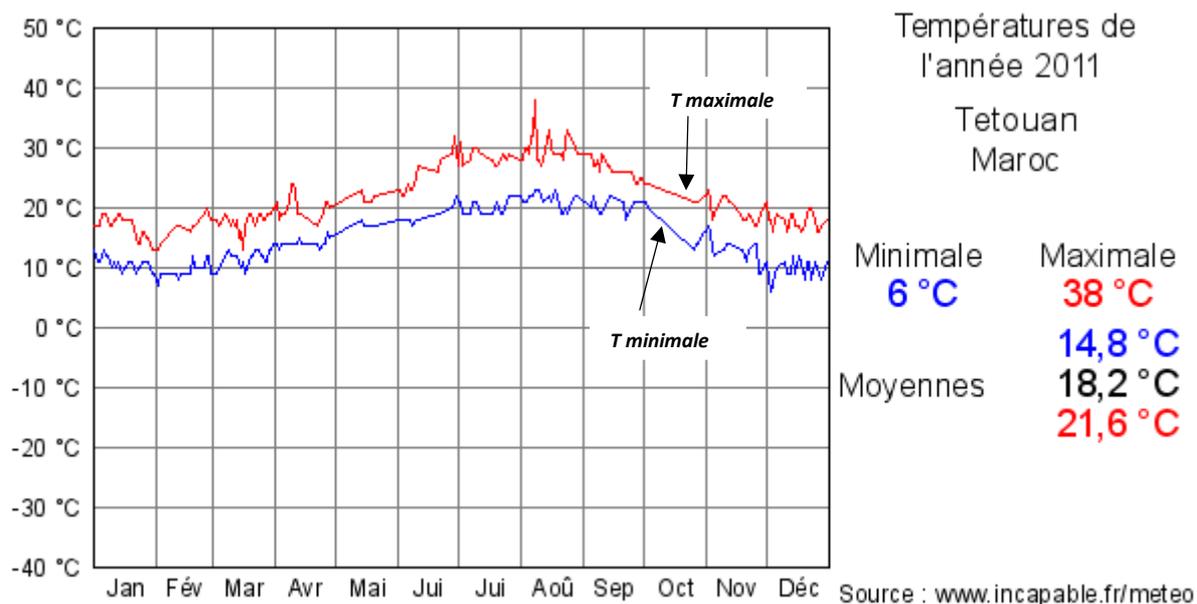


Figure 6 : Fluctuations des températures minimales et maximales et leurs moyennes à Tétouan durant l'année 2011.

Les précipitations dans la zone d'étude quelques années avant notre travail ont été de 580,3 ; 558,8 ; 973,1 et 1153,2 mm durant les périodes humides, et de 126,6 ; 298,8 ; 430,8 et 205,9 mm durant les périodes sèches des années 2006/2007, 2007/2008 ;

2008/2009 et 2009/2010 respectivement (ABHL, 2013). Les tableaux 1 et 2 illustrent respectivement les précipitations mensuelles de 1969/1970 à 2010/2011, et le total des précipitations annuelles dans la région de Tétouan de 1969/1970 à 2010/2011.

Tableau 1 : Précipitations mensuelles en mm dans la région de Tétouan de 1969/1970 à 2010/2011
(Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL, 2013))

ANNEE	Sept	Oct	Nov.	Déc.	Jan	Fév.	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil.	Aout
1969,70						9,1	71,3	40,2	26,6	5,2	0,0	0,0
70,71	3,3	24,3	52,6	113,7	73,0	3,2	155,4	115,8	62,5	13,6	0,0	0,0
71,72	36,2	0,0	44,4	92,5	156,5	89,0	104,9	28,5	33,9	0,0	0,0	0,0
72,73	25,1	129,5	161,8	24,5	30,3	32,0	132,6	38,1	43,7	0,0	5,1	0,0
73,74	0,0	7,7	54,9	140,9	13,7	46,2	31,4	144,4	5,3	7,7	0,0	0,0
74,75	0,0	18,6	9,6	0,0	47,4	119,0	83,0	63,7	26,0	0,0	0,0	0,0
75,76	10,3	72,6	18,0	57,7	24,0	25,0	31,1	35,9	85,7	9,8	0,8	0,0
76,77	4,1	124,3	3,2	244,3	170,0	66,5	21,3	0,0	0,3	8,2	0,0	0,0
77,78	2,3	59,0	40,8	58,0	6,4	58,3	12,0	71,1	34,9	6,2	0,0	0,0
78,79	0,0	18,6	32,6	116,3	117,0	86,1	41,5	27,7	0,0	0,0	0,0	0,0
79,80	7,4	45,1	1,5	20,6	133,2	72,4	61,8	15,1	40,5	9,9	0,0	0,0
80,81	0,0	13,5	78,1	11,5	0,8	27,9	35,3	130,5	35,2	0,0	1,3	12,8
81,82	13,1	24,5	0,0	108,0	56,3	13,0	69,2	37,5	2,6	0,0	0,8	6,6
82,83	6,6	15,1	86,3	25,7	0,0	78,5	17,0	31,3	0,8	0,0	0,0	0,0
83,84	0,0	5,8	127,8	75,8	17,3	36,2	99,3	34,3	144,3	20,2	0,0	4,1
84,85	0,0	1,6	93,3	11,2	58,6	46,9	5,3	25,6	28,3	0,0	0,0	0,0
85,86	0,0	0,0	84,8	48,4	65,9	60,6	80,8	39,7	0,0	0,0	0,0	0,0
86,87	3,8	46,3	44,8	1,8	56,3	50,6	0,8	39,8	0,0	3,3	0,0	9,7
87,88	24,5	53,4	51,6	50,8	46,2	48,4	20,0	16,9	18,3	2,2	0,0	0,0
88,89	0,0	34,6	211,5	7,4	57,0	62,7	36,6	45,7	28,4	0,0	0,0	0,0
89,90	60,0	13,4	120,1	145,6	70,7	2,2	84,5	99,0	9,5	19,0	0,0	0,0

Tableau 1 (suite) : Précipitations mensuelles en mm dans la région de Tétouan de 1969/1970 à 2010/2011
(Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL, 2013))

90,91	0,0	10,7	8,3	122,0	200,7	107,9	52,8	93,6	1,2	15,2	0,0	3,7
91,92	13,8	87,7	11,6	96,6	88,9	39,3	89,3	32,5	6,5	77,5	0,0	1,9
92,93	17,6	46,6	11,0	93,3	14,6	316,5	49,4	49,7	70,9	0,4	0,0	12,6
93,94	7,6	77,4	149,1	21,8	116,1	39,6	7,8	43,2	26,4	0,8	0,0	0,0
94,95	103,7	134,1	34,7	0,2	12,8	6,9	32,4	23,3	3,1	37,9	2,6	0,0
95,96	7,3	105,2	60,2	133,9	323,2	181,4	110,3	36,9	89,7	0,8	0,0	0,0
96,97	22,1	42,4	56,1	362,4	124,1	0,3	16,2	35,2	14,3	4,3	0,5	28,8
97,98	33,4	40,5	152,0	115,9	55,6	172,5	30,4	29,5	58,2	6,5	0,0	0,0
98,99	73,9	6,3	4,6	49,1	170,2	72,7	94,6	19,9	20,5	2,6	0,0	0,3
99,00	29,7	186,7	48,3	39,4	50,2	0,0	14,0	141,5	95,3	2,5	0,0	0,0
2000,2001	28,0	82,4	41,7	213,3	74,3	56,7	30,4	2,0	39,0	0,0	0,0	0,0
01,02	49,0	33,6	68,8	375,5	46,5	41,0	103,5	104,5	34,5	0,0	0,0	0,0
02,03	78,0	69,0	242,0	117,5	139,6	114,8	141,0	89,1	18,8	3,0	1,5	0,8
03,04	1,5	313,5	268,4	243,4	42,2	123,7	71,6	109,6	177,0	0,0	0,0	0,0
04,05	0,8	64,1	29,9	173,5	1,2	306,4	314,1	4,6	8,2	0,0	0,0	8,0
05,06	79,8	240,9	409,3	159,9	132,5	116,3	180,9	143,7	28,1	16,5	5,8	11,2
06,07	6,6	63,6	128,2	122,9	26,9	38,8	109,3	154,2	44,4	0,0	0,0	12,0
07,08	93,8	140,9	185,7	63,2	81,8	113,2	18,3	96,6	54,5	0,2	0,4	9
08,09	45	379,1	151,3	392,6	149,3	159,1	58	62,8	5,5	0,7	0	0,5
09,10	85,2	26,6	44,7	334,5	367,2	159,6	167,7	79,5	41,6	28,8	5,7	18
10,11	18,8	140,8	210,2	233,3	144,5	53,8						
11,12												
12,13					70,2							
Moyenne	24,2	73,2	88,6	117,5	86,9	77,5	70,4	59,3	35,7	7,4	0,6	3,4

Tableau 2 : Précipitations annuelles dans la région de Tétouan de 1970/1971 à 2010/2011. Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (ABHL, 2013)

Année	Total des précipitations	Année	Total des précipitations
1970,71	617,4	91,92	545,6
71,72	585,9	92,93	682,6
72,73	622,7	93,94	489,8
73,74	452,2	94,95	391,7
74,75	367,3	95,96	1048,9
75,76	370,9	96,97	706,7
76,77	642,2	97,98	694,5
77,78	349	98,99	514,7
78,79	439,8	99,00	607,6
79,80	407,5	2000,01	567,8
80,81	346,9	01,02	856,9
81,82	331,6	02,03	1015,1
82,83	261,3	03,04	1350,9
83,84	565,1	04,05	910,8
84,85	270,8	05,06	1524,9
85,86	380,2	06,07	706,9
86,87	257,2	07,08	857,6
87,88	332,3	08,09	1403,9
88,89	483,9	09,10	1359,1
89,90	624	10,11	801,4
90,91	616,1	11,12	

1.3.2. Les vents

Les types de vents sont évidemment liés aux types de courants perturbés qui traversent la zone du détroit de Gibraltar. Ce phénomène est particulièrement évident en hiver où les perturbations dépendent étroitement de deux principaux centres d'action ; l'anticyclone des Açores et la dépression du golf de Gascogne.

Au cours de la saison hivernale, le maximum des Açores est centré sur les îles Canaries ; des vents d'Est humides s'abattent sur la péninsule tingitane ; mais lorsqu'il remonte vers le nord, pour se centrer sur la cote ibérique, la région se trouve exposée

aux vents de nord-est, plus violents généralement. En été, les vents sont réorientés d'une part, en fonction du dispositif général arqué des chaînes rifaines et subbétique et, d'autre part, en fonction des grands éléments locaux du relief (EL GHARBAOUI, 1981).

En juillet et en août, le courant aérien le plus caractéristique est un vent qui souffle par rafale, à une vitesse à 50 km/h, pendant deux ou trois jours successifs, en se reproduisant plusieurs fois par mois. C'est un vent chaud et sec qui entraîne une importante évaporation. Ce courant local trouve son origine précisément dans l'allure arquée des massifs qui bordent le détroit de Gibraltar (EL MORABITI, 1991)

En effet, la présence de deux masses marines, l'océan atlantique et la méditerranée, l'une refroidie par l'action du courant maritime froid, et l'autre chaude, devrait en principe donner naissance à un influx orienté ouest-est. Mais la différence considérable de la température entre le Sahara occidental et la Mauritanie, très chaude, d'une part, et la méditerranée, d'autre part, crée un courant aérien de haute altitude nord-est/sud-ouest (EL GHARBAOUI, 1981). Les vents sont fréquents à Martil, et principalement le vent d'Est (Chergui). Ils peuvent être considérés comme une gêne au développement touristique et cause de sa saisonnalité. Des systèmes de protection ou brises vents, sont à encourager dans les projets d'une certaine importance (KHABALI et al., 2011). Le Chergui est d'origine méditerranéenne. Il souffle, généralement, durant le printemps et l'été. Le Gharbi vient de l'ouest et prédomine en hiver (EL BARDAI, 2002)

1.3.3. Evaporation

L'évaporation comme passage de l'état liquide à l'état gazeux a une influence sur l'état hydrique du sol et dépend essentiellement de trois facteurs climatiques qui sont la température, les précipitations et les vents. L'évaporation est très active en été, parce que dans cette saison de l'année les températures sont élevées et les vents sont violents et de direction nord/est et est/nord/est (SEGUIN et al 2008).

Selon Thornthwaite, L'évapotranspiration désigne la combinaison de l'évaporation et de la transpiration de l'eau par les plantes et on la définit comme « la quantité que va perdre une surface complètement couverte de végétation en croissance active, si à tout moment il existe dans le sol l'humidité suffisante pour son utilisation maximum par les plantes. A titre indicatif, le tableau 3 indique la moyenne mensuelle de l'évaporation à Tétouan durant la période allant de 1953 à 1981(MORABITI, 1991). Les mois où l'évaporation est la plus importante sont les mois d'août et juillet avec des moyennes mensuelles de 169,3

et 168,5 mm respectivement. Les mois où l'évaporation est la plus faible sont janvier et février avec des moyennes mensuelles de 74,4 et 79,1 mm respectivement.

Tableau 3: Moyennes mensuelles de l'évaporation à Tétouan durant la période allant de 1953 à 1981 (MORABITI, 1991)

Mois	Moyenne de l'évaporation (en mm)
Janvier	74,4
Février	79,1
Mars	91,7
Avril	101,4
Mai	125,7
Juin	142,8
Juillet	168,5
Aout	169,3
Septembre	136,1
Octobre	119,7
Novembre	87,5
Décembre	80,7

1.3.4. La flore et la faune

Selon EL BARDAI (2002), la flore et la faune de la commune de Martil sont marquées par le climat de la région. La faune existante dans la zone d'étude est caractérisée par la présence des oiseaux locaux et migrateurs. La flore est constituée par des arbres d'eucalyptus et des pins qui s'étendent du nord au sud. Il est à signaler, toutefois, que la surface verte a connu une détérioration importante à cause des effets naturels mais surtout anthropiques par le bâtiment excessif et non respectant les dimensions des surfaces vertes.

La forte pollution de l'oued Martil a conduit à la disparition des invertébrés normaux, surtout en aval du périmètre urbain. Cependant, il y a une pauvre accumulation d'espèces d'organismes d'invertébrées dans l'oued qui supporte un niveau élevé de pollution comme les tubifex⁹. Néanmoins, il a été observé que le bras mort de l'oued de Martil qui sert actuellement de milieu récepteur des eaux usées de Martil contient des masses

⁹ *Tubifex* : Espèce de ver tubicole de la classe des oligochètes.

flottantes de cyanobactéries. Ces espèces sont caractéristiques des plans d'eau qui sont extrêmement pollués. Elles sont productrices de toxines et d'odeurs nocives. Elles sont généralement considérées indésirables à l'alimentation des animaux aquatiques. (EL BARDAI, 2002)

1.3.5. Autres facteurs climatiques

1.3.5.1. Insolation

Le nombre d'heures de soleil effectif dans la région d'étude est de l'ordre de 2800 h/an. Cette valeur peut être considérée faible si on la compare avec les majeurs du Maroc. Ces faibles valeurs sont dues aux grands états nuageux provoqués par des fronts venus de l'Atlantique, alors que l'insolation reste parmi les facteurs déterminants du taux d'évapotranspiration de cette zone d'étude.

1.3.5.2. Humidité relative :

La valeur moyenne de l'humidité relative est de 73,5%. Elle est relativement élevée si on la compare avec d'autres zones du Maroc. C'est ainsi que les valeurs varient entre 70 et 75% durant toute l'année, sauf les mois où elles peuvent atteindre 85 % (octobre), ou diminuer jusqu'à 61 % (août 1986). (EL MORABITI 1991)

1.4. Caractéristiques hydrologiques et qualité de l'eau de la Région

1.4.1. Bassin versant de l'oued Martil

Les formations géologiques de la zone sont essentiellement constituées par des faciès imperméables ou peu perméables. Seules la chaîne calcaire, les plaines, les vallées alluviales et quelques petits bassins isolés, bénéficient de l'infiltration des eaux de pluie. Ces éléments font que les réservoirs d'eau souterraine de la zone sont limités, à l'exception des unités hydrogéologiques suivantes : la chaîne calcaire, Rhiss-Neckor, Martil-Alila et Oued Laou.

La plaine de Martil-Alila est traversée respectivement dans sa partie septentrionale et méridionale par les oueds Alila et Martil. Ces derniers représentent les principaux cours d'eaux pérennes. Cependant, il existe quelques petits cours d'eaux surtout Chejra, Boussafou, etc. qui n'arrivent parfois à leurs embouchures que lors des crues.

Le réseau hydrographique de l'oued Martil est relativement bien développé. L'Oued Martil qui longe la ville de Tétouan constitue l'aboutissement de trois grands affluents à savoir les oueds El Khémis, Chekkour et Mhejerate. En effet, l'Oued Khémis s'écoule vers le sud jusqu'à rejoindre l'Oued Chekkour qui, après confluence avec l'Oued M'hajerate devient l'Oued Martil (MORARECH, 2002). Ce dernier traverse la plaine en passant aux alentours de la ville de Tétouan. Sa longueur totale est de l'ordre de 22 km, cependant, à travers la plaine littorale de Martil, il ne dépasse guère les 9 km (STITOU EL MESSARI, 2002). La figure 7 illustre l'oued Martil et son bassin versant (ABHL, 2013).

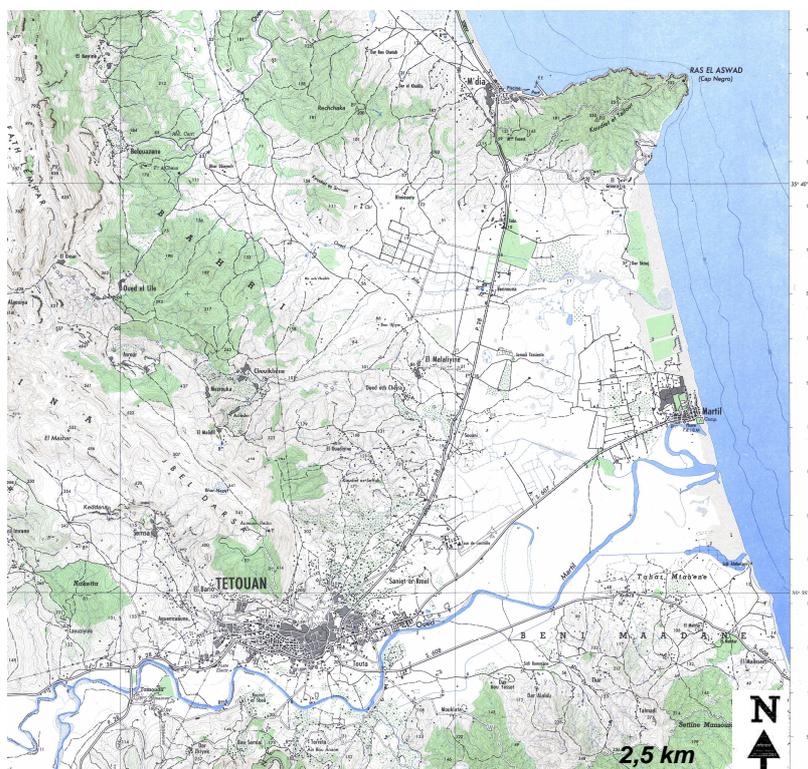


Figure 7: Carte du bassin versant de Oued Martil (ABHL, 2013)

La superficie du bassin versant d'oued Martil est relativement réduite puisqu'elle ne dépasse pas les 1090 km². Le bassin est drainé par l'oued Martil et ses affluents. Les affluents supérieurs se développent dans les massifs de la Dorsale Calcaire, qui assurent une régularisation très partielle des eaux recueillies, ce qui n'empêche pas que l'oued présente un régime torrentiel très prononcé. Les chutes sont importantes du fait de la proximité des montagnes par rapport à la mer.

L'altitude du bassin versant de l'oued Martil varie entre 0 et 1500 m dont 60% de la superficie total possède une altitude comprise entre 0 et 400 m, alors que l'altitude moyenne est de l'ordre de 350 m. Le réseau hydrographique est caractérisé par des cours d'eau de la région méditerranéenne marocaine ; ces derniers sont de très faible envergure si on les compare avec les oueds du versant atlantiques puisqu'ils ont des bassins versants de quelques centaines de kilomètres, et la ligne de partage des eaux est généralement de 30 à 40 km de leur embouchure. La partie amont de l'oued Martil parcourt essentiellement les flyschs Beni Ider, Tizerine et l'unité de Tanger. Après avoir traversé la Dorsale Calcaire, il entre dans les zones paléozoïques côtières. Les affluents pérennes sont tous alimentés par les précipitations et les formations carbonatées grâce à des sources telles que la source de Torreta et Samsa.

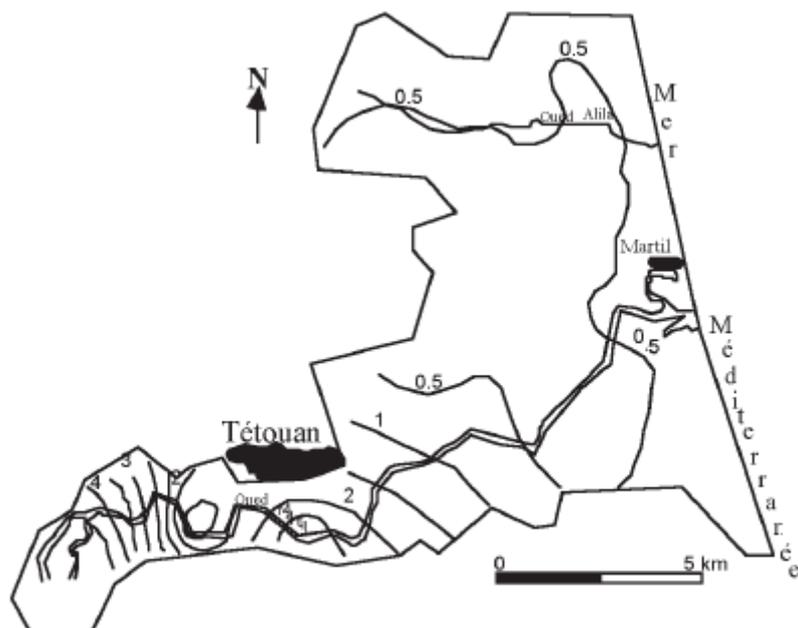
1.4.2. Oued Martil

Les apports de oued Martil sont contrôlés par deux stations de jaugeage, la première situé au niveau de Benkarrich sur l'oued Mhajrat et la deuxième au niveau du pont Torreta contrôlant les oueds Chekkour et Mhajrat. Les débits annuels moyens de oued Martil sont compris entre 2,75 et 47,3 m³/s. Le débit moyen annuel est de 19,2 m³/s. les débits maximums s'enregistrent généralement entre le mois d'octobre et le mois d'avril et peuvent atteindre jusqu'à 1480 m³/s. Les fortes crues montrent des temps de baisse de 15 à 20 heures, et des temps de montées de 5 à 16 heures. Les débits d'étiage de l'oued Martil sont soutenus par la Dorsale Calcaire. La majorité de ces sources sortent des massifs calcaires blancs et se situent à des altitudes entre 140 et 1090 m (STITOU EL MESSARI, 2002)

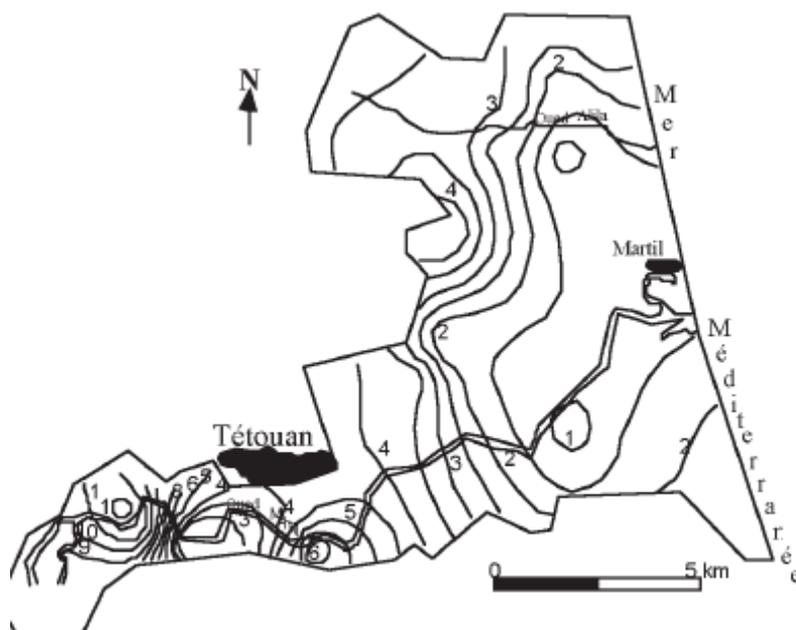
1.4.3. Piézométrie et régime de la nappe

L'analyse de la morphologie de la carte piézométrique du système aquifère de Martil montre que la direction moyenne de l'écoulement est orientée de l'Ouest vers l'Est. Le principal axe de drainage est localisé le long de la vallée de l'oued Martil et apparaît nettement dans la partie sud de Tétouan. L'autre axe de drainage qui se localise au niveau de l'oued Alila est orienté WNW-ESE. Ces deux axes de drainage correspondent vraisemblablement à des paléochenaux alluvionnaires résultant des lits fossiles des cours d'eau respectivement de Martil et Alila. La figure 8 présente les fluctuations piézométriques de l'aquifère de Martil en mars et juillet de l'année 1996 (HILALI et al., 2003). On y peut constater que la piézométrie de la région est faible puisque les points d'eau sont d'une piézométrie variant entre 0,5 m et 4 m. Dans notre étude, on a mesuré

la piézométrie des puits prospectés durant le mois de janvier 2011. La surface libre de l'eau des puits prospectés a varié entre 0 m (l'eau affleure) et 3,10 m (voir la partie pratique).



Mars 1996



Juillet 1996

Figure 8: Carte piézométrique de l'aquifère de Martil en mars et juillet 1996. Selon HILALI et al. (2003)

D'après MORARECH (2002), et en se basant sur les données piézométriques des années 1984, 1988, 1993 et 1998 ; on peut retirer les constatations suivantes :

L'existence d'une seule unité hydrogéologique puisqu'elle ne manifeste aucune ligne de partage des eaux souterraines, ni de limites imperméables à l'intérieur de la plaine. La plus grande partie de la plaine est comprise entre les isopièzes¹⁰ 0 et 4 m. En règle générale, l'écoulement de la nappe se fait selon deux axes principaux dont l'un se situe au Sud le long de l'oued Martil de direction SW-NE, et de l'autre au Nord de direction NW-SE. La convergence des isopièzes et leur espacement augmentent dans le sens de l'écoulement souterrain ; des dépressions avec des cotes inférieures au niveau marin sont visibles immédiatement au Nord de la ville de Martil, dans la partie centro-méridionale de la plaine de l'oued Martil, et en amont de la ville de Tétouan. Les deux premières dépressions sont dues à des pompages locaux alors que la troisième est due aux pompages ONEP dans les forages de Tamouda pour l'administration de l'eau potable à la ville de Tétouan et les centres côtiers ; ce schéma est presque le même pour les deux décades 80 et 90.

Les fluctuations du niveau piézométrique sont très importantes dans les zones d'alimentation et moins dans les zones de drainage avec des moyennes comprises entre 0,3 et 1,4 m (EL MORABITI, 1991 et STITOU EL MESSARI, 1995).

Concernant l'alimentation principale de l'aquifère, L'analyse du bilan hydraulique a identifié qu'elle provient des précipitations et de l'écoulement superficiel du réseau hydrographique, en plus des eaux d'irrigation et les apports latéraux souterraines.

1.4.4. Approvisionnement en eau

1.4.4.1. D'où provient l'eau souterraine?

De façon générale, l'eau souterraine est omniprésente sur le territoire de la commune de Martil. En raison de la faible piézométrie, de la nature, de la répartition géographique et des propriétés hydrauliques des formations géologiques dans lesquelles elle circule, son accessibilité et son utilisation à des fins de consommation et d'exploitation sont très aisées. Il est à noter, cependant, qu'à la région de Tétouan-Martil les possibilités d'obtenir

¹⁰ *Isopièzes : Se dit d'une courbe joignant les points où une nappe aquifère est à la même altitude.*

un puits « sec », c'est-à-dire là où l'eau souterraine est totalement absente après forage, sont pratiquement nulles.

Grâce à la recharge des réserves souterraines par l'infiltration des précipitations dans le sol, l'eau qui y est emmagasinée constitue une ressource naturelle renouvelable et contribue au cycle global de l'eau (cycle hydrologique) à l'échelle de la planète (figure 9).

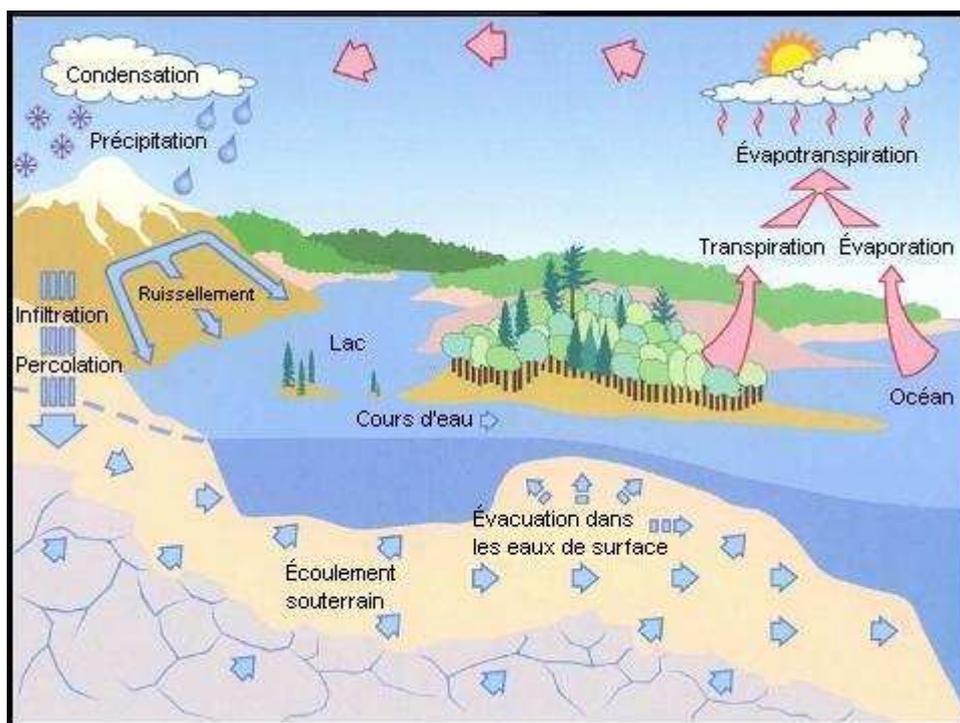


Figure 9 : Le cycle naturel de l'eau (ONTARIO, 2012)

L'eau souterraine n'est pas statique. En vertu du principe des vases communicants, elle traverse, du haut vers le bas, les sols perméables non consolidés (sable, gravier) ou le réseau de fractures du sol consolidé (socle rocheux) pour atteindre un point de résurgence caractérisé par une source ou un cours d'eau de surface. Contrairement à l'eau de surface, l'eau souterraine n'est pas canalisée comme un ruisseau ou une rivière, mais elle circule en profondeur dans les unités géologiques consolidées et non consolidées qui couvrent tout l'espace souterrain. Une fois que l'eau provenant des précipitations s'infiltré dans le sol, elle percole verticalement jusqu'à la zone de saturation (nappe phréatique) et circule alors vers la zone de résurgence naturelle localisée en aval. Cette séquence peut s'étendre sur des dizaines de kilomètres et c'est le long de ce parcours à travers les différentes formations géologiques, appelées formations aquifères,

qu'elle peut être interceptée par des ouvrages de captage qui permettent d'obtenir l'eau nécessaire aux besoins à combler (QUÉBEC, 2002)

1.4.5. Les puits à Martil

Les puits dans la commune urbaine de Martil ont une longue tradition. Ils sont une importante source d'approvisionnement en eau pour leur gratuité et leur facilité d'exploitation. Quoi qu'il n'y ait pas de recensement officiel et précis du nombre de puits dans le territoire de la Commune, cette dernière évalue leur nombre entre 3000 et 4000 puits, dont plusieurs centaines ne sont plus entretenus ni fonctionnels (BMH, MARTIL, 2011). Selon le chercheur NABIL (2009), il y aurait quelques 2000 puits à Martil, et seule la zone de Cabo Negro contiendrait un nombre de 200 puits (NEJJARI, 2007).

Selon NABIL (2009), Le creusement des puits aux quartiers nord de Martil a été surtout entamé durant la décennie 1970 (20,3 % de puits), taux qui reste stable durant les années 1980. Le maximum de 32,2 % (dont 18 % pour Ahrik seul) a été enregistré durant les années 1990, suivi d'une forte chute. Au total, Ahrik détient le plus grand taux de puits (27,6 %), contre un minimum de 8,8 % pour Saquiet Dfel. Les quartiers en question ont connu leur optimum durant les décennies 1960 pour Saquiet Dfel, 1970 pour Catalan, 1980 pour Chbar et El Kabilia et enfin 1990 pour Ahrik.

Concernant quelques caractéristiques des puits à Martil, 56,3 % des puits ont un diamètre de 1 à 1,30 m. Le taux de puits à diamètre égal ou supérieur à 2 m est très infime (0,8 %). La profondeur du puits est une des caractéristiques qui peut lui assurer une certaine protection de l'infiltration des polluants. Par ailleurs, la piézométrie de la nappe est aussi fonction de la saison et de sa pluviosité. Selon certaines références, la majorité de la plaine de Martil a un isopièze de 1 m, exception faite d'une localité autour de la Faculté des lettres de Martil.

La profondeur de la nappe est fonction aussi de la côte superficielle, c'est-à-dire de l'élévation par rapport au niveau Zéro. Cette côte varie d'un quartier à l'autre, et même au sein du même quartier. Elle oscille entre 1 et 5 m. La profondeur des puits dans les quartiers étudiés par le dit auteur présente un taux de 35,6 % de puits ayant une profondeur de 4 à 6 m et 12,3 % pour moins de 2 m. Certains ont déclaré des profondeurs entre 8 et 15 m (7,3 %). Ces profondeurs, selon l'auteur, seraient erronées et trois sources d'erreurs sont possibles : l'intégration de la hauteur de la margelle du puits, l'intégration de la profondeur d'eau et la baisse de la nappe pendant l'été. En effet, sur les

40 puits visités par l'auteur pour échantillonnage, seulement une seule valeur a atteint les 8 m.

La localisation du lieu de lessive et de vaisselles est aussi importante dans le cas d'entourage non/ou moitié imperméabilisé. Dans le cas d'imperméabilisation, l'eau est déversée en émissaire superficiel hors de la maison ou parvient à la fosse (en l'absence de réseau d'assainissement). Selon l'étude de l'auteur ; 69,6 % ont déclaré le lieu de lessive loin du puits (la distance n'étant pas spécifiée), et cette dominance est commune à tous les quartiers étudiés. La proximité du lieu de lessive au puits facilite les tâches ménagères. Ainsi, 72,4 % des foyers ont le lieu de lessive à près de 2 m du puits, contre 17,2 % autour de 4 m, et seulement 3,4 % sont de près de 6 m. Concernant l'emplacement des toilettes ; 15,1 % des foyers ont les toilettes à moins de 3 m du puits contre 18,8 % entre 3 et 5 m puis avec un maximum de 12 à 16 m pour 7,8 % des foyers. Ces toilettes présentent des risques de débordement et d'infiltration en cas de mauvaise canalisation et en l'absence de chasse d'eau.

La contamination du puits à partir des fosses septiques est généralisée à Martil. En principe, si l'aquifère est homogène, son intensité croît en fonction de la distance le séparant de la source de contamination. Le degré d'infiltration est fonction de la granulométrie du filtre. Les puits situés à moins de 5 m de la fosse auront la contamination d'une fosse plus ou moins décantée. Ils représentent 22,3 % des puits des quartiers étudiés par l'auteur (dont 8,9 % à El Kabilia). La majorité des puits sont loin de 5 à 9 m de la fosse septique (45,7 %), et 15 % entre 10 et 14 m (un maximum de 2,4 % est enregistré à Catalan). Le taux d'éloignement de la fosse supérieur à 15 m est très rare, il est de 3,2 % (NABIL, 2009). Comme autres sources de contamination des puits, le chercheur signale l'élevage des animaux domestiques. D'autre part, la désinfection des puits est mal suivie par les propriétaires et les organismes officiels compétents dans la commune de Martil.

1.4.6. L'eau potable de la région

Avant le barrage Smir, Martil était alimenté à partir de quatre ressources : le barrage Nakhla (d'une capacité de stockage d'environ 7 millions de m³ en 1990, réduites depuis par l'envasement), les sources Yarghist et de Torreta et les 3 forages de Tamouda (d'un débit total de quelques 100 l/s en été).

La production annuelle totale a été d'un peu plus de 18 millions de m³ en 1990 pour la zone de Tétouan – Martil, avec une production moyenne par jour de 50194 m³ (578 l/s).

Le barrage Smir, a permis de régulariser 17 millions de m³ par an pour couvrir les besoins en eau potable de toute la côte. De ce fait, l'alimentation de Martil en eau potable ne pose pas problème à moyen terme.

1.5. Pollution de l'eau souterraine et problématique de l'assainissement dans la zone d'étude

1.5.1. Evénements généraux influençant sur la qualité des eaux souterraines

L'hygiène de l'environnement prend une importance de plus en plus grande, en raison des dangers accrus qui la menacent. Les eaux souterraines représentent une partie vitale et très importante de l'environnement ; elles doivent être protégées contre de multiples polluants, d'origines anthropiques surtout. Deux grands facteurs de pollution de l'environnement sont apparus : les agglomérations anarchiques et les usines, et la pollution est d'ordre microbiologique et physicochimique.

La pollution microbiologique, comme on vient de l'analyser dans cette étude dans la nappe de Martil, provient essentiellement des eaux usées et des rejets industriels, et le risque s'est accru considérablement en raison de la croissance d'agglomérations non respectueuses des lois en vigueur. Il est à noter que cette problématique devient de plus en plus difficile à gérer et encore moins à résoudre.

Parmi les événements dangereux qui ont un impact sur les eaux souterraines et doivent être pris en considération lors de l'évaluation des dangers menaçant ces eaux, l'Organisation Mondiale de la Santé évoque (OMS, 2013 b) :

- Les rejets provenant des égouts et des réseaux septiques et les rejets industriels
- L'utilisation de produits chimiques dans la zone de captage (utilisation d'engrais ou de pesticides, par exemple) ;
- Les accès humains (activités récréatives, par exemple) ;
- L'utilisation des terres (élevage animal, agriculture, exploitation forestière, zone industrielle, décharge ou extraction minière);
- Les écoulements et les rejets d'eau de ruissellement ;
- Les décharges ou les sites d'extraction minière actifs ou fermés, les sites contaminés et les déchets dangereux ;
- La géologie (produits chimiques d'origine naturelle) ;

- L'absence de confinement et la faible profondeur d'un aquifère (recueillant notamment des eaux souterraines sous l'influence directe des eaux de surface) ;
- La protection insuffisante des têtes de puits, l'absence de cuvelage ou le tubage inadéquat des puits, ainsi que l'application de pratiques non hygiéniques ; et
- Les variations climatiques et saisonnières (fortes précipitations, sécheresses, etc.) et les catastrophes naturelles.

La figure 10 schématise le passage et l'infiltration des polluants provenant des différentes activités humaines causant la contamination de la nappe.

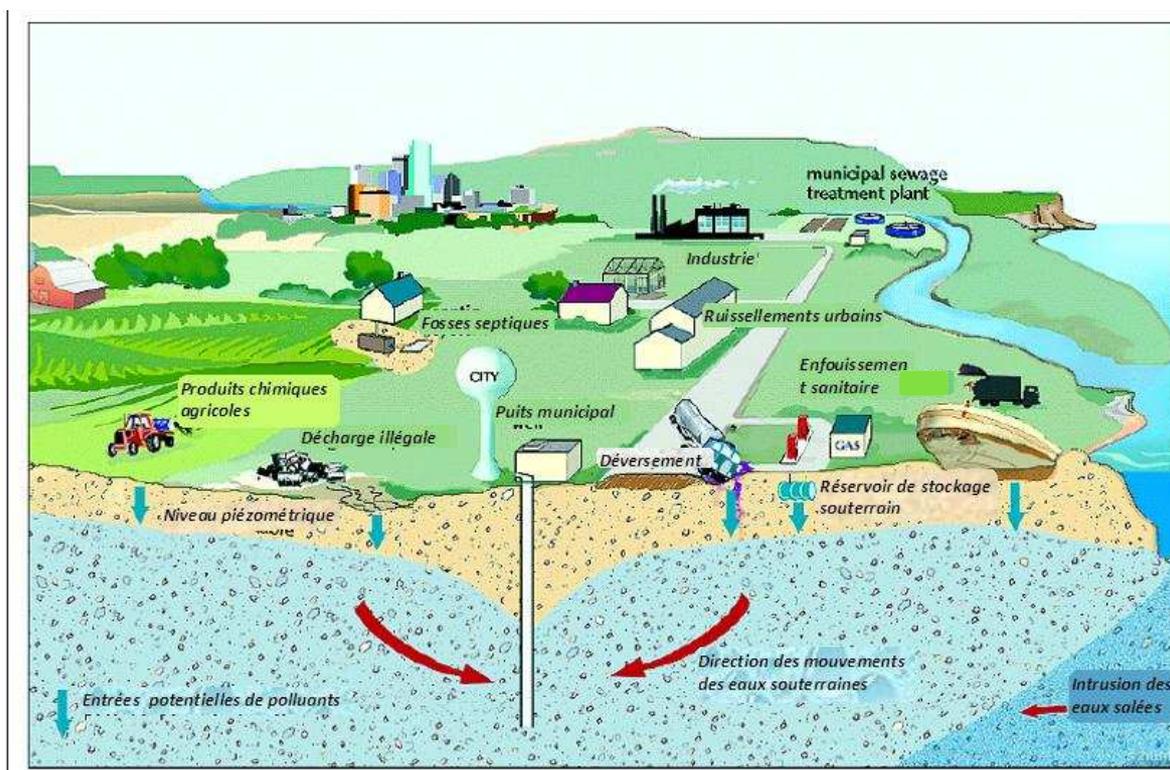


Figure 10 : Activités humaines comme sources de contamination des eaux souterraines (ZAPOROZEC. 2002)

1.5.2. Types de polluants

Au Maroc, de graves menaces pèsent sur la qualité des ressources en eau. Les eaux superficielles constituent l'évacuateur des déchets de tous genres. Ces rejets s'accroissent et menacent le milieu aquatique avec pour conséquence irréversible la perte d'une grande partie de nos ressources en eau. Les eaux souterraines ne sont pas à l'abri de cette pollution due essentiellement à la contamination des oueds et rivières par les polluants urbains, et à l'utilisation abusive des fertilisants et des pesticides en

agriculture, dont une partie est lessivée par les eaux de ruissellement. Sur les 614 captages exploités, au Maroc, par l'Office National de l'Eau Potable (ONEP), 13 % sont exposés à la pollution domestique par déversement des eaux usées dans la nature. Selon AGOUSSINE et al. (2004), la pollution agricole constitue 10 % des menaces existantes au niveau de l'ensemble des captages exploités. La menace des déchets solides a une part de 10 %.

En général, et concernant les polluants qui menacent la qualité des eaux superficielles et des eaux souterraines, il y en a une grande diversité biologique et chimique. Le PARLEMENT EUROPEEN (2000) a dressé les principaux polluants chimiques susceptibles de contaminer les eaux souterraines et superficielles. Il s'agit de :

1. Composés organohalogénés et substances susceptibles de former des composés de ce type dans le milieu aquatique.
2. Composés organophosphorés.
3. Composés organostanniques.
4. Substances et préparations, ou leurs produits de décomposition, dont le caractère cancérigène ou mutagène ou les propriétés pouvant affecter les fonctions stéroïdogénique, thyroïdienne ou reproductive ou d'autres fonctions endocriniennes dans ou via le milieu aquatique ont été démontrés.
5. Hydrocarbures persistants et substances organiques toxiques persistantes et bio-accumulables.
6. Cyanures.
7. Métaux et leurs composés.
8. Arsenic et ses composés.
9. Produits biocides et phytopharmaceutiques.
10. Matières en suspension.
11. Substances contribuant à l'eutrophisation (en particulier, nitrates et phosphates).
12. Substances ayant une influence négative sur le bilan d'oxygène (et pouvant être mesurées à l'aide de paramètres tels que la DBO¹¹, la DCO¹², etc.)

¹¹ DBO : Demande biochimique en oxygène

¹² DCO : Demande chimique en oxygène

1.5.3. Assainissement : description, état actuel et contraintes

1.5.3.1. Notion et principe d'assainissement

L'assainissement est un déterminant clé, à la fois de l'équité dans la société et de la capacité de la société à s'autogérer. Les approches de l'assainissement doivent avoir à l'esprit la ressource plutôt que le déchet. De même, elles ne peuvent être équitables aussi longtemps que la moitié de la population mondiale ne dispose même pas d'un assainissement de base. Un système d'assainissement doit satisfaire, ou au moins tendre à la satisfaction des critères suivants (ESREY, et al., 1998) :

- Prévention de la maladie: un système d'assainissement doit être capable de détruire ou d'isoler les pathogènes d'origine fécale .
- Accessibilité: le système d'assainissement doit être à la portée des populations les plus pauvres du pays, même en régions rurales.
- Protection de l'environnement : un système doit empêcher la pollution, retourner les nutriments vers le sol, et protéger les ressources en eau.
- Acceptation: un système d'assainissement doit respecter les valeurs culturelles et sociales.
- Simple: un système d'assainissement doit être assez robuste pour être facilement entretenu dans les limites de la capacité technique, du cadre institutionnel et des ressources économiques locaux.

Une mise en œuvre réussie de l'éco-assainissement et l'application de ces critères exige une compréhension de l'assainissement en tant que système dont les principaux composants sont la nature, la société, le processus et les dispositifs. Tous ces composants doivent être considérés ensemble :

- Le composant nature : Les principales variables dépendant de la nature sont le climat (humidité, température), l'eau (quantité disponible, niveau de l'eau souterraine), et le sol (stabilité, perméabilité, aptitude à être creusé).
- Le composant processus : Par processus nous entendons les processus physique, chimique et biologique par lesquels les excréta humains sont transformés en produits non dangereux, inoffensifs et utilisables.
- Le composant société : La société comme 3^{ème} composant englobe le type d'habitat, la nature des relations économiques et les coutumes de la société et des individus.
- Le composant des dispositifs : Il comporte les toilettes et les latrines. La figure 11 schématise les principes et composants de l'assainissement selon ESREY S. et al (1998).

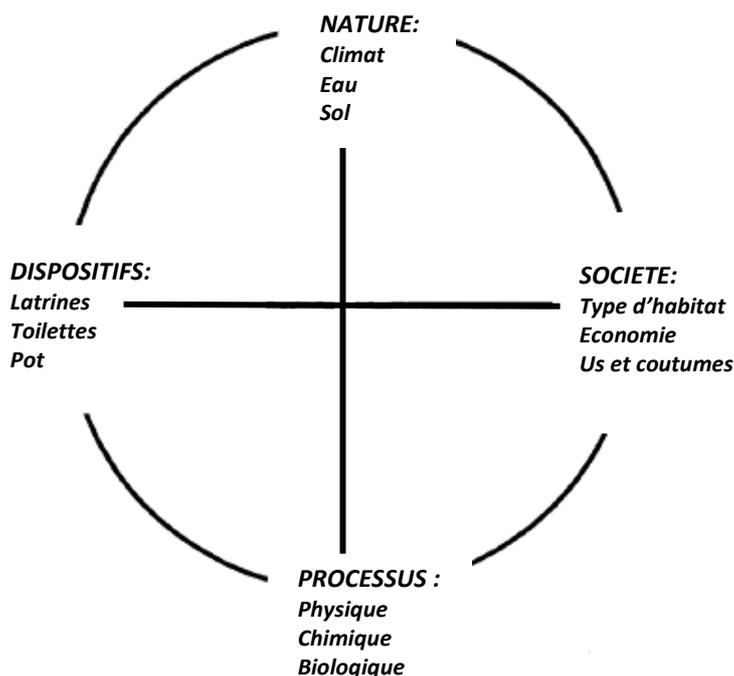


Figure 11 : L'assainissement est un système dont les principaux composants sont la nature, la société, le processus et les dispositifs. Tous ces composants doivent être considérés ensemble (ESREY et al., 1998)

Mettre en œuvre une approche systémique de l'assainissement exige un changement dans notre manière de penser. Nous devons passer de l'approche basée sur la destruction des ordures à une approche ayant pour but une «décharge zéro» et le recyclage. En agissant ainsi, nous protégeons les ressources en eau potable.

Les eaux usées domestiques (rejetées après consommation) contiennent des polluants, notamment organiques. Elles doivent donc être collectées et traitées (assainissement) avant d'être rejetées dans la nature.

Pour une collecte et un assainissement efficaces, plusieurs systèmes de collecte et d'assainissement sont envisageables :

- Le système unitaire qui reçoit dans les mêmes canalisations les eaux usées et les eaux pluviales.
- Le système séparatif comportant deux réseaux de canalisations différents, l'un destiné à la collecte des eaux pluviales de dimensions comparables à celles d'un réseau unitaire, et l'autre destiné à la collecte des eaux usées proprement dites, de dimensions plus réduites. Le système pseudo séparatif est un système séparatif où la canalisation

des eaux usées peut recevoir certaines eaux pluviales provenant de la toiture ou de cours intérieures.

- Le système mixte est un mélange de système unitaire et séparatif qui est installé en fonction des zones urbanisées dans la commune.

Selon le Ministère français de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (MEDDE, France, 2013), Le principe de l'assainissement comporte les étapes importantes suivantes:

- Filtrage pour retirer les déchets solides les plus gros et traitement pour éliminer les graisses et les sables
- Traitements physiques ou physicochimiques pour éliminer les déchets en suspension (traitements « primaires »)
- Traitements biologiques pour éliminer le carbone contenu dans les matières organiques (traitements « secondaires »)
- Traitements biologiques plus rigoureux pour éliminer phosphore et /ou azote, afin de limiter le développement d'algues (eutrophisation)
- Traitement de désinfection pour les eaux rejetées en milieu sensible (eaux de baignade à titre d'exemple)

1.5.3.2. Assainissement liquide à Martil : réalités et contraintes

D'après le plan de développement local de la ville de Martil, deux contraintes physiques majeures à l'assainissement liquide sont à prendre en considération dans la commune : il s'agit primo de la nature friable des sols et les très faibles pentes du terrain, ce qui engendre des problèmes techniques importants ; et secundo c'est la faiblesse de la collecte des rejets liquides et surtout l'absence de leur traitement. Le bras mort d'oued Martil et la lagune d'oued El Maleh sont un autre défi ; car ils sont des dépotoirs/déversoirs pour ordures et eaux-vannes¹³. Les rejets de certaines unités situées hors du territoire Martil (Colainord, zone industrielle) sont des contraintes supplémentaires à la problématique de l'assainissement liquide dans la commune (NEJJARI, 2007).

Selon NABIL (2009), Le non respect du Schéma Directeur d'Aménagement Urbain (SDAU) et le faible recours aux lotissements réglementaires aboutissent à une situation précaire dans les quartiers périphériques (Diza, Catalan, Chbar, Ahrik, El Kabilia, Aghras, Rmilat, Sakiat Dfel, Qods, Oued el Maleh et autres). Cette situation dégage les anomalies

¹³ Eau vanne désigne l'eau domestique qui contient exclusivement les urines et matières fécales.

suivantes : une voirie anarchique et étroite d'une part, ce qui rend très délicate la tâche de restructuration et d'aménagement, et de l'autre part, un réseau d'assainissement défaillant. Cet état précaire de voiries laisse les habitants déverser les eaux usées directement en ruelles.

Selon le chercheur, Le réseau d'assainissement entamé au début des années 1990 a souffert d'énormes problèmes et demeure inefficace en l'absence de station de traitement. Jusqu'aux années 1990, tout habitat nécessitait l'assainissement individuel par fosse septique (une sorte de puits perdu qui communique directement avec la nappe). Le projet d'assainissement de Martil entamé par la Régie de Distribution des Exploitations (RDE) a été avorté malgré la forte contribution des habitants. La société Amendis, devant assurer la relève, n'a pas apporté de solutions efficaces à cette situation aussi difficile.

Cette situation ne restera pas sans conséquences sur la qualité des eaux souterraines, qui sera potentiellement perturbée et polluée. La contamination de la nappe phréatique de Martil par l'urbanisation est l'un des aspects environnementaux les plus problématiques à Tétouan : il s'agit de l'échec de la politique environnementale de la ville, de l'absence de conscience vis-à-vis des impacts de la pollution et de l'absence d'initiatives collectives et/ou privées (NABIL, 2009).

Pour récapituler, quatre contraintes, à effets cumulés, entrent en jeu dans la pollution de la nappe de Martil: l'urbanisation clandestine, l'absence de pente qui peut permettre un drainage gravitaire, la situation au niveau de la mer engendrant une nappe sub-superficielle et la nature meuble des formations superficielles.

Quant à l'état actuel proprement dit de l'assainissement à la commune de Martil, NEJJARI (2007) le caractérise par les traits suivants :

- Existence d'un réseau d'assainissement au niveau de la grande majorité du territoire urbain de la commune.
- Existence de certains projets déversant leurs eaux usées vers la station d'épuration STEP du Golf, puis vers l'oued el Maleh.
- D'autres projets ont un mode d'assainissement local avec des fosses collectives
- Pour le quartier Foum El Oullik, il existe un raccordement au réseau d'Amendis par l'intercepteur venant de la ville de M'dik.
- Au niveau de la zone Cabo Negro, dans la majorité des cas, il s'agit de réseaux séparatifs d'assainissement interne, à l'exception de trois projets qui possèdent un réseau unitaire (Complexe Lina, Golf 1 et Lara Beach).

A cela il faut ajouter des dizaines de centaines de fosses septiques individuelles dans les quartiers informels de Diza et autres. Ces fosses septiques qui ont été prospectées dans notre enquête ne respectent pas le minimum de conditions techniques et sanitaires demandées. Ils communiquent directement avec la nappe comme l'a signalé NABIL (2009).

1.5.4. Sources de pollution des eaux souterraines dans la zone d'étude

Dans la région de Tétouan/Martil, il s'agit surtout des eaux usées, industries chimiques, parachimiques, mécaniques, métallurgiques électroniques et agroalimentaires. La charge de pollution industrielle à Tétouan est estimée à 1929 tonnes de matière oxydable par an (CND - HCP ; 2013)

1.5.4.1. Oued Martil

Selon l'Agence Urbaine de Tétouan (AUT, 2011), La ville de Tétouan est drainée par 18 collecteurs se déversant tous dans l'oued Martil. 15 en rive nord et 3 en rive sud de la rivière (Korret Sbai, Torreta, Coelma). A ces grands collecteurs, il convient d'ajouter oued Samsa, actuellement égout dont le plus grand tronçon est à ciel ouvert du fait de l'intense urbanisation non contrôlée de son bassin versant. Les unités industrielles situées le long de l'oued Martil (papeteries, industrie textile, abattoirs, laiteries, unité électrochimique ...) déversent directement leurs effluents contenant les eaux usées, substances toxiques, carburant, détergents, pesticides et autres polluants dans l'oued sans aucun traitement préalable.

L'oued Martil constitue ainsi le principal réceptacle des eaux usées domestiques et industrielles de Tétouan et Martil. Cette situation de contamination ne sera pas sans conséquences sur la qualité des eaux superficielles de l'oued et des eaux souterraines de tous les secteurs longeant la rivière.

Selon l'étude menée par OUALAD MANSOUR et al. (2009) sur la qualité de l'eau de oued Martil, l'utilisation de la grille de détermination de la qualité de l'oued a permis de conclure que sauf les stations situées en amont de la ville de Tétouan qui présentent une qualité moyenne à bonne, les autres stations ont une qualité mauvaise à très mauvaise. Selon les résultats de l'étude 75% des stations ont des eaux très contaminées, avec des situations de qualité critique à très critique, et les 25% restant ont montré des eaux contaminées, avec des situations de qualité entre douteuse et acceptable.

Cependant, dans le cadre de la concession de l'assainissement de la ville de Tétouan à l'entreprise AMENDIS, une station d'épuration devrait bientôt être fonctionnelle. Alors qu'en amont de la ville de Tétouan, l'eau de l'oued Martil est de bonne qualité. A partir de la ville, sa concentration en oxygène est proche de zéro, et l'eau de la rivière polluée est utilisée pour l'irrigation (AUT, 2011). La figure 12 montre des exemples de rejets sauvages déversant dans l'oued.



Figure 12 : Quelques aspects de pollution d'oued Martil par les déchets ménagers et les eaux usées (AUT, 2011)

1.5.4.2. Pollution industrielle

Selon MORARECH (2002), On peut distinguer trois catégories d'industrie qui provoquent une pollution dangereuse de l'oued Martil et par conséquent de la nappe phréatique :

- ✓ Les établissements à caractère minéral dominant, tels que l'industrie métallurgique ou l'industrie de chimie minérale qui produisent des effluents contenant des matières minérales et des matières en suspension.
- ✓ Les effluents à caractère organique dominant, tels que les rejets des abattoirs ou de l'industrie alimentaire, renferment des matières fermentescibles avec une forte demande biochimique en oxygène.
- ✓ Les rejets mixtes ont des charges polluantes à la fois minérales et organiques, en plus des matières en suspension.

• **Industrie métallurgique et galvano technique :**

Parmi les établissements à caractère minéral à Tétouan on peut citer Torni Soni Antenas (fabrication d'antennes de télévision). Les effluents peuvent être très toxiques et contenir une forte concentration de matières en suspension aussi bien que des produits utilisés au cours des opérations : acide chlorhydrique ou sulfurique, soude, cyanures, détergents, bichromate de potassium, produits organiques de dégraissage.

Les eaux résiduaires d'ateliers galvano techniques renferment comme constituants caractéristiques les substances utilisées pour la confection des bains alcalins de zinc. Elles peuvent contenir environ :

20-35g/L de Zinc (Zn)

30-50g/L de Cyanure (CN)

40-90g/L de Soude (Na OH)

• **Industrie chimique :**

D'après MORARECH (2002), Il y a une seule industrie chimique à Tétouan, Coelma¹⁴ ; mais la pollution chimique peut aussi provenir de l'industrie textile, des tanneries et d'autres petites unités. L'usine Coelma produit :

- Soude caustique par électrolyse avec cathode mercure ;

¹⁴ Coelma : Société électrochimique marocaine (Compania Electroquímica Marroquí s. a.)

- Acide chlorhydrique par combustion de chlore et d'hydrogène
- Chlorure de chaux par attaque de la chaux par le chlore ;
- Phosphate tricalcique (engrais) enrichi par attaque chlorhydrique des phosphates naturels de l'eau de javel (l'hypochlorite de sodium) et Hydrogène gazeux.

• **Industrie de textile :**

La transformation de semi-produits textiles en produits finis dans les fabriques de draps et les teintureries comprend un grand nombre d'opérations de travail par voie humide, produisant des eaux résiduelles d'aspect et de composition très variables. Les eaux résiduelles de teinturerie peuvent contenir :

- Acides organiques et minéraux (acides acétique, formique, oxalique, glycolique, chlorhydrique, nitrique, sulfurique, tartrique et citrique) ;
- Alcalins (soude, carbonate de soude, potasse) ;
- Oxydants (eau oxygénée, peroxyde de sodium, eau de javel, chlorite de sodium, bichromates, perborate de sodium)
- Sels (sulfate de soude, chlorure de sodium) ;
- Réducteurs (hydrosulfite de sodium, sulfure de sodium)
- Colorants ;
- Adjuvants (produits mouillants ou détergents).

• **Pollution Organique :**

Il s'agit surtout de tanneries, d'abattoirs, de déchets ménagers et d'industrie laitière. La laiterie COLAINORD¹⁵ produit des déchets liquides pollués par des traces de lait ; elles renferment donc des flocons d'albumine, des particules de graisses non dissoutes, du lactose dissous et des albumines dissoutes.

Les villes de Tétouan et Martil quoiqu'elles ne soient pas réputées pour leur industrie, elles abritent d'autres unités industrielles qui sont de graves sources de pollution chimique et/ou organique comme Papelera de Tétouan, Régie de tabac et autres.

¹⁵ COLAINORD : coopérative laitière du nord

1.5.4.3. Eaux usées et fosses septiques

Les eaux usées en tant que matériel hautement pollué comprennent les matières fécales et les urines, les eaux ménagères (de cuisine, de toilette, de lavage de linge et de nettoyage des parquets), les eaux industrielles (des usines chimiques, des laiteries, sucreries, abattoirs etc.) et les eaux de ruissellement. Les eaux usées contiennent des germes pathogènes (provenant surtout des matières fécales et des urines), des produits fermentescibles, inflammables, ou toxiques (BLANCER, 1978)

La zone d'étude est caractérisée par un ensemble de points noirs de rejets des eaux usées qui ont un impact direct sur la qualité microbiologique et physicochimique de l'eau souterraine. Un point noir est caractérisé par un ou plusieurs défauts de fonctionnement. Dans son étude sur la situation de l'assainissement liquide dans la zone de Cabo Negro à Martil, NEJJARI (2007) a identifié ces principaux défauts. Il s'agit de :

- Assainissement par fosses septiques non normalisées (Complexe Mouna, Complexe Al-Boustane)
- Rejet à ciel ouvert (Lotissement Golf, Complexe Jardin de Cabo, al-Mahjour)
- Déversement des eaux usées dans un réseau existant mais non fonctionnel (Complexe Mouna)
- Déversement des eaux usées dans le réseau des eaux pluviales (Complexe Club Méd, Complexe Petit Mérrou)
- Déversement vers la mer lors des crues (Oued el-Malah)
- Débordement des eaux usées de la station de relevage SR4 (Complexe Jardin de Cabo)
- Débordement des eaux usées de la station de relevage SR3.
- Réseaux unitaires des lotissements qui déversent vers cette station (Lotissement Golf)
- Débordement des fosses septiques à ciel ouvert pendant la période estivale (Complexe Mouna, Complexe Al-Boustane)
- Infiltration des eaux usées (Complexe Mouna)

A ces graves défaillances relevées par l'auteur, il faut ajouter les rejets directs des eaux usées à l'air libre, débordement des fosses septiques, rejets directs vers le Bras mort au quartier Diza et autres secteurs informels. La figure 13 montre les principaux points noirs de l'assainissement liquide à la zone de Cabo Negro. Quant à la figure 14, elle illustre quelques rejets des eaux usées à Martil relevés pendant l'enquête.



Figure 13 : Carte des principaux points noirs de l'assainissement liquide à la zone Cabo Negro à Martil (NEJJARI, 2007)



Eaux usées à l'air libre. A proximité de l'abattoir municipal de Martil (photo Lamribah)



Effluents de la zone industrielle de Tétouan à l'air libre avant de gagner l'oued Martil

Bras mort (quartier Diza/Martil) (photo Lamribah)

(source : tetouanlacolombeblanche.blogspot.com)

Figure 14 : Photographies de quelques sources de pollution urbaine de la nappe phréatique de Martil

1.5.4.4. Elevage

Les élevages sont des générateurs potentiels de pollution, en particulier, par les déjections produites par les animaux, entreposage des fumures, épandage sur les terres et diffusion horizontale ou verticale dans le sol, rejets de matières organiques, de matières azotées et de phosphore pouvant poser des problèmes de pollution des eaux superficielles et souterraines dans les zones d'élevage intensif. La proportion de microorganismes qui atteignent les eaux à partir des fermes est variable selon de nombreux facteurs relatifs, entre autres, aux microorganismes, au sol, aux conditions d'entreposage et d'épandage. Cette contamination microbiologique est donc un problème complexe. La figure 15 illustre la contamination de l'eau par les microorganismes entéropathogènes issue de production animale. En effet, l'élevage du bovin et l'aviculture produisent du fumier et lisier qui contaminent la nappe par épandage ou infiltration directe des déjections animales en pâturage, ou par fertilisation de la terre par les déchets animaliers.

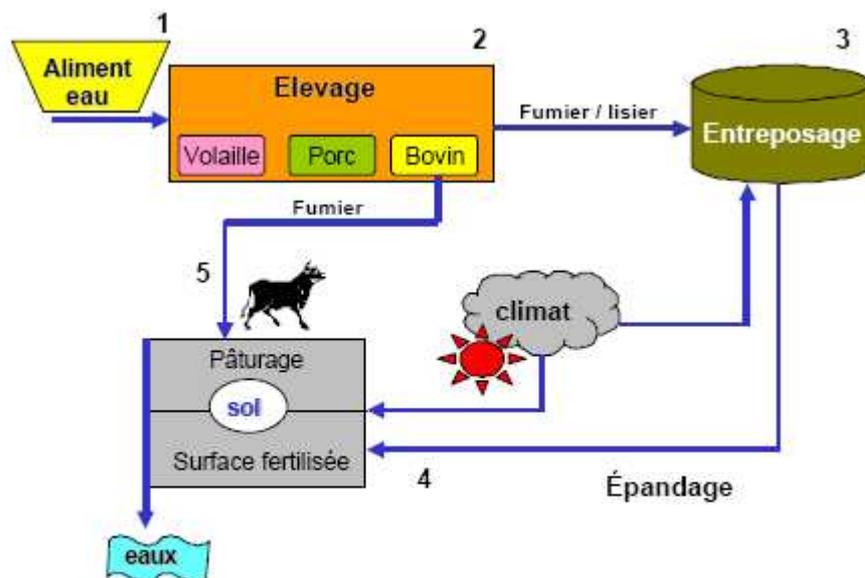


Figure 15 : Contamination de l'eau par les microorganismes entéropathogènes issues de production animales (DE ANDRADE LIMA et al.,2000)

Une fois en dehors des intestins, les bactéries entéropathogènes se retrouvent dans un milieu moins favorable si bien que leur population décroît avec le temps. Le facteur temps est donc un paramètre des plus importants. La population bactérienne est donc maximale au moment de l'excrétion par les animaux, ce qui dépend directement de leurs caractéristiques au niveau de la ferme (nombre, prévalence du microorganisme. etc.). La diffusion des microorganismes au niveau du sol est étroitement dépendante de différents facteurs caractéristiques du sol, des précipitations autant pour le ruissellement que pour la diffusion jusqu'à la nappe phréatique. Le régime des pluies et le temps entre l'épandage et la première pluie sont des éléments variables qui ont donc une grande influence sur la contamination finale des eaux par les fumures des fermes. Le tableau 4 ci-dessous précise la quantité de déchets excrétés par différents types d'animaux d'élevage.

Tableau 4: Quantités de matières fécales excrétées par différentes catégories d'animaux d'élevage (DE ANDRADE LIMA et al.,2000)

Description des catégories animales	Quantité de déchets excrétés (en litre/jour)
Vaches et taureaux laitiers	68
Vaux laitiers d'abattage (0 - 2 mois)	8,86
Génisses laitières (<12 mois)	13
Génisses de boucherie (6 - 18 mois)	8,85 (moins d'un an)

1.5.4.5. Ordures ménagères

La commune urbaine de Martil a produit en 2009 une quantité de 17 666, 21 tonnes de déchets ménagers, dont 5365,85 durant les seuls mois de juillet et août (SCGD, 2010). Aucune étude n'a été faite sur la composition des ordures ménagères de la commune, mais vu la ressemblance entre les villes de Tétouan et Martil en niveau de vie et en coutumes de consommation et de production de déchets, on peut approcher la composition des déchets ménagers de Martil avec celle de Tétouan. Il faut noter que les déchets hospitaliers ainsi que tous les déchets spéciaux sont collectés avec les ordures ménagères. Ces dernières renferment une grande quantité d'eau qui peut varier d'une saison à une autre, et d'une région à une autre. A titre d'exemple, Le tableau 5 présente la composition des déchets ménagers à Tétouan en 2002 selon MORARECH (2002)

Tableau 5 : Composition des déchets ménagers de la Commune urbaine de Tétouan (MORARECH, 2002)

Matière organique	65%	Papier, carton	12%
Verre	3%	Textile et divers	5%
Plastique, caoutchouc	10%	Gravette- sable- terre et autre	4%
Métaux	1%	Humidité	Entre 55% - 65%

2. RISQUES PATHOLOGIQUES LIÉS A LA POLLUTION DE L'EAU

2.1. Notion de risque

« Nous buvons 90 % de nos maladies », disait Louis Pasteur à la fin du XIXe siècle. Ainsi, l'eau peut être le vecteur de nombreuses maladies et de troubles de la santé (qu'elles soient bactériennes, virales, parasitaires ou d'origine chimique).

Selon SALINES (2010), le danger correspond aux effets néfastes qu'un agent peut entraîner, et le risque à la probabilité d'apparition de ces effets, et on sait depuis Paracelse que cette probabilité est fonction du niveau de l'exposition subie: «Tout est poison, rien n'est poison, ce qui fait le poison c'est la dose »

Selon FREDERIC (2005), les mots "risque" et "danger" sont, dans le langage courant, à peu près interchangeables. On retiendra que "risque" a un caractère de malchance, aléatoire, tandis que "danger" a davantage caractère de permanence et de propriété. En santé environnementale et en toxicologie, ces termes ont reçu des définitions plus précises au début des années 1980. Les dangers, dans ce contexte, désignent les effets néfastes qu'un agent chimique, physique ou biologique peut entraîner. Un produit dangereux aura la possibilité de causer de tels effets. On pourra argumenter que tout est dangereux dans une certaine mesure. En fait, le danger, même dans les domaines techniques, est une notion relative et à comprendre « dans les conditions d'usage dont il est question ».

Discuter risque suppose donc que l'on se soit mis d'accord au préalable sur les dangers concernés. La notion de risque suppose aussi qu'il y a eu (ou qu'il y aura) exposition à l'agent causal en question.

Connaissant par exemple le mode de survie des agents pathogènes contenus dans les excréta et le degré de l'élimination de ces agents dans les eaux usées, on peut dans une

certaine mesure évaluer le risque de propagation des maladies transmissibles liées à l'utilisation des eaux souterraines contaminées. On considère qu'il existe un risque potentiel de contracter une maladie quand des micro-organismes pathogènes sont détectés dans les eaux de consommation contaminées, même si aucun cas de maladie causée par ces micro-organismes n'est détecté. Toutefois, un risque potentiel peut ne jamais devenir effectif¹⁶ pour des raisons liées au temps de survie des agents pathogènes, à la dose infectieuse minimale, au comportement humain et à l'immunité de l'hôte.

Pour qu'une pathologie transmissible par voie alimentaire soit réelle, c.à.d. lorsque un organisme en souffre, toute une série de paramètres et de conditions doivent se réaliser dans le processus de son déclenchement et aboutissement. Les voies de transmission des microorganismes au corps humain peuvent être multiples comme l'eau, les cultures viviers, les insectes, le sol, les mains, ou à travers des ustensiles ou des animaux porteurs (bétail, volailles, autres animaux domestiques etc..).

Des rapports techniques de L'OMS (1989) déclarent que les facteurs pathogènes jouent également un rôle important dans la transmission de la maladie comme l'espèce, la souche microbienne, la dose infectieuse et sa concentration avalée par l'homme. Les facteurs liés à l'hôte sont un autre groupe de conditions et de paramètres qui interviennent dans l'apparition ou non de la maladie proprement dite, comme les formes de l'immunité (naturelle ou acquise), l'âge, le sexe, l'état de santé, la nutrition et le niveau de l'hygiène personnelle.

La figure 16 illustre les différentes relations importantes entre agent pathogène, hôte et voies de transmission possibles des infections causées par les microorganismes des excréta.

¹⁶ L'expression « risque effectif » est l'expression couramment employé pour désigner l'excès de risque, le risque attribuable, ou la différence de risque. Le risque effectif correspond à la différence absolue entre deux formes de risques ; par exemple dans le cas de la réutilisation des eaux usées, il s'agit de la différence entre le risque de maladie dans la population exposée et la population non exposée (OMS, 1989).

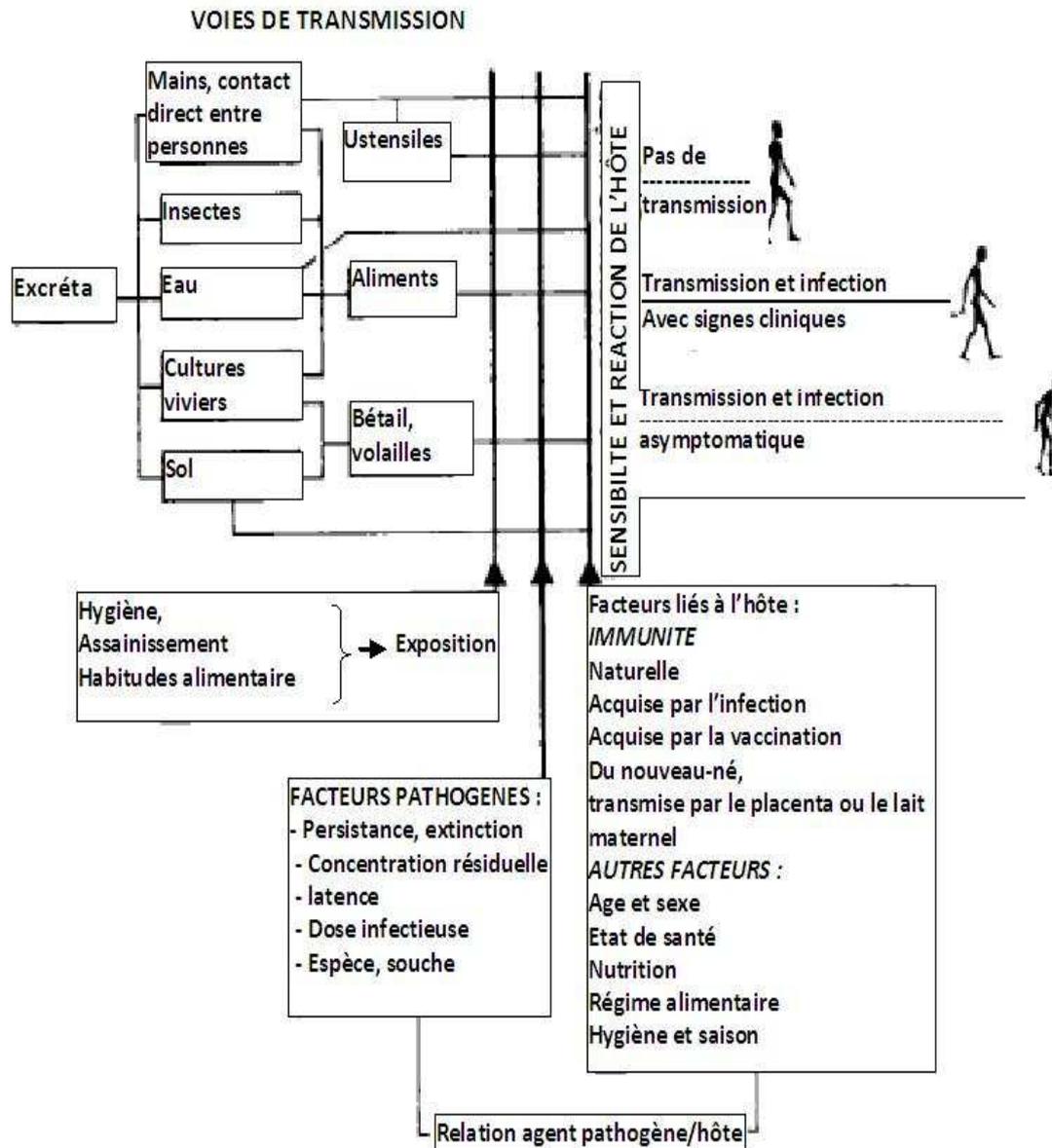


Figure 16 : Relation entre l'agent pathogène, l'hôte et les voies de transmission possibles des infections causées par les microorganismes des excréta (OMS, 1989)

Les conditions d'exposition de l'homme aux facteurs de risque hydrique dépendent des types d'usage de l'eau. La voie d'exposition dominante pour la population est l'ingestion. Elle concerne essentiellement des apports alimentaires, par l'eau de boisson elle-même ou des aliments contaminés par l'eau. L'ingestion involontaire d'eau contaminée peut, éventuellement, intervenir au cours des loisirs ou des sports aquatiques (FESTY B. et al, 2003).

Les agents infectieux hydriques sont des bactéries (saprophytes, opportunistes ou pathogènes), des virus, des parasites, des fungi et des (micro-) algues. Le risque

hydrique microbien est de loin le plus évident à l'échelle mondiale. Pour l'essentiel, il se manifeste à court terme et il est d'origine fécale.

A titre d'exemple, *Giardia lamblia* et *Cryptosporidium spp.* sont deux protozoaires pathogènes d'une grande distribution environnemental, et ils sont des parasites fréquents des systèmes aquatiques. La recherche et le diagnostic de ces agents parasitaires a gagné de l'importance surtout durant les dernières années à cause de leur résistance aux processus et aux produits de traitement des eaux (épuration et potabilisation). Ces deux agents pathogènes ont été classés comme agents émergents engendrant d'importantes pathologies par la voie hydrique (ABREU ACOSTA et al., 2002).

Une situation de risque pathologique ou épidémique devra être sérieusement gérée pour prévenir et lutter contre les maladies et leurs modes de transmission et pour préserver la santé humaine. D'après SEGUIN et al. (2008), la gestion du risque intervient dans la prise de décisions concernant des situations futures incertaines. C'est le processus systématique (pratiques et procédures) qu'adopte une organisation pour gérer les risques auxquels elle est exposée. Il s'agit de fixer une ligne de conduite préférentielle dans un contexte d'incertitude en identifiant les questions de risque, en les évaluant, en les comprenant, en agissant sur elles et en les faisant connaître. Selon ORTH et SANSONETTI (2006), les gestionnaires administratifs et politiques du risque sont confrontés à une double exigence : tenir compte de l'approche scientifique ; et ne pas négliger la perception qu'en a le public. En même temps, la gestion du risque a des conséquences politiques : elle satisfera certains et pourra mécontenter d'autres.

2.2. Quelques données liées aux maladies hydriques dans le monde et au Maroc

L'Organisation de Coopération et Développement Économique (OCDE), révèle que l'eau est une source de problèmes sanitaires dès lors qu'elle est de mauvaise qualité, que l'assainissement est insuffisant et l'hygiène défectueuse. Dans ces conditions, on voit se multiplier les maladies diarrhéiques causées par des bactéries, comme le choléra ou les infections à *E. coli*, les virus, tels que le *Norovirus* ou le *Rotavirus*, ou encore les protozoaires parasites, agents, par exemple, de la cryptosporidiose ou de la giardiose. Le facteur le plus dangereux pour la santé est ici l'insalubrité des eaux de boisson. L'OCDE ajoute que l'insalubrité de l'eau de boisson et l'absence de traitement des eaux usées tuent chaque année des milliers de personnes, dont beaucoup d'enfants. L'Organisation précise que dans le cas de l'eau, les déficiences des systèmes de distribution et

d'assainissement et une hygiène insuffisante sont responsables de 3 % des décès et de 4,4 % de l'ensemble des années de vie perdues à l'échelle de la planète (OCDE, 2008).

La problématique de la contamination par l'eau insalubre n'est pas uniquement un fléau des pays sous développés, mais il touche même les pays industrialisés. La figure 17 illustre, à titre d'exemple, la mortalité et la charge de maladies dues à des défaillances des réseaux d'approvisionnement en eau et d'assainissement, et à une hygiène défectueuse en Corée, Mexique, Turquie, OCDE, les pays des BRICS¹⁷ et le reste du monde en 2002.

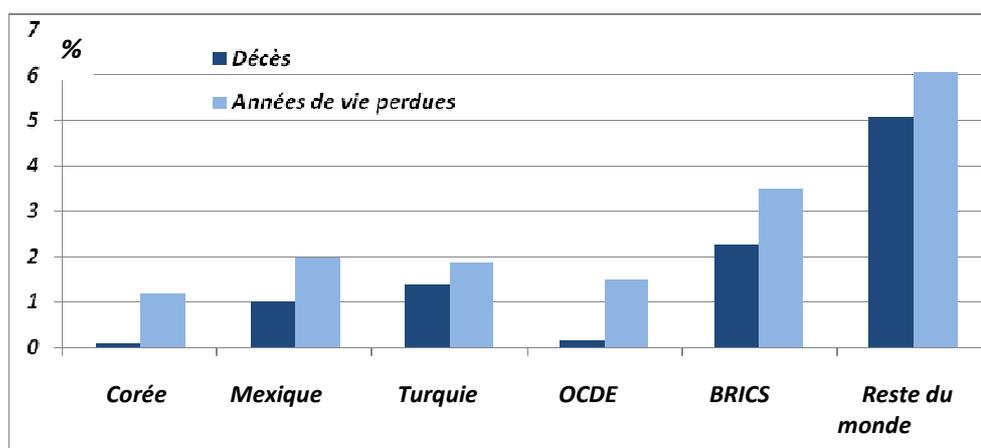


Figure 17 : Mortalité et charge de maladies (en % et en 2002) dues à des défaillances des réseaux d'approvisionnement en eau et d'assainissement et à une hygiène défectueuse en Corée, Mexique, Turquie, OCDE, les BRICS et le reste du monde (OCDE, 2008)

Dans d'autres statistiques, et dans un de ses rapports de l'année 2008, l'OMS estime que l'eau sale est à l'origine de 9,1% des maladies et de 6% des décès enregistrés chaque année dans le monde. Les enfants sont les premières victimes, puisque l'eau est en cause dans 22% des maladies chez les moins de 14 ans. Il y a une forte inégalité entre les pays riches et les pays pauvres : l'eau est à l'origine de moins de 1% de la morbidité dans les pays développés, cette proportion atteint 10% dans les pays en voie de développement (PED). Le chiffre des décès varie de 0,5% pour les pays développés à 8% pour les PED. Chez les enfants, l'eau sale est responsable d'un quart des décès.

¹⁷ BRICS : Brésil, Russie, Inde, Chine et Afrique du Sud

En 2009 ; 2,6 milliards de personnes, soit la moitié de la population des PED, n'avaient pas accès à une latrine, et 1,1 milliard de personnes n'avaient aucun accès à une source d'eau salubre. La conséquence directe est que 1,6 million de personnes meurent chaque année de maladies diarrhéiques, dont 90% sont des enfants de moins de cinq ans, vivant pour la plupart dans les PED (AUBRY et GAÜZERE, 2011)

Au Canada par exemple, comme pays développé, plusieurs études se sont intéressées aux maladies transmissibles par l'ingestion de l'eau. Ainsi, plusieurs pathologies sont survenues à cause de la contamination de l'eau comme l'hépatite A, campylobactériose, giardiose, cryptosporidiose, salmonellose etc. La giardiose vient en tête avec une proportion de 33%, la campylobactériose et la salmonellose viennent en deuxième et troisième position par 16% et 11% respectivement. Les autres maladies sont également représentées par des chiffres non négligeables. SEGUIN et al. (2008) présentent dans la figure 18 une répartition des agents pathogènes des maladies d'origine hydrique survenues au Canada de 1974 à 2001.

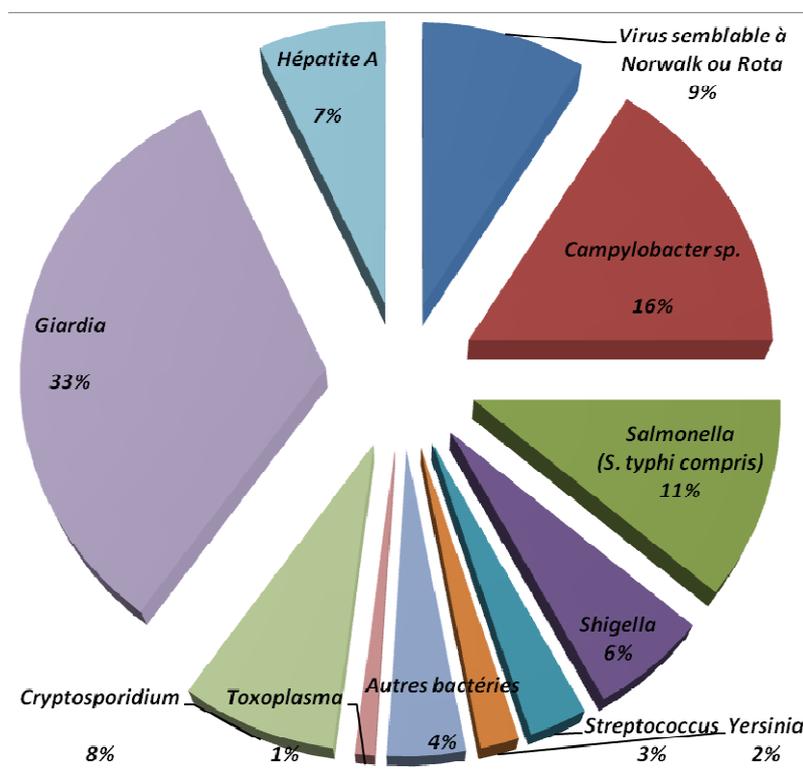


Figure 18 : Types d'agents pathogènes décelés dans les éclosions survenues au Canada de 1974 à 2001 (n = 150) (les autres bactéries comprennent *Aeromonas hydrophilia*, *Bacillus cereus*, *Enterobacter hafniae*, *E. coli* pathogène, *Pseudomonas spp.* et *Staphylococcus aureus*) SEGUIN et al. (2008)

Le Maroc n'est pas épargné par la pathologie des maladies transmissibles par l'eau. Quoique cette famille de pathologies ne soit pas nettement identifiée en tant que catégorie dans les statistiques officielles, ce groupe de maladies est classé parmi la catégorie des maladies infectieuses et intestinales.

Les décès totaux par cette dernière catégorie de maladies [infectieuses et intestinales] au Maroc sont de 0,3% chez l'homme et 0,3% chez la femme en 2010. Cette incidence s'élève à 0,5% et 1,9% chez les enfants de moins d'un an et les enfants entre 1 et 4 ans respectivement. L'incidence de décès à cause de maladies infectieuses et intestinales est de 0,8% chez les enfants de 5 à 19 ans (MS MAROC, 2012). Le tableau 6 illustre la répartition des décès à cause des maladies infectieuses et intestinales durant l'année 2012 selon le ministre de la santé au Maroc.

Tableau 6 : Répartition des décès au Maroc à cause des maladies infectieuses et intestinales durant l'année 2010 en %, selon la catégorie d'âge. (MS-MAROC, 2012)

Tranches d'âge de patients décédés	Répartition en %
Décès des enfants de moins d'un an	0,5%
Décès juvéniles (1- 4 ans)	1,9%
Décès des enfants âgés de 5-19 ans	0,8%
Total des décès	0,3%

L'évolution du nombre des nouveaux cas de typhoïde et de l'hépatite virale au Maroc durant la période 2002-2012, répertoriée dans le tableau 7, montre que les incidences de la typhoïde et l'hépatite virale, comme maladies pouvant être transmises par l'eau, ont connu une diminution importante durant la dite décennie. Les nouveaux cas de la typhoïde ont passé de 1697 en 2002 à 690 en 2007 pour chuter à 350 en 2011. L'incidence de l'hépatite virale a diminué de 2097 en 2002 à 994 en 2007 pour se stabiliser à 316 cas en 2011.

Tableau 7 : Evolution du nombre des nouveaux cas de typhoïdes et de l'hépatite virale au Maroc durant la période 2002-2011 (MS MAROC, 2012)

Années	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
Typhoïde	1697	1577	1265	1497	777	690	626	436	417	350
Hépatite virale	2097	2391	1354	872	1376	994	634	484	315	316

L'incidence de la typhoïde et de la dysenterie bactérienne comme maladies à transmission hydrique dans la ville de Biskra en Algérie durant la période allant de 1999 à 2003 (tableau 8), montre une diminution du nombre de cas de la typhoïde chutant de 31 cas en 1999 à 08 cas en 2003 et une instabilité de la prévalence de la dysenterie.

Tableau 8 : Incidence de la typhoïde et de la dysenterie dans la ville de Biskra en Algérie de 1999 à 2003 (GUERGAZI et ACHOUR (2005)).

Maladies	1999	2000	2001	2002	2003
Typhoïde	31	25	27	04	08
Dysenterie	08	09	12	00	-

Si on ne parvient pas à garantir la salubrité de l'eau de boisson, la communauté court le risque de subir des flambées épidémiques de maladies intestinales ou autres pathologies infectieuses. Les flambées de maladies véhiculées par l'eau sont à éviter, tout particulièrement en raison de leur capacité à toucher simultanément un grand nombre de personnes.

Afin de lutter contre les maladies transmises par l'eau, il est nécessaire de:

- S'approvisionner en eau salubre et d'observer les règles et pratiques d'hygiène personnelle et collective prescrites;
- Construire les latrines loin des points d'eau dans les zones non équipées d'infrastructure d'assainissement.
- Se laver les mains après chaque défécation.

2.3. Microorganismes des excréta

Les fèces humaines consistent principalement en une matière organique non digérée. La quantité totale par personne et par an de matières fécales est de 25 à 50 kg, contenant jusqu'à 0,55 kg d'azote ; 0,18 kg de phosphore et 0,37 kg de potasse. Bien que les fèces contiennent moins de nutriments que les urines, elles ont une valeur pour l'amélioration du sol (ESREY et al., 1998).

Des virus, des bactéries, des protozoaires et des helminthes pathogènes passent dans les excréta des personnes infectées et peuvent être transmis par voie orale (par

consommation de l'eau ou de légumes contaminés). Les excréta et les eaux usées contiennent généralement de fortes concentrations d'agents pathogènes pouvant cibler l'organisme à travers la consommation des eaux souterraines (des puits) polluées.

2.3.1. Virus

L'urbanisation extrêmement rapide des pays en développement est à l'origine de problèmes critiques de pollution des eaux souterraines. Dans de nombreuses régions du monde, on se préoccupe sans cesse davantage de la contamination de l'eau et du sol par les virus. Cette contamination, qui favorise la propagation des maladies virales, est lourde de conséquences qui ne sont pas encore pleinement perçus par le corps médical et les agents de la santé publique et encore moins par la société civile.

Les premières études sur la contamination des eaux par les virus remontent à plusieurs décennies. Toutefois, on n'a pas soulevé de façon significative le rôle et l'importance des virus dans l'eau et leurs impacts sur la santé humaine. On possède des connaissances pratiques étendues en matière de surveillance et de traitement de la contamination bactérienne des eaux, mais on connaît mal la pollution virale. Les méthodes actuelles de traitement des eaux ne sont pas toujours suffisantes pour empêcher que des virus ne pénètrent dans les approvisionnements publics en eau.

Cette situation serait due aux difficultés techniques et matérielles de diagnostic des virus entériques. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS, 1979), les excréta humains peuvent contenir environ 100 types différents de virus entériques. Un être humain infecté peut libérer jusqu'à 10^6 de particules virales dans un gramme de fèces, et les eaux usées pures peuvent contenir 10^5 particules virales par litre d'eau. Cependant, la concentration des virus dans les eaux usées a une variation saisonnière significative, avec des concentrations plus élevées durant l'été et le début de l'automne. Les virus ne se reproduisent pas en dehors de la cellule de l'hôte. Ils sont très résistants aux conditions extérieures et ils peuvent survivre plusieurs mois dans les eaux usées, le sol, les eaux souterraines, l'eau de robinet et les fruits de mer.

Les particules virales sont capables de résister aux méthodes classiques de traitements des eaux et d'épuration des eaux usées, y compris la chloration. Elles peuvent se rencontrer loin de la source de contamination où ils survivent plusieurs mois ; et une eau indemne de bactéries pourrait toujours être contaminée par des virus. Par opposition à d'autres agents infectieux, une infection virale peut être contractée par l'ingestion d'une seule particule virale.

La figure 19 récapitule les voies de transmission des virus intestinaux humains. Les virus, à partir des excréments humains, peuvent se transmettre dans les eaux usées et polluer ainsi les eaux souterraines, fleuves, estuaires, eaux d'irrigation et eau de mer. Une fois ces sources hydriques sont contaminées, elles peuvent transmettre les agents pathogènes viraux à l'homme et à l'animal via l'approvisionnement par l'eau souterraine, la consommation des cultures (irriguées par des eaux contaminées), la consommation des fruits de mer ou par des eaux à usage récréatif.

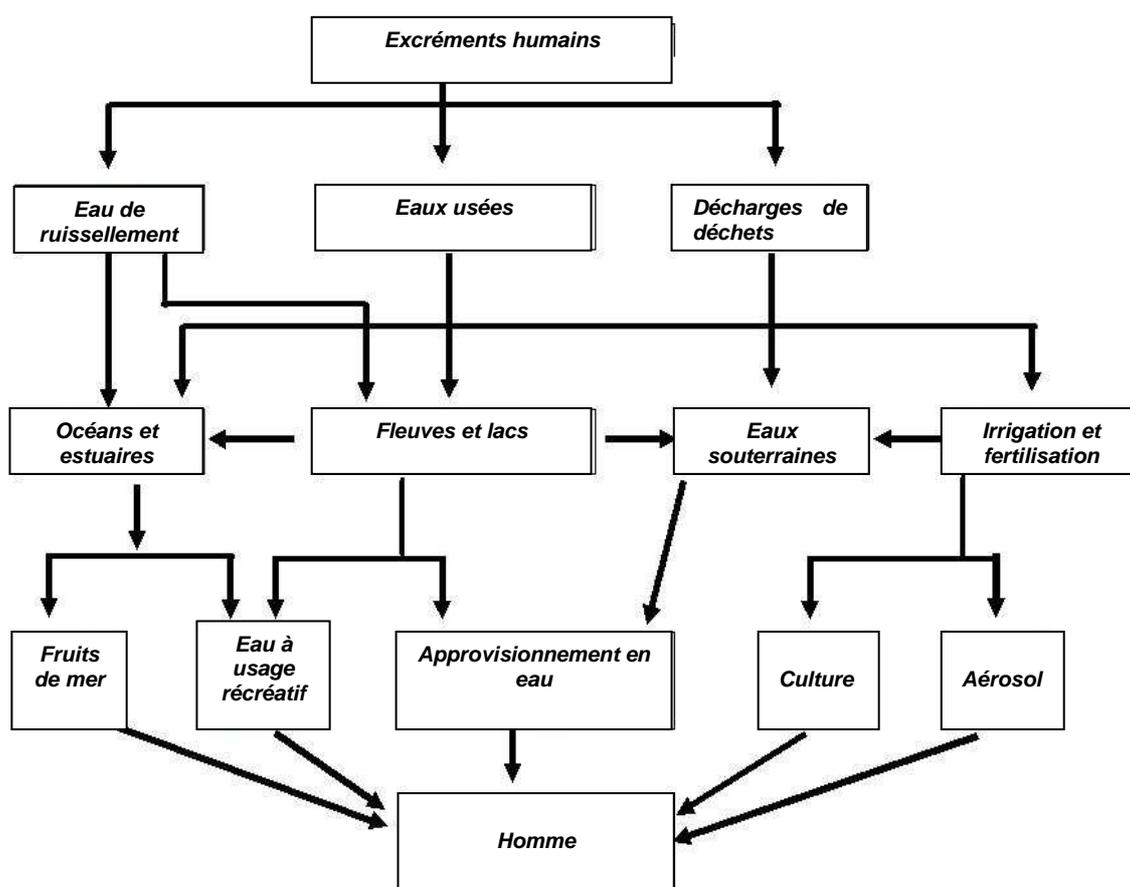


Figure 19 : Voies de transmission des virus intestinaux humains (OMS, 1979)

Récemment, on a identifié d'autre virus causant des gastroentérites comme les *Coronavirus*, *Calcinovirus*, *Astrovirus* et les *virus de l'hépatite non A et non B*. les *entérovirus* appartiennent à la famille des *Picornavirus* à ARN et de longueur entre 25 et 30 nm. Ce genre est constitué de 4 espèces, *Poliovirus*, *virus Coxsackie A*, *virus coxsackie B* et le *virus Echo*. Ce sont des virus qu'on ne peut différencier morphologiquement et dont les caractéristiques cliniques, épidémiologiques et

biochimiques sont similaires. Ils se multiplient dans le tractus gastro-intestinal et s'excrètent dans les fèces durant une période moyenne de 50 jours. Vu la résistance des virus dans le milieu extérieur, La transmission de ces agents pourrait avoir lieu à partir des eaux contaminées par des eaux résiduaires.

2.3.2. Bactéries

La croissance bactérienne est considérablement influencée par la nature chimique et physique de l'environnement. L'activité de l'eau, le pH, la température et la concentration en oxygène sont également des facteurs déterminants pour leur croissance.

L'appareil gastro-intestinal de l'homme et des animaux contient une grande variabilité d'espèces bactériennes qui sont éliminées dans les excréta. Un homme ou un animal peut libérer, durant une longue période, des agents pathogènes sans qu'il montre lui-même des symptômes cliniques de la maladie ; il s'agit d'un état asymptomatique. En contaminant les eaux souterraines, les bactéries pathogènes présentent un risque majeur pour la santé humaine et animale. Elles peuvent causer une transmission d'épidémies graves, même si leur survie dans le milieu extérieur est plus courte que les virus. Parmi les agents pathogène les plus transmis par l'ingestion de l'eau dans la région méditerranéenne on trouve *Escherichia coli*, *Shigella spp.*, *Salmonella spp.*, *Yersinia enterocolitica*, *Campilobacter jejuni* et autres (SEGUIN, 2008)

2.3.2.1. Bactéries indicatrices de la pollution fécale

L'omniprésence dans l'environnement de bactéries, virus et parasites dont certains sont pathogènes pour l'homme, le caractère immédiat de leurs effets sur la santé, l'existence de populations particulièrement sensibles (très jeunes enfants, personnes âgées, immunodéficients...) font redouter tout risque de contamination microbiologique de l'eau de consommation. La recherche dans l'eau de tous les micro-organismes potentiellement dangereux s'avère irréaliste tant pour des raisons techniques qu'économiques. C'est pourquoi, actuellement, la stratégie de contrôle des eaux repose sur la recherche de bactéries dites « germes témoins de contamination fécale », faciles à détecter, non directement pathogènes, mais dont la présence laisse supposer l'existence de germes pathogènes pour l'homme (MSS-FRANCE, 2005).

Des limites de qualité sont fixées pour des paramètres microbiologiques indicateurs de la contamination fécale, tels que les coliformes totaux, coliformes fécaux et streptocoques fécaux. Ces microorganismes peuvent exister à l'état naturel ou être le résultat d'une

contamination par des matières fécales d'origine humaine ou animale. Certains d'entre eux peuvent provoquer des maladies chez les humains. Les sources d'eau de surface comme les lacs, les rivières et les réservoirs sont plus susceptibles de contenir des microorganismes que les sources d'eaux souterraines, à moins que ces dernières ne soient sous l'influence directe des eaux de surface. Le traitement de l'eau potable a pour but principal d'éliminer ou de détruire ces microorganismes en vue de réduire le risque de maladie. Tous les approvisionnements en eau potable doivent être désinfectés (SANTÉ CANADA, 2003).

a) Coliformes totaux

Les coliformes totaux (CT) ont longtemps été les indicateurs de choix pour évaluer la qualité de l'eau. Dans une eau brute, la présence de coliformes totaux constitue non seulement une présomption de la présence de matières fécales humaine ou animale, mais aussi une présomption de la présence des micro-organismes pathogènes de toute sorte qui peuvent y être associés (PAYMENT, 1998). Ils sont utilisés depuis très longtemps comme indicateurs de la qualité microbienne de l'eau parce qu'ils peuvent être indirectement associés à une pollution d'origine fécale. Les CT sont définis comme étant des bactéries en forme de bâtonnet, aérobies ou anaérobies facultatives, possédant l'enzyme β -galactosidase permettant l'hydrolyse du lactose à 35°C, afin de produire des colonies rouges avec reflet métallique sur un milieu gélosé approprié. Les principaux genres inclus dans ce groupe sont: *Citrobacter*, *Enterobacter*, *Escherichia*, *Klebsiella* et *Serratia* (GSE, 2003).

Le groupe des coliformes totaux est utilisé depuis la fin du 19^{ème} siècle comme indicateur de pollution fécale. La plupart des espèces de ce groupe se trouvent naturellement dans le sol ou la végétation et certaines espèces qui se trouvent rarement dans les fèces peuvent se multiplier dans l'eau de consommation comme *Serratia fonticola* (HAZEL et NORMAN, 2005).

Les coliformes totaux sont aussi utiles comme indicateurs de l'efficacité du traitement, de l'intégrité du réseau de distribution ainsi que comme indicateurs de la recroissance bactérienne après traitement. D'autre part, et d'après ZMIROU et al. (1987), les coliformes fécaux, l'*E. coli* et les entérocoques sont des indicateurs de risque plus valides. Mais dans une autre étude, CRAUN et al. (1997) ont indiqué que pour l'ensemble des épidémies dues à des protozoaires (*Cryptosporidium sp.* et *Giardia sp.*) entre 1975 et 1989 aux États-Unis, les coliformes totaux n'avaient pas été des indicateurs fiables.

b) Coliformes fécaux

Sous ce terme est regroupé un certain nombre d'espèces bactériennes appartenant en fait à la famille des *Enterobacteriaceae*, formées de bâtonnets aérobies et anaérobies facultatifs. Ce groupe a toujours été utilisé pour mettre en évidence le manque d'hygiène, parce qu'il est fréquemment associé au contenu intestinal des vertébrés à sang chaud (ABHOE, 2009).

L'espèce la plus fréquemment associée à ce groupe bactérien est *E. coli* et, dans une moindre mesure, certaines espèces des genres *Citrobacter*, *Enterobacter* et *Klebsiella*. La bactérie *E. coli* représente toutefois 80 à 90 % des Coliformes fécaux détectés. Bien que la présence de ces germes témoigne habituellement d'une contamination d'origine fécale, plusieurs coliformes fécaux ne sont pas d'origine fécale ; ils proviennent plutôt d'eaux enrichies en matière organique, tels les effluents industriels du secteur des pâtes et papiers ou de la transformation alimentaire (GSE, 2003).

L'intérêt de la détection de ces coliformes, à titre d'organismes indicateurs, réside dans le fait que leur survie dans l'environnement est généralement équivalente à celle des bactéries pathogènes et que leur densité est généralement proportionnelle au degré de pollution produite par les matières fécales.

La détection de coliformes fécaux dans une eau traitée doit faire sérieusement soupçonner une contamination d'origine fécale. La présence de coliformes fécaux peut être une indication de la présence de micro-organismes entéropathogènes comme les salmonelles et le *virus Norwalk* (ZMIROU et al., 1987). En période estivale, en particulier, lorsque la température de l'eau dépasse 15°C, des proliférations de bactéries sont parfois observées de manière récurrente dans certaines sources ou réseaux de distribution d'eau.

c) Streptocoques fécaux

La classification générale des streptocoques fécaux a été modifiée dans les années 80 par la création d'un nouveau genre, *Enterococcus*. Dans ce contexte, plusieurs espèces appartenant antérieurement au genre *Streptococcus* ont été transférées vers le genre *Enterococcus* ; ce dernier correspond, grosso modo, aux streptocoques du groupe sérologique D (GSE, 2002). Le genre *Enterococcus* comprend une vingtaine d'espèces qui se retrouvent dans différents habitats et chez différents hôtes. *Enterococcus faecalis* et *E. faecium* sont les deux espèces le plus souvent identifiées chez l'humain. Les

streptocoques fécaux (dépistés dans cette étude) sont ceux du groupe D susceptibles de contaminer les eaux d'approvisionnement ; ils sont plutôt typiques des déjections animales, comme *Streptococcus bovis*, *S. equinus*, *S. gallolyticus* et *S. alactolyticus*.

Les streptocoques du groupe D colonisent le tractus gastro-intestinal des humains et de plusieurs animaux. Parmi leurs caractéristiques microbiologiques, Ils sont résistants à la température (60°C pendant 3 mn) et à un milieu salé à 6,5%. Généralement, ils ne sont pas homolytiques et rarement mobiles. Ils sont producteurs d'enterocines (MATILLA et al., 1980).

La détection des streptocoques dans une nappe d'eau souterraine doit faire sérieusement soupçonner une contamination d'origine fécale et la présence de micro-organismes entéropathogènes. De manière plus probante, des études (GSE, 2002) ont clairement démontré que la détection de streptocoques était fortement associée à la présence d'*E. coli* dans des réseaux de distribution approvisionnés par des eaux souterraines. ZMIROU et al., (1987), ont mis en évidence un risque accru de développer une gastro-entérite avec un nombre relativement restreint de streptocoques fécaux (3 à 10 bactéries/100 ml). Il n'est, cependant, pas démontré que les souches présentes en milieu hospitalier se retrouvent dans l'environnement et particulièrement dans l'eau.

2.3.3. Protozoaires pathogènes

Les protozoaires sont des organismes unicellulaire (possédant un ou plusieurs noyaux), et souvent mobiles. Leur taille microscopique peut varier de 1 à 150 µm. L'humidité est absolument requise pour leur existence, car ceux-ci sont sensibles à la dessiccation. C'est pour cela la majorité d'entre eux vivent dans des milieux dulçaquicoles ou marins.

Leur forme peut être sphérique ou ovoïde, de symétrie bilatérale ou polymorphe. Leurs organes de locomotion sont les flagelles, cils, pseudopodes ou membranes ondulante. Ils peuvent se présenter sous forme kystique, qui est la forme de résistance dans les conditions extérieures (à l'hôte). Ils se multiplient par fission binaire ou fission multiple (SAREDI, 2002)

Certains d'entre eux sont des parasites de végétaux ou d'animaux. On trouve un grand nombre de protozoaires dans l'intestin humain et animal. Plusieurs d'entre eux ne sont pas pathogènes et vivent dans l'intestin sans causer de dommage. Par contre, les protozoaires parasites intestinaux, dont *Giardia* et *Cryptosporidium*, sont une importante

cause de maladies gastro-intestinales. Les protozoaires parasites sont incapables de se multiplier à l'extérieur de l'hôte (MAJDOUB et al., 2003).

Dans l'environnement, on les trouve sous une forme dormante et résistante, ce qui leurs sert de moyen de transfert d'un hôte à un autre. A titre d'exemple, *Giardia* et *Cryptosporidium* sont d'un intérêt important dans l'industrie et le traitement de l'eau puisqu'ils sont reconnus comme des agents responsables d'un grand nombre d'épisodes de gastro-entérites d'origine hydrique, et ils sont résistants à plusieurs désinfectants. De plus, une très faible quantité est requise pour causer la maladie.

2.4. Maladies infectieuses à transmission hydrique

2.4.1. Généralités

Les maladies infectieuses à transmission hydrique résultent de l'exposition à des microorganismes pathogènes présents dans l'eau potable ou dans l'eau utilisée pour les loisirs. L'eau contaminée pénètre le plus souvent dans l'organisme par ingestion, mais les agents pathogènes présents dans l'eau peuvent aussi être inhalés, adsorbés et absorbés via des lésions ou blessures ouvertes.

La majorité des symptômes induits par les agents pathogènes d'origine hydrique sont d'ordre entérique (nausées, vomissements et diarrhées et, plus rarement, colites). D'autres symptômes peuvent cependant être d'ordre neurologique, cardiovasculaire, respiratoire (*Legionella*), oculaire (*Toxoplasma*), hématologique (septicémie causée par *E. coli O157:H7*) ou dermatologique (SEGUIN et al., 2008).

La contamination par les microorganismes est généralement associée à une durée d'exposition plus courte, une apparition plus rapide des symptômes de la maladie et un rapport dose-réponse moins élevé que la contamination chimique et radiologique.

2.4.2. Quelques maladies hydriques d'origine virale

2.4.2.1. L'hépatite A

L'agent de l'hépatite virale A a été classé dans le genre *Entérovirus*. La maladie peut se propager en mangeant ou en buvant de la nourriture ou de l'eau contaminées par le virus. Cela est plus susceptible de se produire dans les pays où l'hépatite A est courante, et dans les zones où il y a de mauvaises conditions d'hygiène ou une mauvaise hygiène personnelle. Les produits alimentaires et les boissons les plus susceptibles d'être

contaminés sont l'eau, les fruits, les légumes, fruits de mer et la glace. Le Centre américain de contrôle et de prévention des maladies (CDC) classe l'hépatite A parmi les maladies ayant un risque de transmission par la consommation des eaux de puits pollués (CDC, 2013 a).

Des eaux d'égouts ont contaminé, à titre d'exemple, en 1955-1956 à Delhi en Inde, des réseaux d'approvisionnement en eau, le fait qui a relevé l'importante caractéristique du virus de résister aux fortes concentrations de chlore résiduel utilisé pour la destruction de la plupart des autres agents microbiens. L'homme est l'hôte confirmé du virus de l'hépatite A, et il est son réservoir pour la transmission de la maladie. Cependant, l'eau joue le rôle du vecteur viral. L'hygiène défectueuse et la consommation de produits alimentaires contaminés pourraient contribuer à la transmission du virus de l'hépatite A (OMS, 1979).

2.4.2.2. La poliomyélite

La poliomyélite (paralysie infantile) est une maladie contagieuse, qui est classée comme une maladie de civilisation. La principale source de la dissémination du virus est l'appareil gastro-intestinal des porteurs, et la forme de transmission de la maladie est la forme féco-orale comme la salmonellose, la shigellose et autres maladies entériques. Les eaux des égouts contiennent des quantités énormes du virus pathogène qui peut, éventuellement, être transmis, dans les zones endémiques, par les mouches (HARISSON et al., 1978).

La poliomyélite se diffuse par contact d'homme à homme, entrant généralement dans le corps par la bouche à cause de la contamination de l'eau ou de la nourriture par des fèces. La maladie est généralement mortelle si les cellules nerveuses du cerveau sont attaquées (poliomyélite bulbaire), entraînant une paralysie des muscles essentiels, tels que ceux contrôlant l'ingestion, les battements du cœur, et la respiration. Il n'existe pas de médicaments spécifiques en tant que traitement. La quasi éradication de la maladie au Maroc est le résultat des efforts sans relâche contre celle-ci.

2.4.2.3. Autres infections virales

De nombreux virus ont été trouvés dans les selles de patients atteints de gastro-entérites, mais leur rôle pathogène n'a pas été établi pour tous. Actuellement, quatre virus ont une pathogénicité reconnue : les *Rotavirus*, les *Calicivirus* humains, les *Astrovirus* et les *Adenovirus* entériques. Les *Calicivirus* appartiennent à la famille des *Caliciviridae* qui

comprend quatre genres dont les genres *Norovirus* (NV) (dénommé auparavant *Norwalk Like virus*) et *Sapovirus* (SV) (ex *Sapporo-like*). Ils sont les *Calicivirus* les plus fréquents en pathologie humaine (ANCELLE et al., 2003).

Les infections à *Norovirus* se manifestent après une incubation de 12 à 48 heures par une symptomatologie digestive généralement modérée avec des vomissements, une diarrhée, des nausées et des crampes abdominales et chez les jeunes enfants de la fièvre ($\geq 38^{\circ}\text{C}$). L'évolution est le plus souvent favorable en 24-72 heures. Les infections à NV sont spécifiques à l'homme. Leur transmission se fait sur le mode féco-oral, principalement par l'eau contaminée, par la projection de vomissements, par contact direct de personne à personne, ou par la consommation d'un aliment contaminé. Les gastro-entérites à NV surviennent selon un rythme saisonnier avec une recrudescence hivernale entre novembre et mars et un pic entre décembre et février dans les pays à climat tempéré.

Les principaux agents viraux intestinaux humains se rencontrant dans l'eau, et les maladies susceptibles de les provoquer sont résumés dans le tableau 9.

Tableau 9 : Virus intestinaux humains se rencontrant dans l'eau (OMS, 1979)

Agent viral	Nombre de types	Maladie provoquées
<i>Entérovirus (poliovirus)</i>	3	Paralyse, méningite, fièvre
<i>Entérovirus (Echovirus)</i>	34	Méningite, infections respiratoires, éruptions cutanées, diarrhées et fièvre
<i>Entérovirus (Virus Coxsackie A)</i>	24	Pharyngite vésiculeuse, Méningites, manifestations respiratoires et fièvre
<i>Entérovirus (virus Coxsackie B)</i>	6	Méningites, cardiopathies, manifestations cardiovasculaires et cutanées, fièvre, méningites et infections respiratoires
Nouveaux <i>Entérovirus</i>	4	Méningite, encéphalite, infections respiratoires, conjonctivite hémorragique aiguë, fièvre
(virus hépatite A, probablement un <i>Entérovirus</i>)	1	Hépatite infectieuse
Virus de la gastroentérite (agents du type <i>Norwalk</i>)	2	Diarrhées et vomissement épidémiques, principalement chez les enfants
<i>Réovirus</i>	3	Pathologie incertaine
<i>Adénovirus</i>	>30	Infections respiratoires, infections oculaires
<i>Parvovirus</i>	>3	Associés aux maladies respiratoires de l'enfance, mais à étiologie incertaine
<p><i>Note : Les autres virus, qui du fait de leur stabilité, peuvent contaminer l'eau sont les suivants :</i></p> <p>1) Les <i>Parvovirus</i> du type SV40, qui se rencontrent dans l'urine. Le sous-type JC est associé à la leucoencéphalite multifocale progressive.</p> <p>2) Le virus de la maladie de Creutzfeld-Jacob (C-J), comme le virus de la tremblante du mouton. Le virus de la maladie de C-J résiste à la chaleur et au formol. Il provoque une encéphalopathie spongieuse, caractérisée par des formes sévères, progressive de démence et d'ataxie.</p>		

2.4.3. Quelques maladies hydriques d'origine bactérienne

2.4.3.1. Diarrhées et autres gastro-entérites aiguës

Dans le cas d'*Escherichia coli*, c'est l'agent bactérien le plus répandu au niveau de la flore intestinale des individus sains. Paradoxalement, c'est aussi l'agent pathologique le plus incriminé parmi la famille des entérobactéries responsables de méningites chez les

nouveau-nées, les cystites et pyélonéphrites chez les femmes et les différentes formes de gastroentérites.

La diarrhée est une excrétion fréquente de fèces aqueuses par les intestins, contenant parfois du sang et du mucus. Une diarrhée grave peut menacer la survie de l'individu à cause des pertes de fluide, particulièrement chez les enfants et les nourrissons, les personnes malnutries et les personnes ayant un système immunitaire déséquilibré. La diarrhée est un concomitant de nombreuses maladies infectieuses, spécialement la fièvre typhoïde, la dysenterie amibienne ou bacillaire et le choléra. Elle est répandue dans le monde entier ; et elle est à l'origine de 4% de tous les décès et de 5% des incapacités. Elle est le plus souvent causée par des infections gastro-intestinales qui tuent chaque année environ 2,2 millions de personnes dans le monde, pour la plupart des enfants dans les pays en développement. La diarrhée peut être causée par de l'eau contaminée, c'est pour cela, l'utilisation d'eau traitée est une des mesures d'hygiène importantes pour prévenir la diarrhée (OMS, 2013 a).

Les quatre types d'*Escherichia coli* causant des maladies diarrhéiques chez l'homme figurent dans le tableau 10. Il s'agit d'*E. coli* entérotoxigène, *E. coli* entéroinvasive, *E. coli* entérohémorragique et *E. coli* entéropathogénique.

Tableau 10 : Classification des *Escherichia coli* et caractéristiques épidémiologiques de leurs maladies (MARTIN et al., 1994)

Type d' <i>E. coli</i>	Caractéristiques épidémiologiques
Entérotoxigène	Diarrhées infantiles dans les pays en voie de développement Diarrhées chez les voyageurs adultes
Entéroinvasive	Se présente lors de toxi-infections alimentaires. Transmission par voie hydrique et alimentaire
Entérohémorragique	Toxi-infections alimentaires. Transmission par voie hydrique et alimentaire
Entéropathogénique	Diarrhées chez les enfants de garderie. Rarement chez les adultes. Transmission de personne à personne.

2.4.3.2. Fièvres typhoïdes et paratyphoïdes

La fièvre typhoïde est une maladie causée par la bactérie *Salmonella typhi*. Atteignant exclusivement l'homme. ; son agent pathogène est maintenu dans la nature par l'homme

malade ou porteur. La voie de transmission de la bactérie se fait via l'eau, le lait ou les aliments contaminés par des matières fécales infectées. Les mouches jouent également un rôle important dans la propagation de la maladie en transportant les bactéries des selles contaminées aux nutriments. L'épidémie peut se transmettre de façon imprévue lors d'une détérioration de conditions de salubrité et d'assainissement liquide (HARISSON et al., 1978).

La fièvre typhoïde est une infection bactérienne des voies intestinales et du courant sanguin. Les symptômes peuvent être bénins ou graves et comprennent une fièvre prolongée pouvant être aussi élevée que 39°- 40° C, des malaises, une anorexie, des céphalées, une constipation ou une diarrhée. Les germes de la typhoïde passent dans les selles et l'urine des personnes infectées. Une fois que les bactéries pénètrent dans l'organisme d'une personne, elles se multiplient et se propagent des intestins dans le courant sanguin. Une eau propre et un bon assainissement permettent de prévenir la propagation de la typhoïde.

2.4.3.3. Le choléra

Le choléra touche actuellement tous les continents, mais il atteint plus sévèrement les pays où l'hygiène publique laisse à désirer. C'est évidemment dans les pays du Tiers-Monde que cette maladie fait le plus de victimes.

La transmission de la maladie par l'eau a été clairement établie, et la contamination des produits alimentaires par des selles infectées par le vibron cholérique (*Vibrio cholerae*) joue également un rôle important dans la propagation de l'épidémie (HARISSON et al., 1978).

La maladie résulte de l'absorption par la bouche de l'eau ou des aliments contaminés. Les selles diarrhéiques libérées en grande quantité sont responsables de la propagation du bacille dans l'environnement et de sa transmission oro-fécale. Mais 90% des sujets en contact avec la bactérie ne présenteront aucun symptôme alors même qu'ils élimineront un taux élevé de vibrions dans leurs selles pendant plusieurs jours. Ils sont des vecteurs potentiels de l'agent infectieux.

Le cycle de transmission du choléra est essentiellement homme-environnement-homme. La mesure préventive la plus efficace contre le choléra est la protection de l'eau et les aliments contre la contamination fécale, incluant la vigilance sur les sources d'approvisionnement en eau, le contrôle et vigilance sur le réseau d'assainissement des

eaux usées et le contrôle des aliments et les vecteurs de l'agent pathologique (MATILLA et al., 1980).

2.4.3.4. Salmonellose

La salmonellose est une maladie provoquée par différents sérotypes de *Salmonella spp.*, dont les manifestations cliniques sont caractérisées par une gastroentérite aigüe avec ou sans septicémie. C'est une maladie cosmopolite qui croit dans les pays en voie de développement et les pays sous développés malgré les mesures adoptées. Le genre *Salmonella* est très étendu à travers le monde dont les sources de l'infection et les voies de transmission sont très variées comme l'eau, le sol, les aliments, les animaux, les fèces animales et humaines et les produits végétaux (MARTIN et al., 1994).

Les eaux souterraines et les eaux des rivières et des lacs contaminées par les excréta humains et animales portent des quantités importantes de *Salmonella* qui seraient des sources potentielles d'infection des cultures et des aliments lorsqu'elles sont utilisées comme eau potable, pour irrigation ou dans des processus de fabrication d'autres produits.

La salmonellose est une zoonose¹⁸. Les salmonelles sont hébergées par une grande variété d'animaux, domestiques et sauvages. L'infection peut être ou non cliniquement apparente. L'animal peut être porteur et éliminer les salmonelles avec ses matières fécales pendant une brève période de façon intermittente ou en permanence. Chez les veaux, plus sensibles que les adultes, l'infection provoque de véritables foyers épidémiques, avec une forte mortalité (OIE. 1989)

2.4.3.5. Dysenterie bacillaire

C'est une maladie largement répandue surtout dans les pays moins développés, dont l'homme est l'unique réservoir de l'agent infectieux *Shigella spp.* Cet agent pathogène provoquerait une maladie avec une dose infectante ne dépassant pas les 200 microorganismes ingérés. L'agent de la dysenterie bacillaire est peu résistant dans les conditions extérieures, mais il peut survivre dans l'eau durant de longues périodes. Les personnes malades ou porteuses sont le réservoir principal de l'infection pour l'homme. Les sources de l'infection sont les matières fécales et les objets contaminés. Le mode de transmission le plus fréquent est la voie fécale ou buccale. Les insectes, particulièrement les mouches, peuvent aussi jouer le rôle de vecteurs mécaniques du microbe (OIE. 1989)

¹⁸ Pathologie (maladie) qui peut se transmettre de l'animal à l'homme ou de l'homme à l'animal

2.4.3.6. Campylobactériose

Campylobacter jejuni provoque des maladies diarrhéiques chez l'homme et l'animal dans le monde entier, et la plupart des animaux sont des réservoirs. De nombreuses épidémies sont liées à la consommation de l'eau, de la nourriture et du lait contaminés. L'intérêt pour la présence de ce micro-organisme est dû à sa présence dans les eaux de surface, et par conséquent, le potentiel de sa présence dans l'eau potable non traitée ou insuffisamment traitée, et le risque de contaminer les eaux de puits de consommation. A titre d'exemple, une épidémie dans l'Illinois, aux Etats Unis a affecté 78 personnes de 34 ménages en 1982. 94 personnes étaient atteintes par *Campylobacter jejuni* après approvisionnement en eau contaminée d'un hôpital (REASONER, 1998).

2.4.3.7. Yersiniose

La bactérie *Yersinia enterocolitica*, pathogène intestinale, a une forte propension à causer des infections secondaires. La yersiniose est principalement d'origine alimentaire, étant le plus souvent associée à la consommation de produits laitiers. Les victimes sont principalement des enfants, chez qui elle se manifeste sous la forme d'une entérite aiguë avec de la fièvre et une diarrhée parfois sanguinolente. Chez les adolescents, la maladie prend souvent la forme d'une lymphadénite mésentérique avec douleurs dans la fosse iliaque droite (INSP- CANADA, 2004).

La Yersiniose n'a probablement pas d'importance au Maroc vu sa principale source et réservoir de contamination qui sont le porc.

D'autres groupes d'agents pathogènes peuvent être transmis par les excréta via l'eau contaminée. Ils peuvent provoquer des maladies plus ou moins graves. Le tableau 11 dresse une liste des principaux agents pathogènes bactériens isolés de l'eau potable comme *Acinetobacter* spp., *Achromobacter xylosoxidans*, *Aeromonas hydrophila*, *Bacillus* spp., *Campylobacter* spp., *Citrobacter* spp., *Enterobacter aerogenes*, *E. agglomerans*, *E. cloacae* et autres (REASONER, 1998)

Tableau 11 : Bactéries pathogènes opportunistes isolées de l'eau potable. (REASONER, 1998). (*) indique que le micro-organisme peut être un agent pathogène de première importance

<i>Acinetobacter</i> spp.
<i>Achromobacter xylosoxidans</i>
<i>Aeromonas hydrophila</i> *
<i>Bacillus</i> spp.
<i>Campylobacter</i> spp. *
<i>Citrobacter</i> spp.
<i>Enterobacter aerogenes</i>
<i>E. agglomerans</i>
<i>E. cloacae</i>
<i>Flavobacterium meningosepticum</i>
<i>Hafnia alvei</i>
<i>Klebsiella pneumoniae</i> *
<i>Legionella pneumophila</i> *
<i>Moraxella</i> spp.
<i>Mycobacterium</i> spp.
<i>Pseudomonas aeruginosa</i> *
<i>Pseudomonas</i> spp. (no aeruginosa)
<i>Serratia fonticola</i>
<i>S. liquifaciens</i>
<i>S. marcescens</i>
<i>Staphylococcus</i> spp. *
<i>Vibrio fluvialis</i> *

2.4.4. Quelques maladies hydriques d'origine parasitaire

En plus des maladies d'origine bactérienne et virale, les eaux de consommation peuvent être contaminées par des agents parasitaires issus des excréta humains ou animales. Le terme parasitoses regroupe les infections provoquées par des protozoaires ainsi que celles par des helminthes (vers nématodes, cestodes et trématodes). Les parasitoses à protozoaires (protozooses) sont surtout des maladies endémiques de la zone tropicale, les plus répandues étant les infections causées par *Cryptosporidium parvum*, *Giardia lamblia*, *Entamoeba histolytica* (amibiase) et autres. Les stades infectieux de nombreux helminthes, comme les ascarides lombricoïdes peuvent être transmis à l'être humain via l'eau de boisson. Une seule larve mature ou un seul œuf fécondé pouvant être à l'origine d'une infection, ces stades ne doivent pas être présents dans l'eau.

Les quelques types de protozoaires potentiellement présents dans les eaux usées et les maladies qu'ils peuvent causer sont répertoriés dans le tableau 12. Il s'agit surtout du *Balantidium coli*, *Cryptosporidium*, *Entamoeba histolytica* et *Giardia lamblia*.

Tableau 12 : Principaux types de protozoaires potentiellement présents dans les eaux usées urbaines, avec indication des maladies qui peuvent provoquer ; (MARTIN et al., 1994)

Agent	Maladies
<i>Balantidium coli</i>	Diarrhée, dysenterie, ulcération du colon
<i>Cryptosporidium</i>	Diarrhée
<i>Entamoeba histolytica</i>	Ulcération du colon, dysenterie amibienne ^(a)
<i>Giardia lamblia</i>	Diarrhée, mauvaise absorption
^(a) : Maladie se propageant dans les eaux contaminées par les boues utilisées comme fertilisants. Agent connu dans les zones à climat tempéré.	

2.4.4.1. Cryptosporidiose

Le genre *Cryptosporidium* comprend une vingtaine d'espèces de parasites intestinaux du groupe des coccidies. *Cryptosporidium parvum* est l'espèce associée aux parasitoses humaines. La cryptosporidiose est une infection d'importance médicale et vétérinaire qui affecte les systèmes digestif et respiratoire de l'homme et de certains animaux. On trouve le protozoaire *Cryptosporidium spp.* chez les oiseaux, les rongeurs, les animaux de ferme ou domestiques. Les réservoirs principaux sont l'homme, les bovins, les moutons et plusieurs animaux domestiques incluant le chien et le chat. L'infection peut être fatale chez les sidéens et les personnes immunodéficientes.

La prévalence dans les pays industrialisés est de 1 à 4,5 % ; alors qu'elle est de 3 à 20 % dans les pays en voie de développement. Les modes de transmission sont la voie féco-orale, la transmission interhumaine, de l'animal à l'homme, et la voie hydrique. Les oocystes libérés dans l'environnement sont non seulement extrêmement résistants à l'inactivation naturelle, mais aussi à la désinfection par le chlore, car le chlore seul est relativement peu efficace pour éliminer le *Cryptosporidium*. La contamination de l'eau de distribution publique peut être la source d'épidémies graves (FESTY et al., 2003).

Le *Cryptosporidium* possède donc plusieurs caractéristiques lui conférant un pouvoir de transmission par voie hydrique en milieu rural où les systèmes de filtration sont souvent absents pour un approvisionnement individuel (INSP- CANADA, 2004).

2.4.4.2. Giardiose (giardiase)

La giardiose est une maladie diarrhéique causée par le parasite *Giardia intestinalis* qui est un protozoaire zooflagellé. La giardiase est une maladie mondiale, elle infecte près de 2% des adultes et 6% à 8% des enfants dans les pays développés. Près de 33% des habitants des pays en développement ont eu la giardiase. Aux États-Unis à titre d'exemple, la giardiose est la maladie parasitaire intestinale la plus répandue chez l'homme. Les gens deviennent infectés par *Giardia* en avalant des kystes de *Giardia* présents dans les aliments ou l'eau contaminés. Les kystes sont instantanément contagieux une fois qu'ils quittent l'hôte par les selles. Une personne infectée pourrait libérer 10^9 à 10^{10} kystes quotidiens dans les selles, et cela pourrait durer plusieurs mois. Cependant, l'infection pourrait être déclenchée avec seulement 10 kystes avalés (CDC, 2013b).

En ce qui concerne l'eau souterraine, des études ont démontré qu'elle ne peut pas être considérée comme exempte de *Giardia sp.* Autres études américaines ont révélé que 6 % des 463 échantillons prélevés dans 199 sources d'eau souterraines en Amérique étaient contaminés (INSP- CANADA, 2004).

Les kystes de *Giardia* et les oocystes de *Cryptosporidium*, de par leur résistance élevée à la désinfection, sont devenus la cible des traitements de l'eau dans plusieurs pays industrialisés (PAYMENT, 1998)

2.4.4.3. Amibiase

L'amibiase ou dysenterie amibienne est une protozoose cosmopolite. L'espèce *Entamoeba histolitica* est plus fréquente dans les pays en voie de développement que les pays industrialisés. Le réservoir de *E. histolitica* est l'homme, et l'infection est transmise par voie fécalo-orale. L'élément infectant est le kyste. Les aliments et l'eau de boisson sont contaminés par les matières fécales contenant des kystes et sont la source principale de l'infection. Les principaux facteurs de contamination de l'environnement sont les porteurs asymptomatiques ou les individus ne souffrant d'épisode diarrhéiques que par intermittence. Le manque d'hygiène personnelle et le défaut d'hygiène alimentaire sont des éléments importants de l'épidémiologie de l'amibiase (OIE. 1989).

Selon une étude menée au Chiapas en Mexique sur la qualité microbiologique des eaux de consommation (rivières et puits), seulement 31% des échantillons ont été propres à la consommation humaine. Les analyses ont relevé des contaminations par les parasites *Entamoeba histolytica*, *Ascaris lumbricoides*, *Entamoeba coli* et *Giardia lamblia* et par la bactérie *Escherichia coli* (SANCHEZ-PÉREZ et al., 2000).

Tableau 13: Espèces de *Giardia* et leurs principaux hôtes (SANTÉ CANADA, 2013)

Espèces (assemblage)	Principaux hôtes
<i>G. lamblia</i> (A)	Humains, animaux d'élevage et autres mammifères
<i>G. lamblia</i> (B)	Humains
<i>G. lamblia</i> (C)	Chiens
<i>G. lamblia</i> (D)	Chiens
<i>G. lamblia</i> (E)	Bovins et autres ongulés d'élevage
<i>G. lamblia</i> (F)	Chats
<i>G. lamblia</i> (G)	Rats
<i>G. agilis</i>	Amphibiens
<i>G. muris</i>	Rongeurs
<i>G. microti</i>	Rats musqués, campagnols (rongeurs de la famille des muridés, s'attaquant aux céréales)
<i>G. psittaci</i>	Oiseaux
<i>G. ardea</i>	Oiseaux

2.4.4.4. Ankylostomose (ankylostomiase, uncinariose)

C'est une nématodose zoonosique, dont les principaux agents étiologiques chez l'homme sont *Ancylostoma duodenale* et *Necator americanus*. La source d'infestation de l'homme est le sol pollué par les matières fécales de chiens ou de chats parasités. Les sols capables de retenir l'humidité sont les plus favorables à la survie des larves. Les larves envahissent l'organisme humain soit par voie buccale, soit par voie percutanée (OIE. 1989)

2.4.4.5. Trichocéphalose (trichocéphaliase, trichuriose)

Le principal agent de la trichocéphalose de l'homme est le nématode *Trichuris trichiura* (*trichocephalus trichiurus*). C'est un parasite cosmopolite, mais fréquent principalement dans les régions tropicales et subtropicales. Le réservoir de *Trichuris trichiura* est l'homme. L'entretien du parasite dans la nature est assuré par l'abondance des œufs

émis par les parasites de l'homme (200 à 300 œufs par gramme de matières fécales et par femelle) et par la longue survie des œufs dans le sol. C'est habituellement par géophagie et en ingérant des aliments souillés d'œufs embryonnés que l'homme contracte l'infection. La prévention de l'infestation de l'homme exige l'amélioration de l'hygiène de l'environnement et tout spécialement l'évacuation des matières fécales, afin d'éviter la contamination du sol. (OIE. 1989).

Les eaux souterraines et les puits de faible profondeur et d'installation vétustes peuvent être contaminés directement par les eaux usées urbaines. MARTIN et al (1994) dressent dans le tableau 14 les principaux types d'helminthes potentiellement présents dans les eaux usées urbaines et susceptibles de contaminer les eaux souterraines et les eaux de puits, ainsi que leur distribution géographique et les maladies qu'ils peuvent provoquer.

Tableau 14 : Principaux types d'helminthes potentiellement présents dans les eaux usées urbaines, avec indication des maladies qu'ils peuvent provoquer (MARTIN et al., 1994)

Agent parasitaire	Maladie	Distribution géographique
NEMATODES		
<i>Ancylostoma duodenale</i>	Ankylostomose duodénale	Europe, Asie, Amérique du sud
<i>Ascaris lumbricoides</i>	Ascariasis	Cosmopolite
<i>Enterobius vermicularis</i>	Enterobiasis	Cosmopolite
<i>Strongyloides stercoralis</i>	Strongiloïdose	Régions tropicales et subtropicales
<i>Trichuris trichiura</i>	Trichuriose (Trichocéphalose)	Cosmopolite
CESTODES		
<i>Diphyllobotrium latum</i>	Diphyllobothriose	Régions subarctiques et tropicales
<i>Echinococcus granulosus</i>	Hydatidose	Cosmopolite
<i>Hymenolepis nana</i>	Hyménolépiose	Cosmopolite
<i>Taenia saginata</i>	Taeniasis et cysticercose	Cosmopolite
TREMATODES		
<i>Chlonorchis sinensis</i>	Chlonorchiose	Sud-est asiatique, Japon
<i>Opisthorchis</i>	Opisthorchiose	Europe, sud-est asiatique
<i>Paragonimus westermani</i>	Paragonimose	Asie, Afrique, Amérique du Sud
<i>Schistosoma mansoni</i>	Schistosomose	Afrique, Amérique du Sud

2.5. Epizooties¹⁹ des animaux domestiques liées à la pollution hydrique

Les rejets des activités agricoles ne sont pas sans conséquence sur la qualité de l'eau souterraine. Les purins et les lisiers riches en matière azotée dans les cultures qui sont épandues se retrouvent par ruissellement dans les cours d'eau et les nappes phréatiques. Les activités agricoles sont à l'origine de nombreux rejets toxiques, engrais, pesticides, phosphates et autres.

La qualité bactériologique de l'eau agit directement sur la santé animale, car une eau de mauvaise qualité peut engendrer des pathologies sur le troupeau. Il s'agit généralement de pathologies gastro-intestinales comme les diarrhées néonatales, salmonellose, botulisme, yersiniose, campylobactériose, cryptosporidiose et autres épizooties dont l'eau peut être un vecteur potentiel. Les déjections animales sont porteuses de milliards de germes apathogènes ou pathogènes. Le tableau 15 relève les quantités de quelques genres des microorganismes contenus dans les fèces animales. A titre d'exemple, les fèces bovines peuvent contenir $3,3 \times 10^4$ UFC (unité formant colonie) de *Campylobacter spp/g* ; les excréments de volailles peuvent contenir plus de 3×10^4 UFC de *Salmonella spp/g*.

¹⁹ En médecine vétérinaire ; épidémie qui atteint un grand nombre d'animaux

Tableau 15 : Excrétion de microorganismes entéropathogènes par les animaux domestiques (DE ANDRADE LIMA et al., 2000)

Microorganisme	Espèce animale	Taux d'excrétion	Référence
<i>Campylobacter spp</i>	Bovin de boucherie	$6,1 \times 10^2$ UFC /g de fèces	Stanley et coll., 1998
	Bovin	$3,3 \times 10^4$ UFC/g de fèces	Stanley et coll., 1998
	Porc engraissement	$1,6 \times 10^3$ à 10^4 UFC/g de fèces	Weijtens et coll., 1996
	Volaille	10^7 UFC/g de fèces	Oosterom, 1987
	Volaille	$2,9 \times 10^{11}$ UFC/g de fèces	Wallace et coll., 1996
<i>Salmonella spp.</i>	Bovin laitier	10^5 à 10^6 UFC/g de fèces	Sojka, 1974 selon Martel, 1985
	Bovin de boucherie	10^5 UFC /g de fèces	Clinton et coll., 1979
	Volaille	$> 3 \times 10^4$ UFC/g de fèces	Sims et Wolf, 1994
	Porc	10^6 UFC/ml de lisier	Munch et coll., 1987
<i>E. coli O157:H7</i>	Bovin de boucherie	10^2 à 10^5 UFC/g de fèces	Zhao et coll., 1995 selon Cassin et coll., 1998

Parmi les épizooties les plus fréquentes liées à la contamination de l'eau de l'abreuvement figure les diarrhées. La diarrhée néonatale des veaux est caractérisée par un ramollissement des fèces et une fréquence d'émission trop élevée. Les diarrhées des veaux âgés de 2 jours à 3 mois sont souvent dues à plusieurs causes agissant en même temps. Elles sont très souvent une pathologie de groupe. Elles peuvent avoir des conséquences graves comme le retard de croissance, mortalité et pertes économiques. Certains germes peuvent, dans quelques cas, être transmissibles à l'homme ; il s'agit de zoonoses.

La contamination du veau se fait par la voie orale, à partir de la peau des trayons, du matériel (tétines, seau, etc.), des aliments ou de l'eau souillés par des matières fécales contenant des germes de diarrhée. C'est un cycle de contamination oro-fécal.

Les germes les plus fréquents des diarrhées animales sont : les *Escherichia coli* (colibacilles), *Salmonella spp.*, les *rotavirus*, les *coronavirus*, les cryptosporidies, les coccidies et autres agents viraux, bactériens ou parasitaires.

2.6. Facteurs influençant la diffusion et la survie des microorganismes dans le sol et les eaux souterraines

La contamination des sources d'eau souterraine provient presque toujours de l'infiltration d'eau de surface polluée. Le transport des micro-organismes pathogènes, ou des micro-organismes indicateurs de la contamination fécale (comme les coliformes) est largement influencé par la texture et la structure du sol ainsi que par le médium géologique (taille des pores, minéralogie, etc.). Le type de sol influe par ailleurs sur la survie des bactéries pathogènes.

De manière habituelle, le sol joue un rôle naturel filtrant qui limite la pénétration en profondeur des micro-organismes indicateurs, tels les coliformes, particulièrement les sols à texture fine ; alors que les sols fissurés seraient plus vulnérables à la contamination. D'autres facteurs peuvent aussi influencer sur la survie de certains micro-organismes pathogènes ou indicateurs. Ainsi, *E. coli* survivrait moins longtemps dans un sol naturel contenant une multitude de micro-organismes que dans un sol stérile. De plus, il est reconnu qu'une source d'eau souterraine située près de la surface est plus susceptible d'être contaminée, tel qu'il est démontré avec les indicateurs habituels (coliformes totaux et fécaux, *E. coli* ainsi que *Clostridium perfringens*) et que des périodes de pluies intenses favorisent la contamination (INSP- CANADA, 2004).

La survie des agents pathogènes dans le milieu extérieur est influencé par une multitude de paramètres environnementaux comme la température, l'humidité, les rayons solaires, le pH du sol, la présence des nutriments dans le sol et d'autres particularités propres à chaque microorganisme (résistance à la dessiccation, capacité de se multiplier à l'extérieur de l'hôte, etc.). La mobilité des microorganismes pathogènes ayant survécu dans le profil du sol dépend notamment de la pluviométrie, du type du sol, du mode d'épandage, etc. Il est établi que presque tout les agents pathogènes contenus dans les excréta peuvent survivre suffisamment longtemps dans le sol et l'eau souterraine pour mettre en danger la santé des consommateurs. Quant aux virus, ce sont des microorganismes qui ne se reproduisent qu'à l'intérieur des cellules hôtes, cependant leur

pouvoir pathogène peut rester important selon les conditions et les caractéristiques du milieu environnemental où ils se trouvent, et l'interaction de ces paramètres.

2.6.1. Température

La température conserve une influence prépondérante sur la survie des bactéries fécales ; elle interfère avec d'autres paramètres physicochimiques des sols tels que la viscosité, la tension superficielle et le régime hydrique. Les températures élevées ont apparemment un impact global négatif sur les populations microbiennes que le froid. De nombreux auteurs montrent que les températures hautes diminuent la survie des bactéries. Cependant, autres études indiquent que les cycles gel – dégel favorisent le déclin des populations bactériennes fécales ; il pourrait s'agir d'effets indirects agissant sur l'état hydrique comme le dessèchement (GIVORD et DORIOZ, 2010)

2.6.2. Texture du sol

La texture du sol est traitée dans la majorité des études. Les sols argileux sont en général plus favorables à la survie des microorganismes d'origine fécale. En ce qui concerne les coliformes fécaux, le temps de demi-vie est d'environ 30 jours dans un sol sableux, alors que dans un sol argileux il dépasse 200 jours. La durée de survie des salmonelles est également influencée positivement par un sol argileux, mais de manière moins prononcée ; le temps de demi-vie passe de 92 jours dans un sol argileux à 66 jours dans un sol sableux. L'effet positif des argiles, et dans une moindre mesure des limons, sur la survie de certains microorganismes (bactéries, champignons, virus), pourrait résulter de l'adsorption. Fixées sur les argiles, les bactéries fécales seraient protégées des prédateurs, notamment des protozoaires. En plus, les sols argileux retiennent mieux l'eau, les nutriments et tamponnent mieux les variations de pH (GIVORD et DORIOZ, 2010)

2.6.3. pH

En général, lorsque le pH s'éloigne de la neutralité la survie des bactéries semble affectée négativement. A l'issue de l'émission de la matière fécale et de son stockage, intervient l'épandage. Les pratiques employées semblent déterminantes. L'incorporation rapide des fumures dans le sol diminue d'emblée la survie des microorganismes fécaux. Le pH du sol joue alors un rôle dans la survie des microorganismes fécaux. Des études sur *E. coli* et sur *Streptococcus faecalis*, ont montré qu'un pH acide diminue la survie des deux espèces. Les pH extrêmes sont nuisibles pour les microorganismes d'origine fécale,

effet négatif se manifestant aussi avec des pH basiques. Le même constat a été relevé au niveau du pH dans les effluents (DE ANDRADE LIMA et al., 2000).

2.6.4. Teneur en matière organique

Selon DE ANDRADE LIMA et al. (2000), même si aucun résultat quantifié n'a été trouvé dans ce domaine, plusieurs études s'accordent à dire que la teneur en matière organique revêt une importance non négligeable. La survie augmente lorsque la teneur en matière organique est élevée notamment en sols hydromorphes²⁰ ; il serait même probable que, dans certaines situations, des phénomènes de recroissance soient possibles.

2.6.5. Autres facteurs

La pluviométrie : La fréquence et la densité des précipitations modifient plusieurs facteurs abiotiques du sol, dont la quantité de substances solubles. Une forte sécheresse est néfaste aux microorganismes fécaux. L'hydromorphie semble jouer en sens inverse.

Compétition : Sauf dans le cas particulier de sols stériles (normalement inexistantes en milieu naturel), le sol est un lieu où la compétition est systématique, que ce soit pour l'occupation de micro-habitats ou pour l'accès aux nutriments et à l'eau. Des études ont montré que la durée de survie de *Salmonella Typhi* et *E. coli* dans un sol stérile est quatre à sept fois plus longue que dans un sol non stérile.

Les excréments humains peuvent contenir jusqu'à quatre types d'agents pathogènes: œufs de vers, protozoaires, bactéries et virus. Ces organismes sont généralement excrétés en grandes quantités, en fonction de l'âge et de l'état de santé de l'individu ou de l'animal porteur. Les matières fécales contiennent une moyenne de 10^9 bactéries et jusqu'à 10^6 virus par gramme (pas forcément pathogènes).

Les facteurs influençant la diffusion des microorganismes dans le sol sont représentés dans le tableau 16. Il s'agit des caractéristiques physiques du sol comme la distribution de la taille des particules, du contenu et type d'argile, du contenu et type de matières organiques contenues dans le sol, du pH, des facteurs chimiques et environnementaux du sol, et des types des microorganismes.

²⁰ Hydromorphe : Se dit d'un type de sol se caractérisant par la présence d'eau et des échanges physicochimiques rapides soit avec l'atmosphère soit avec les horizons inférieurs (<http://dictionnaire.reverso.net/francais-definition/hydromorphe>)

Tableau 16 : Facteurs influençant la diffusion des microorganismes dans le sol (DE ANDRADE LIMA et al., 2000)

Facteurs	Effet sur la diffusion des microorganismes
Caractéristiques physiques du sol	
Texture (type de sol)	Le mouvement des microorganismes est facilité quand le sol est surtout de type loameux ²¹ ou sableux, car les pores sont plus grands
Distribution de la taille des particules	Les sols compacts ralentissent la diffusion des microorganismes
Contenu et type d'argile	L'argile retient davantage les microorganismes, surtout ceux chargés positivement en superficie
Contenu et type de matières organiques	Les sols riches en matières organiques ralentissent la diffusion, car ces matières favorisent la filtration
pH	Participe à la fixation électrique des anions et aux mécanismes d'adsorption
Distribution de taille des pores	Une grande taille des pores favorise la filtration
Densité du sol	Reliée à la présence plus ou moins grande de pores et fissures
Drainage (naturel ou artificiel)	Permet des mouvements plus rapides des eaux de pluie et des microorganismes dans le sol
Facteurs chimiques et environnement du sol	
Température	Les mécanismes de diffusion sont plus actifs quand la température est plus élevée ²²
Contenu d'eau du sol	Sert de solution de transport
Flux d'eau dans le sol	Orienté la diffusion dans le sol et le sous-sol
Facteurs chimiques et microbiens	
Charge ionique de la solution dans le sol	La composition chimique de la solution interfère dans le mouvement
Type de microorganisme	
Hydrophobicité ²³ en superficie du microorganisme	Conditionne les phénomènes d'adsorption
Densité et dimensions des microorganismes	Contribue à l'obstruction des pores

Les facteurs influençant la survie des bactéries et virus dans le sol, et leur temps de survie probable dans l'eau et le sol, sont respectivement récapitulés dans les tableaux 17

²¹ Loameux : *Sable granuleux, légèrement farineux ; ne se manipule pas et ne peut pas former de ruban.*

²² *L'auteur n'indique aucune fourchette de température désignée comme plus élevée*

²³ *Un composé est dit hydrophobe quand il repousse l'eau ou est repoussé par l'eau. Les produits hydrophobes sont souvent lipophiles, mais insolubles dans l'eau*

et 18. Plusieurs facteurs concourent à la survie ou à l'élimination des agents pathogènes dans le sol. L'humidité, le pH, la capacité, l'état de l'adsorption et la présence des matières organiques pour la nourriture des bactéries sont les principaux facteurs intervenants dans la durée de survie de microorganismes.

Tableau 17 : Facteurs influençant la survie des bactéries et des virus dans le sol (LEWIS et al 1988)

Facteur	Nature de l'influence sur la survie
Humidité	Survie plus importante dans les sols humides et durant les périodes de hautes précipitations
Capacité de rétention	Le temps de survie est moins dans les sols sableux que dans les sols ayant une plus grande capacité à retenir de l'humidité.
Température	Survie prolongée dans les sols à température basse ²⁴
Adsorption	L'adsorption prolonge la survie des virus dans le sol
pH	Survie diminuée dans les sols acides (pH entre 3 et 5) que dans les sols alcalins
Lumière solaire	Période de survie diminuée à la surface du sol (où il y a plus de la lumière solaire)
Matière organique	Survie prolongée pour les bactéries, avec possibilité de multiplication en présence de quantité suffisante de matières organiques.
Antagonisme de la microflore du sol	Augmentation de la survie dans un sol stérile. Les microflores du sol et les bactéries se trouvent en compétition pour les nutriments. Les microorganismes aérobies du sol compromettent la survie du virus, tandis que les micro-organismes anaérobies ne la compromettent pas.

²⁴ L'auteur n'indique aucune fourchette de température désignée comme basse

Tableau 18 : Temps de survie de certains agents pathogènes après excrétion dans le sol et l'eau ; (OMS, 1989)

Agent pathogène	Survie dans le sol	Survie dans l'eau
Virus		
<i>Enterovirus</i>	< 60 à 120 jours	< 60 à 120 jours
<i>Poliovirus</i>	32 jours	20 jours
Bactéries		
<i>Brucella abortus</i>	29 – 800 jours	--
Coliformes fécaux	20 à 70 jours	30 à 60 jours
Streptocoques	35 à 63 jours	--
<i>Leptospira spp.</i>	--	30 jours (eau usées) 8 jours (eau de rivière)
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	2 – 6 mois	1 – 3 mois
<i>Salmonella spp.</i>	20 – 70 jours	39 – 69 jours
<i>Shigella spp.</i>	--	10 – 30 jours
<i>Vibrio cholerae</i>	10 – 20 jours	10 – 30 jours
Parasites		
<i>Entamoeba histolytica</i> (kystes)	10 – 20 jours	15 – 30 jours
<i>Ascaris</i> (œufs)	Plusieurs mois	Plusieurs mois
<i>Ancylostoma</i> (larves)	30 – 90 jours	--
<i>Taenia saginata</i> (œufs)	Plusieurs mois	--
<i>Trichuris trichiura</i> (œufs)	Plusieurs mois	--

2.7. Contamination de l'eau par des éléments chimiques et son impact sur la santé.

Les préoccupations sanitaires associées aux constituants chimiques de l'eau de boisson sont de nature différente de celles suscitées par la contamination microbienne, et résultent principalement de la capacité de ces constituants chimiques à provoquer des effets nocifs pour la santé à l'issue de durées d'exposition prolongées. Il existe peu de constituants chimiques de l'eau susceptibles d'entraîner des problèmes de santé après une exposition unique, sauf en cas de contamination accidentelle massive. En outre, l'expérience montre que, dans une forte proportion des cas d'incidents de ce type, l'eau devient imbuvable en raison d'un goût, d'une odeur ou d'un aspect inacceptables.

D'après l'association COGITERRA (2012), il y a dans l'Union Européenne, plus de 100.000 produits chimiques qui sont inscrits à l'inventaire européen des substances chimiques existantes, dont 30.000 à 70.000 sont d'usage régulier. Des études récentes ont montré que de nombreuses substances dites émergentes, composés jusque-là peu recherchés, étaient émises dans l'environnement dans des quantités supérieures aux estimations couramment admises et y présentaient un caractère persistant.

Selon MARCHAND (1989), certaines substances chimiques sont toxiques et leur rejet dans l'environnement peut constituer une menace pour l'équilibre des écosystèmes aquatiques et pour la santé de l'homme. Ces substances polluantes appartiennent à différentes familles chimiques comme les cétones, aldéhydes, éthers, esters, acides, hydrocarbures aromatiques ou non, les polychlorobiphényles (PCB), phtalates, hétérocomposés, chlorobenzène, pesticides etc.

A titre d'exemple, dans leur étude sur la zone des Niayes au Sénégal, CISSÉ et al. (2003) ont soulevé des résultats qui montrent que plus d'une centaine de types de produits sont employés de manière non maîtrisée et en l'absence de tout contrôle législatif quant à leur utilisation. Cette situation entraîne, selon les auteurs, un risque de contamination de la nappe phréatique par des résidus de pesticides qui peuvent nuire à la santé humaine et animale.

GONZALES - ALONSO S. et al. (2010) en Bolivie, ont soulevé dans leur travail dans les communes de la région El Chaco que les habitants consomment une eau polluée par les hydrocarbures, l'aluminium, le magnésium, le fer et l'arsenic dans un rayon de 30 km autour des puits d'extraction du pétrole.

Concernant l'arsenic à titre d'exemple, les résultats d'une étude menée au Bangladesh (GOLDGEWICHT, 2005), un des pays les plus touchés au monde par la contamination des eaux par l'arsenic, suggèrent que l'exposition chronique à cet agent chimique pourrait augmenter le risque d'avortements spontanés et de mortalité. Une deuxième étude du même auteur conduite dans le même pays (GOLDGEWICHT, 2006), ayant mesuré les expositions personnelles, montre une forte relation dose-réponse entre exposition à l'arsenic via la consommation d'eau de puits et risques de kératose cutanée isolée et de kératose avec mélanose. Le risque était accru même chez les habitants consommant une eau contenant moins de 5 µg/L d'arsenic, limite autorisée actuellement dans le pays.

Si l'on exclut les risques d'intoxications aiguës, généralement de caractère accidentel et souvent liés à la manipulation des produits, l'exposition chronique constitue le principal facteur de risque lié aux produits chimiques dans l'eau. Il s'agit d'un risque à long terme, difficile à estimer car lié à la consommation de doses très faibles, mais répétitives, avec des effets de synergies possibles entre les différentes substances chimiques. Il pourrait être à l'origine de cancers (leucémies notamment), de troubles du système nerveux, ainsi que de troubles de la reproduction. La nature de la toxicité des pesticides diffère selon la substance considérée (MSS-FRANCE, 2005)

Les polluants chimiques de l'eau peuvent avoir des effets différents, tout dépend de la nature chimique du polluant et de l'organisme considéré, ainsi que de la dose et du temps d'exposition et d'autres facteurs. La génotoxicité, la cancérogénicité, la neurotoxicité, et les problèmes de reproduction, ainsi que les effets sur le comportement sont les principaux types d'impact sanitaire des polluants chimiques sur les organismes humain et animal.

2.7.1. Génotoxicité

La génotoxicité, appelée également toxicité génétique, représente la capacité de certains agents physiques, chimiques ou biologiques à provoquer l'apparition de dommages à l'ADN qui peuvent conduire à des mutations génétiques si ces lésions ne sont pas réparées. Ces agents sont qualifiés de mutagènes (CACHOT et al., 2009)

Plusieurs sont les composés qui pénètrent dans les organismes causant des dommages à l'ADN. Ces composés sont appelés des génotoxines. En général, lorsque l'ADN est endommagé, un système naturel de réparation le remet dans son état normal, mais quand ce système ne marche pas pour une quelconque raison, les cellules avec

l'ADN endommagé peuvent se diviser. Il y a alors production de cellules mutantes et le défaut peut se diffuser, de ce fait la descendance de l'organisme peut avoir de sérieux défauts qui sont souvent néfastes pour sa santé. L'aflatoxine et le chlorure de vinyle sont des exemples de génotoxines.

2.7.2. Cancérogénicité

Plusieurs polluants sont cancérogènes, ce qui signifie qu'ils peuvent entraîner un cancer chez l'être humain et les animaux. Les polluants cancérogènes sont des polluants qui jouent un rôle dans une ou plusieurs étapes de développement du cancer dans l'organisme.

Les polluants peuvent être le déclencheur, en introduisant des propriétés pouvant provoquer un cancer dans la cellule. Ils peuvent aussi être des promoteurs, en promouvant la croissance des cellules qui peuvent développer des cancers. Les cellules cancéreuses détruisent les cellules normales du corps et entraînent des cancers dans les organes.

2.7.3. Neurotoxicité

Le système nerveux est très sensible aux effets toxiques des produits chimiques, qu'ils soient naturels ou synthétiques. Les produits chimiques qui ont des effets neurologiques sont appelés des neurotoxines. Par exemple les insecticides sont de dangereuses neurotoxines.

Les neurotoxines perturbent d'une façon ou d'une autre la transmission des impulsions le long des nerfs ou à travers les synapses. Les conséquences de la neurotoxicité sont multiples. Il peut s'agir de tremblements musculaires, de convulsions, d'un mauvais fonctionnement des nerfs et des transmissions, de vertiges ou de dépression ou même un mauvais fonctionnement complet de certaines parties du corps.

2.7.4. Problèmes de reproduction

Déjà Darwin dans son « Origine des espèces » paru en 1859, parle de « l'extrême sensibilité du système reproducteur pour tout changement dans les conditions extérieures » et « de l'excessive sensibilité du système reproducteur pour tout changement, même insignifiant, dans Les conditions ambiantes ». Les polluants entraînant des échecs reproductifs du fait de dommages sur les organes reproducteurs

sont appelés perturbateurs (ou modulateurs) endocriniens. Il y a plusieurs façons pour un polluant de perturber le système endocrinien.

D'autres hormones peuvent être inhibées par fixation de produits chimiques sur les récepteurs, et cela peut entraîner l'infertilité lorsque ça s'étale sur une longue période. A titre d'exemple, on a soulevé une corrélation entre le taux de polychlorobiphényles relevé dans la graisse sous-cutanée de loutres trouvées mortes, et la démographie de l'espèce. Pour un taux supérieur à 50 mg de PCB /kg, l'espèce s'éteint inexorablement, car il entraîne la stérilité des individus (MOUTOU et JOSEPH-ENRIQUEZ, 1991)

2.7.5. Effets sur le comportement

Tous les comportements sont vulnérables à une altération par les polluants. Le comportement social ou sexuel peut être modifié, entraînant une diminution de la reproduction. La vulnérabilité face aux prédateurs peut augmenter, du fait d'une baisse de la vigilance. Ainsi l'effet des polluants sur les comportements entraîne une baisse de la production et un taux de mortalité plus élevé. Une conséquence fréquente de la pollution est une perte d'appétit et donc une diminution de la prise de nourriture.

La recherche des proies peut aussi être affectée, du fait des effets des polluants sur l'apprentissage, les stratégies de recherche et le système sensoriel. Ces effets sur le comportement diminuent les chances de survie des organismes, surtout des animaux. L'une des propriétés des polluants que l'on doit toujours garder à l'esprit c'est leur possibilité d'interagir avec un autre. Les réactions chimiques permettant aux polluants de se combiner peuvent diminuer leurs effets, mais aussi les augmenter, rendant ainsi un polluant encore plus dangereux pour les organismes.

2.7.6. Cas des pesticides :

Des suspicions subsistent sur le rôle des pesticides (lors d'expositions environnementales et/ou professionnelles) dans les pathologies telles les troubles neurodégénératifs, troubles de la reproduction, de la fertilité ou de certains cancers (leucémies, rein, cerveau etc.). Des craintes portent sur les perturbateurs endocriniens et les résidus de médicaments. A titre d'exemple, le fluor à faible dose est un oligo-élément aux effets bénéfiques (protection contre les caries) ; mais à forte dose, il peut provoquer des fluoroses dentaires (lésions et tâches sur l'émail).

L'eau n'est qu'une des voies d'exposition aux nitrates, pesticides et aluminium. Les phosphates provenant des lessives et des engrais participent en première ligne au

processus d'eutrophisation, phénomène aux conséquences environnementales comme le développement des algues, notamment en zones estuariennes ; et sanitaires comme la libération de toxines algales.

2.7.7. Cas des métaux lourds :

Les métaux lourds (plomb, mercure, cadmium et autres) sont d'origine industrielle ou artisanale ; ils sont accumulables en certains points fluviaux ou littoraux et peuvent être concentrés par la flore et la faune aquatiques (poissons et coquillages par exemple).

Ils sont à l'origine de véritables intoxications humaines historiques ou plus récentes comme la catastrophe de mercure à Minamata au Japon, où des pêcheurs sont morts après avoir consommé du poisson particulièrement riches en mercure (BLANCER, 1978). Autres métaux peuvent également contaminer le milieu hydrique comme le cadmium, le plomb, le cuivre, le vanadium et le titane. Les métaux peuvent former des métalloïdes et ensuite se lier aux composés organiques pour former des substances lipophiles souvent hautement toxiques et qui peuvent être stockés dans les réserves de gras des animaux et des humains.

Les métaux peuvent également se lier à des macromolécules cellulaires dans le corps humain. Les métaux lourds sont les métaux les plus dangereux. Ils ne peuvent pas être décomposés en composés moins nocifs, car ils sont non-biodégradables. Cependant, les organismes vivants ont besoin de métaux, car ils sont essentielles pour leur santé et sont souvent des composants essentiels des enzymes (LENNTECH, 2013).

2.7.8. Cas des produits phytopharmaceutiques :

La problématique des résidus phytopharmaceutiques a été soulevée seulement ces dernières années, et les progrès de l'analyse des traces (< ng/L) de ces substances dans l'environnement ont permis de vérifier l'hypothèse selon laquelle des molécules à usage pharmaceutique pourraient être introduites à partir des eaux usées urbaines dans les eaux estuariennes, eaux souterraines et côtières. À ce titre, les médicaments, mais aussi certains cosmétiques, doivent être considérés comme des contaminants potentiels de l'environnement. Les effets synergiques ou antagonistes potentiels sur les organismes aquatiques et la santé humaine devraient être étudiés non seulement entre les différentes molécules médicamenteuses présentes majoritairement dans le milieu, mais également entre médicaments et contaminants chimiques.

En abordant la problématique des résidus phytopharmaceutiques, BUDZINSKI et TOGOLA (2006) ont signalé qu'il est maintenant avéré que les substances pharmaceutiques sont présentes dans les milieux aquatiques anthropisés, sous l'influence des rejets des stations d'épuration ou le rejet direct des égouts. Concernant le risque humain d'exposition aux substances pharmaceutiques par la consommation des eaux de boisson, il est montré (selon les auteurs) que dans l'état actuel des connaissances, l'exposition à des concentrations inférieures à la dizaine de ng/L ne présente pas de risque. Cette estimation se fait néanmoins, d'une part en prenant en compte l'effet individuel des substances, négligeant ainsi un potentiel effet synergique de ces produits, et, d'autre part, sur la base d'études toxicologiques très limitées (toxicité aiguë pour les autorisations de mise sur le marché et quelques études de toxicité chronique).

Dans le même sens, LÉVI (2006) a indiqué dans son étude que les eaux usées et les eaux de surface sont contaminées par des résidus de médicaments parmi lesquels se retrouvent des résidus d'antibiotiques. C'est une situation indésirable, mais logique et proportionnelle aux tonnages employés aussi bien en médecine humaine que vétérinaire au même titre que toutes les autres molécules que nous utilisons en grandes quantités. Le risque sanitaire est associé aux effets de ces molécules, y compris d'éventuelles allergies. Ces résidus se trouvent mélangés à de très nombreux autres polluants tels que des plastifiants, des pesticides, des hydrocarbures ou des solvants et c'est une préoccupation globale de l'effet sanitaire de ces substances.

II. ÉTUDE MICROBIOLOGIQUE

1. Matériel et méthodes

1.1. Caractérisation des puits

Dans la zone administrative de la commune de Martil, onze puits ont été sélectionnés et quatre autres puits sont localisés dans la commune de Tétouan. Dans la figure 20, les puits sont désignés par des disques bleus numérotés de 1 à 15. La carte laisse dégager les localisations des secteurs et des puits et évaluer leurs distances par rapport aux centres d'agglomérations, la mer et oued Martil.



Figure 20 : Situation géographique de la zone d'étude au nord du Maroc avec position des communes de Martil et de Tétouan et emplacement des puits prospectés (Les puits sont désignés de P1 à P15)

Les quinze puits choisis constituent le réseau d'observation rationalisé en vue du suivi de la qualité de la nappe. Chacun de ces puits a fait l'objet, au préalable, d'une enquête portant sur :

- **Sa position** par rapport aux sources estimées de contamination fécale et urbaine : les puits 1, 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11, 12 et 13 se trouvent dans des secteurs caractérisés par une présence importante de sources de pollution urbaine. Les puits 7, 8, 9, 14 et 15 se trouvent dans des secteurs où les sources de pollution urbaine sont minimales. Il s'agit de zones pastorales ou agricoles non intensives. Le secteur du quartier Diza, à titre d'exemple, où se trouvent les puits 1 ; 2 et 3 ; est caractérisé par une pollution anthropique majeure causée principalement par l'absence totale de réseau d'assainissement liquide. On doit ajouter à cette situation l'existence de fosses septiques non normalisées et leur débordement, l'existence du bras mort pollué de Martil, la gestion vétuste et médiocre des déchets ménagers et la présence des puits mal entretenus. La figure 21 illustre les sources estimées de pollution de chaque secteur choisi pour l'étude.

- Le secteur I est le secteur Diza. Les sources ponctuelles de pollution sont : eaux usées dans la voie publique, fosses septiques non normalisées et leur débordement, bras mort hautement pollué, déchets ménagers mal gérés et puits mal entretenus.
- Le secteur II : Quartiers Chbar et Ahrik
- Le secteur III : Jammae Tassiast et foug el Oullik
- Le secteur IV : Route Martil Tétouan
- Le secteur V : Quartier Coelma à Tétouan
- Le secteur VI : Zone en amont de la ville de Tétouan (route vers Tanger et route vers Chaouen) (figures 20 et 21)



Figure 21 : Emplacement des sources estimées de pollution de la nappe au niveau des secteurs choisis (secteurs désignés de S1 à S6)

- Piézométrie, profondeur et usage actuelle des puits :** Le niveau de la surface libre de l'eau a été mesuré. Toutefois, les différentes valeurs piézométriques enregistrées seulement une fois au mois 01/2011 ne peuvent être considérées comme valeurs moyennes représentatives de tout le système aquifère de la plaine, mais elles peuvent être indicatives. Le niveau de la surface libre de l'eau varie entre zéro mètre (l'eau affleure) et trois mètres. Les profondeurs des puits prospectés varient entre 3 et 8 m (les plus profonds se situent à la commune de Tétouan). Leurs diamètres varient entre 1,20 m et 3 m. Les puits sont équipés de margelles de hauteur entre 0,30 à 1,50 m et ils sont totalement ou partiellement couverts. L'eau est utilisée, selon les ménages, pour usage domestique, abreuvement du bétail, jardinage, ablutions et boisson (tableau 19). D'autre part, on a trouvé des puits qui sont creusés dans le seul but de construire une maison ou un bâtiment, en raison de la gratuité de l'exploitation des eaux souterraines.

Tableau 19 : Piézométrie et types d'usage des puits prospectés

Désignation des puits	Piézométrie en m Janvier 2011	Types d'usage des puits
Puits n°1	1,5	Usage domestique à l'exception de la boisson
Puits n°2	0,80	Usage domestique à l'exception de la boisson
Puits n°3	0,95	Usage domestique à l'exception de la boisson
Puits n°4	3,10	Usage domestique à l'exception de la boisson
Puits n°5	2,55	Usage domestique à l'exception de la boisson
Puits n°6	1,20	Agriculture, abreuvement du bétail, jardinage ; ablutions
Puits n°7	0,30	Agriculture, abreuvement du bétail, éventuellement usage domestique et boisson
Puits n°8	0,30	Agriculture, abreuvement du bétail, usage domestique, rarement boisson.
Puits n°9	0,50	Agriculture, abreuvement du bétail, usage domestique, rarement boisson
Puits n°10	1,80	Agriculture, abreuvement du bétail, usage domestique, rarement boisson
Puits n°11	0,75	Agriculture, abreuvement du bétail, éventuellement usage domestique et boisson
Puits n°12	L'eau affleure	Ablutions, lavage, jardinage, usage public à l'exception de la boisson
Puits n°13	0,60	jardinage, usage domestique, boisson
Puits n°14	0,05 (l'eau affleure)	Abreuvement du bétail, agriculture, éventuellement usage domestique et boisson.
Puits n°15	1,70	Abreuvement du bétail, agriculture, éventuellement usage domestique et boisson.

Les puits qui sont choisis sont strictement parmi ceux où on ne pratique pas la chloration pour ne pas influencer les résultats des analyses bactériologiques. Toutefois, la chloration des puits dans la commune concernée n'est pratiquée par les propriétaires qu'à titre exceptionnel.

1.2. Campagnes de prélèvements

Les campagnes de prélèvements ont été réalisées durant une année. Au niveau de chaque puits on a réalisé six prélèvements bimestriels durant la période d'étude. Les premières, deuxièmes, troisièmes, quatrièmes, cinquièmes et sixièmes prélèvements et

analyses ont eu lieu respectivement en mai/juin 2010, juillet/août 2010, septembre/octobre 2010, novembre/décembre 2010, janvier/février 2011 et mars/avril 2011.

Chaque prélèvement contient 750 ml d'eau. Les flacons stériles pour les analyses bactériologiques ont été fournis par le Laboratoire de l'Environnement de la Division d'Hygiène de la Commune Urbaine de Tétouan. Les flacons sont stérilisés dans un autoclave à 120°C pendant 2 heures avant chaque nouveau prélèvement. Tous les prélèvements dans les puits sont effectués après pompage de trois minutes pour prélever de l'eau profonde des puits. Pour les puits ne disposant pas de système de pompage, l'eau est prélevée à environ 50 cm de la surface libre de l'eau, et c'est la troisième levée de l'eau qui est retenue comme eau d'analyse. Toutes les précautions sont prises afin d'éviter d'éventuelles contaminations. Le transport au laboratoire s'effectue dans une glacière propre réfrigérée (4°C). Les analyses commencent 2 à 5 heures après échantillonnage, et un même prélèvement servait pour les trois catégories d'analyses (c.à.d. pour les CT, CF et SF).

1.3. Analyses de laboratoire : principes et méthodes

Méthode de la filtration sur membrane :

Cette technique permet de dénombrer les bactéries présentes même en petit nombre dans l'eau. Un volume d'eau de 100 ml est filtré aux travers d'une membrane filtrante dont les pores de 0,45 µm ne laissent pas passer les bactéries. Celles-ci, après filtration sont retenues sur la membrane. Cette dernière est déposée sur un milieu de culture gélosée. Selon HMID et al. (1997), le choix du volume d'échantillon à filtrer dépend de la nature de l'eau. Lorsqu'on suspecte que l'eau provient d'un puits (ou secteur) trop pollué, on peut diminuer le volume de l'eau analysée et ne filtrer par ainsi que 20 ou 10 ml. Chaque bactérie retenue sur la membrane donne naissance à une colonie après incubation à l'étuve. Les colonies sont ensuite dénombrées et l'on connaît alors le nombre de bactéries présentes dans l'échantillon d'eau analysée de 100, 20 ou 10 ml.

Dans notre étude, le milieu de gélose lactosée au TTC-Tergitol a été employé pour le dénombrement des coliformes totaux et coliformes fécaux, la gélose de Slanetz et Bartley pour les streptocoques fécaux (HMID et al, 1997). L'incubation de ces milieux à 37°C pendant 24 à 48 heures permet le dénombrement de s coliformes totaux et les streptocoques fécaux. Les coliformes fécaux sont incubés à 44±0,5°C.

Le protocole d'analyse proprement dite est le suivant :

- Placer la membrane filtrante stérile sur le porte-filtre stérile
- Filtrer 100 ml d'échantillon (eau de puits)
- Enlever la membrane filtrante et la déposer sur la gélose spécifique

Parmi autre matériel utilisé dans les analyses microbiologiques de laboratoire, Il s'agit de l'appareil de filtration sur membrane type Sartorius AG, l'incubateur Incucell, les membranes filtrantes Sartorius Stedimle Bain Marie Selecta et la verrerie Pyrex.

Le dénombrement des colonies est ensuite effectué par l'appareil de comptage Rocker. Le résultat s'exprime en unité formant colonie (UFC) par unité de volume. Un total de 90 analyses a été réalisé pour les CT, 90 analyses pour les CF et 90 analyses pour les SF pour le système aquifère choisis (15 puits).

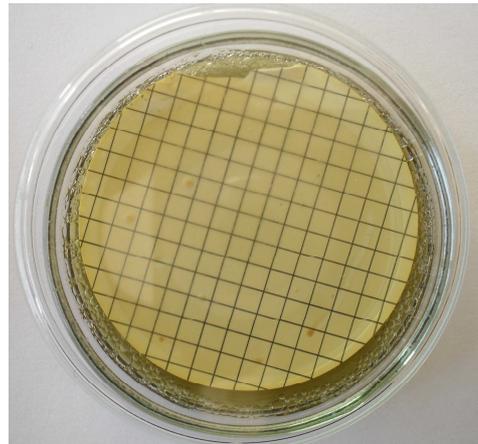
2. Résultats et discussion

2.1. Analyse des résultats au niveau des puits et secteurs

Après les procédures d'incubation on a effectué le dénombrement des colonies dans les boites de Pétri. La figure 22 illustre quelques échantillons positifs et négatifs de coliformes et de SF dans les boites de Pétri après le temps nécessaire passé à la température adéquate d'incubation.



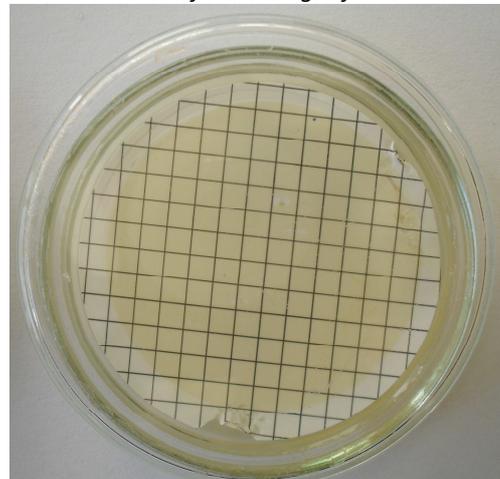
Coliformes positifs



Coliformes négatifs



Streptocoques fécaux positifs



Streptocoques fécaux négatifs

Figure 22 : Quelques échantillons de coliformes et SF sur boîte de Pétri (réalisés au laboratoire de l'environnement de CU de Tétouan. Photo Lamribah)

Selon notre enquête, beaucoup de ménages utilisent l'eau de leurs puits pour le bâtiment, la vaisselle, la douche, les ablutions, et même la boisson. NEJJARI (2007) a aussi relevé dans son travail que l'eau des puits de Martil est largement utilisée par les habitants comme eau potable. C'est pour cette raison que l'analyse des résultats est faite sur la base de la norme fixée pour la qualité de l'eau potable. Cette norme fixe à zéro le nombre d'UFC/100 ml d'eau pour toutes les groupes microbiennes dépistées, c.à.d. CT, CF et SF (HMDI et al., 1997).

Il ressort des analyses effectuées que durant toute la période d'étude (une année), 100%, 96,66% et 92,22% des analyses des CT, CF, SF respectivement ne répondent pas à la norme de l'eau potable. Les figures 23, 24 et 25 montrent, respectivement, les

concentrations en CT, CF et SF dans les eaux de puits prospectés durant la période d'étude.

Quoique les concentrations des groupes bactériennes dépistées dans l'eau des puits dépassent largement la norme prescrite pour l'eau potable, l'analyse a laissé dégager des différences importantes entre différents puits analysés. Ceci est dû probablement à leur emplacement par rapport aux différentes sources estimées de pollution et/ou à la saison (humide ou sèche) durant laquelle se sont déroulées les analyses.

Pour cela, on a fixé une concentration repère arbitraire de 200 UFC de bactéries étudiées /100 ml afin d'éclaircir les résultats au niveau de différents groupes de puits. Les figures 23, 24 et 25 distinguent également le dépassement de la dite concentration par un trait plein.

- Les puits 1, 2 et 3 (secteur I) se trouvent dans le quartier Diza. C'est le secteur le plus pauvre de la commune en termes d'infrastructure ; ce quartier souffre d'un manque total d'assainissement liquide (eaux usées à l'air libre et fosses septiques non normalisées), de graves défaillances d'assainissement solide, et il est entouré par le bras mort hautement pollué de l'oued Martil. Les concentrations dans ces puits dépassent le seuil de 200 UFC/100 ml dans 100%, 61,11% et 38,8% des analyses des CT, CF et SF respectivement. Un pourcentage de dépassement de seuil est calculé comme le rapport du nombre des échantillons dépassant le seuil de 200 UFC/100 ml dans un secteur sur le nombre total des échantillons analysés pour un groupe de bactéries dépistées (CT, CF, SF) au niveau du secteur en question ; le tout multiplié par 100 (voir résultats détaillés en annexe)

Exemple : pour les CF en secteur I (3 puits) :	Exemple pour les CT en secteur III (3 puits)
Nombre total des analyses effectuées : 18	Nombre total des analyses : 18
Nombre des analyses dépassant le seuil de 200 UFC/100 ml : 11	Nombre des analyses dépassant le seuil de 200 UFC/100 ml : 5
Pourcentage de dépassement = $(11/18) \times 100$ = 61,11 %	Pourcentage de dépassement = $(5/18) \times 100$ = 27,77 %

- L'analyse des eaux de puits 4, 5 et 6 (secteur II) a révélé des concentrations dépassant les 200 UFC/100 ml dans 83,33% des échantillons pour les CT. Seulement 16,66% des échantillons dépassent 200 UFC/100 ml pour les deux groupes, CF et SF. L'équipement du quartier par un réseau d'assainissement (contrairement au quartier Diza) semble prévenir contre une pollution massive et dangereuse de la nappe et par conséquent des puits.

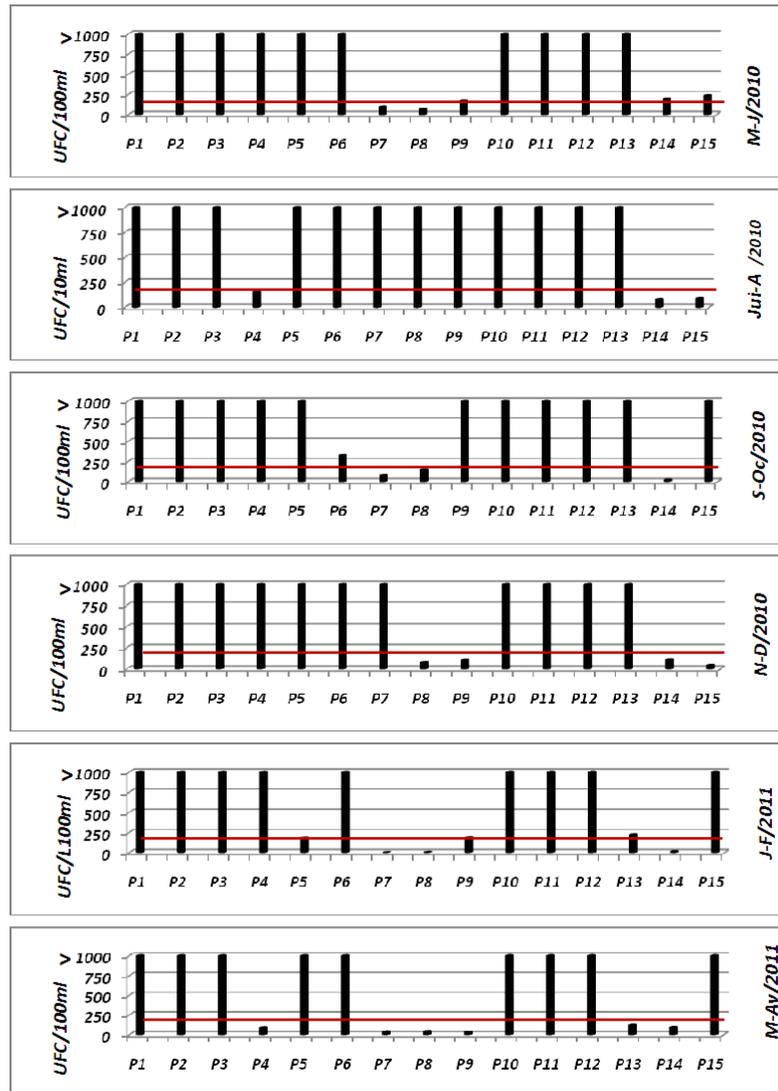


Figure 23 : Graphiques de concentrations des CT en UFC/100 ml d'eau, durant la période d'analyse des eaux de puits de la plaine de Martil. (M-J : Mai-Juin ; Jui-A : Juillet-Août ; S-Oc : Septembre-Octobre ; N-D : Novembre-Décembre ; J-F : Janvier-Février ; M-Av : Mars-Avril. P: puits). Le trait plein désigne la concentration/seuil de 200 UFC/100 ml

- Les puits 7, 8 et 9 (secteur III) se trouvent dans une zone verte non résidentielle, à caractère pastorale et agricole non intensifs, où les sources estimées de pollution de la nappe sont minimales. Les résultats des analyses semblent répondre à cette réalité en indiquant seulement 27,77%, 16,66% et 0% échantillons supérieurs à 200 UFC/100 ml, pour les CT, CF et SF respectivement.

Les puits 10 et 11 (secteur IV) se trouvent au bord de l'oued Martil. Ils sont en aval de tous les polluants liquides de la ville de Tétouan versés dans la rivière. La zone non

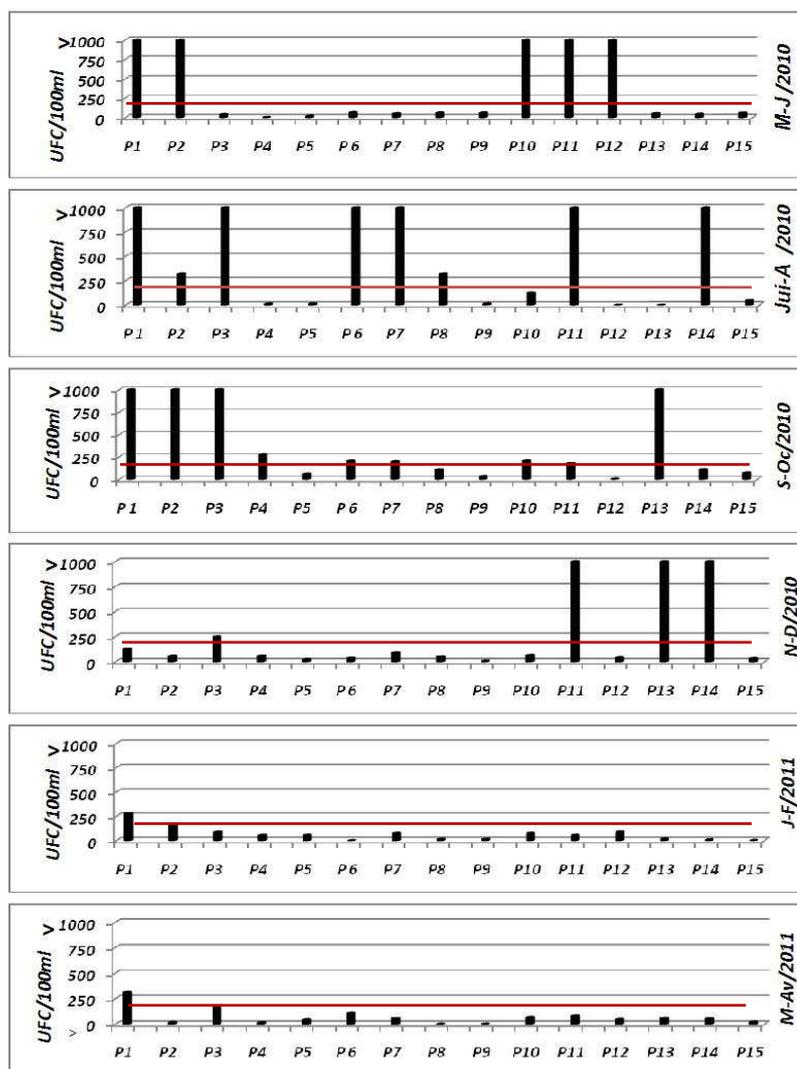


Figure 24 : Graphiques de concentrations des CF en UFC/100 ml d'eau, durant la période d'analyse des eaux de puits de la plaine de Martil. (M-J : Mai-juin ; Jui-A : Juillet- Août ; S-Oc : Septembre-Octobre ; N-D : Novembre-Décembre ; J-F : Janvier-Février ; M-Av : Mars-Avril. P: puits). Le trait plein désigne la concentration/seuil de 200 UFC/100 ml

équipée de réseau d'assainissement liquide est de plus connue pour son activité agricole et l'élevage.

L'analyse de ces deux puits révèle durant toute l'année une forte contamination des eaux souterraines par les CT (100% des échantillons dépassent les 200 UFC et même les 1000 UFC de CT /100 ml). Le dépistage révèle également que 41,6 % et 50 % des puits ont une eau dépassant la concentration de 200 UFC/100 ml pour les CF et SF respectivement.

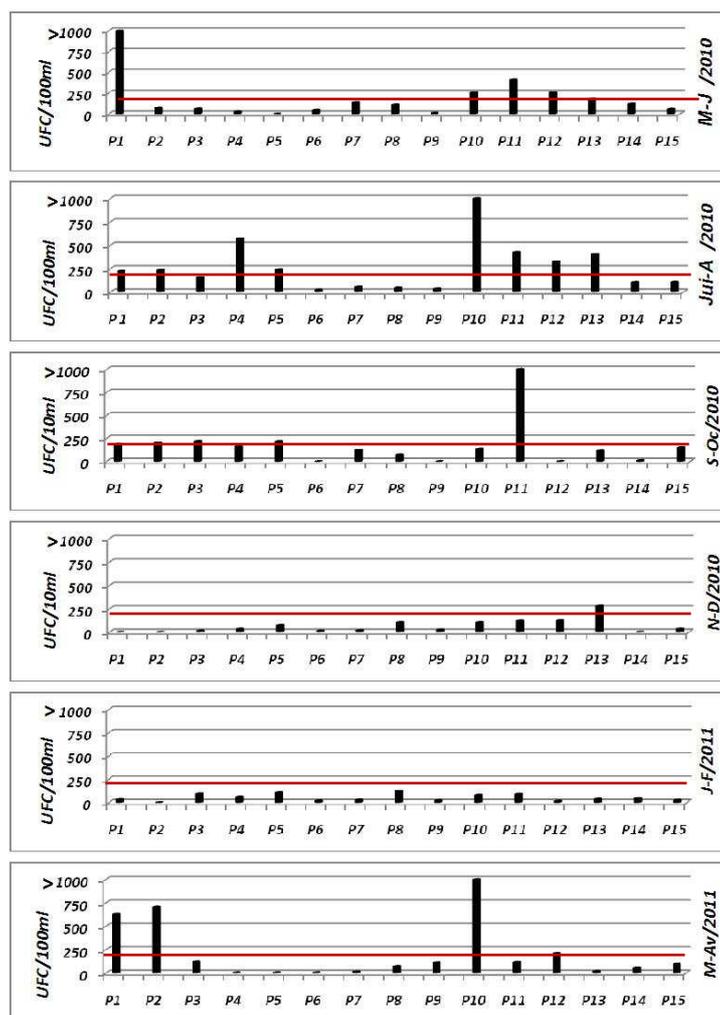


Figure 25 : Graphiques de concentrations des SF en UFC/100 ml d'eau, durant la période d'analyse des eaux de puits de la plaine de Martil. (M-J : Mai-juin ; Jui-A : juillet- août ; S-Oc : septembre-octobre ; N-D : novembre-décembre ; J-F : janvier-février ; M-Av : Mars-Avril. P: puits). Le trait plein désigne la concentration/deuil de 200 UFC/100 ml

- Quant aux puits 12 et 13 (secteur V), ils se trouvent dans un quartier à forte densité résidentielle (quartier Coelma). Le quartier se trouve juste sur la rive d'oued Martil. Il se trouve également en aval des polluants liquides versés dans la rivière. Quoique le site est équipé de réseaux d'assainissement liquide, les résultats des analyses des puits indiquent une qualité médiocre de l'eau souterraine : 91,66%, 25% et 41,66% des échantillons ont des concentrations supérieures à 200 UFC/100 ml, pour les CT, CF et les SF respectivement.

- Finalement, les puits 14 et 15 (secteur VI) se trouvent en amont de la partie polluée de l'oued Martil, dans une zone ne subissant pas de pression anthropique. Les résultats montrent 33,33% et 16,66% des échantillons qui dépassent 200 UFC/100 ml d'eau pour les CT et CF respectivement. Au niveau des mêmes puits, aucun échantillon ne dépasse les 200 UFC/100 ml pour les SF. En absence des sources majeures de pollution des eaux souterraines au niveau des puits 14 et 15, la contamination relevée pourrait émaner d'un comportement non hygiénique des usagers ou d'utilisation de matériel non propre (seaux, cordes, couvercles, margelles, manque d'hygiène personnelle etc.), ou autre contamination exogène. Le petit nombre d'animaux élevés par les propriétaires des deux puits (ne dépassant pas quelques bovins et quelques ovins chacun selon notre enquête) peut également expliquer les résultats trouvés et influencer la qualité des eaux souterraine de la zone.

Les pourcentages de dépassement du seuil de 200 UFC /100 ml de CT, CF et SF selon les secteurs prospectés sont respectivement représentés dans les figures 26, 27 et 28.

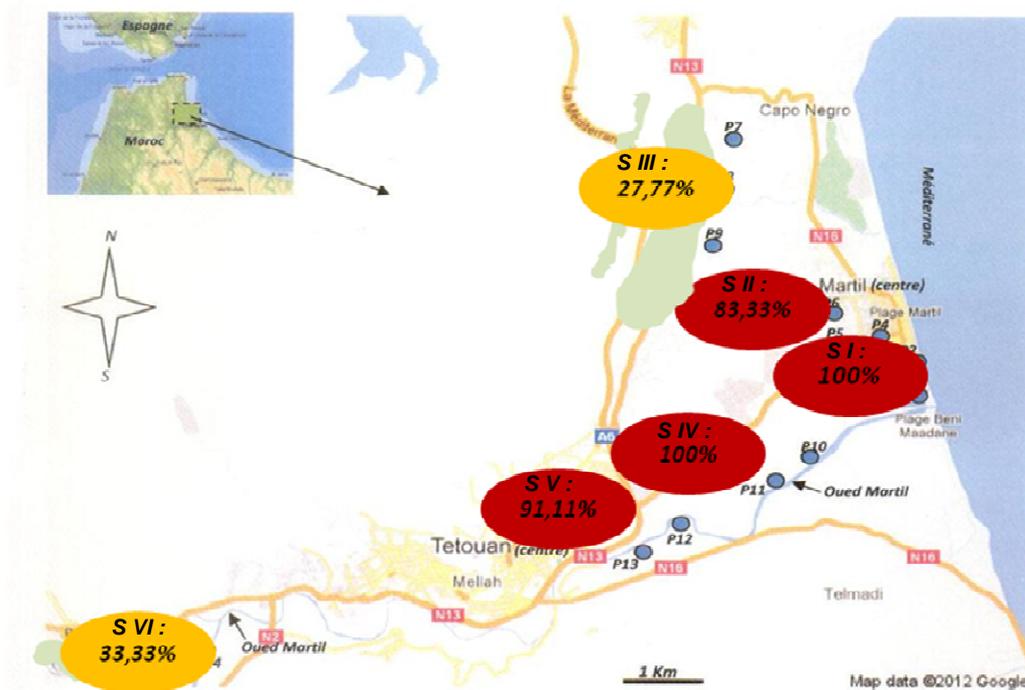


Figure 26 : Pourcentage de dépassement du seuil de 200 UFC /100 ml de CT selon les secteurs étudiés (Secteur I, II, III, IV, V et VI).

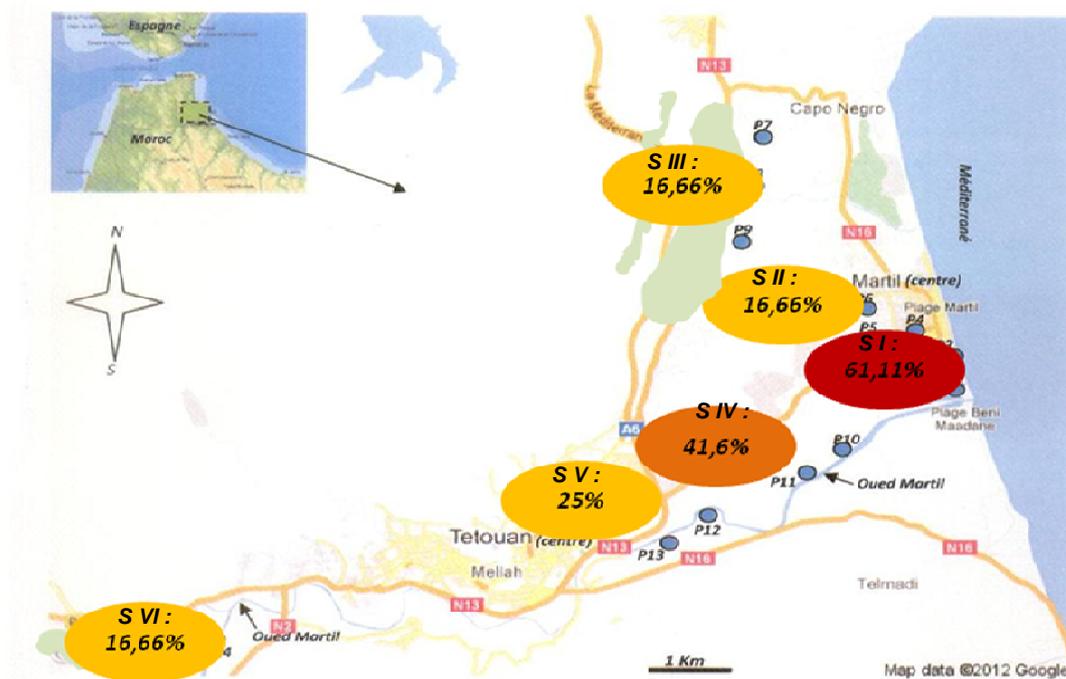


Figure 27 : Pourcentage de dépassement du seuil de 200 UFC /100 ml de CF selon les secteurs étudiés (Secteur I, II, III, IV, V et VI).

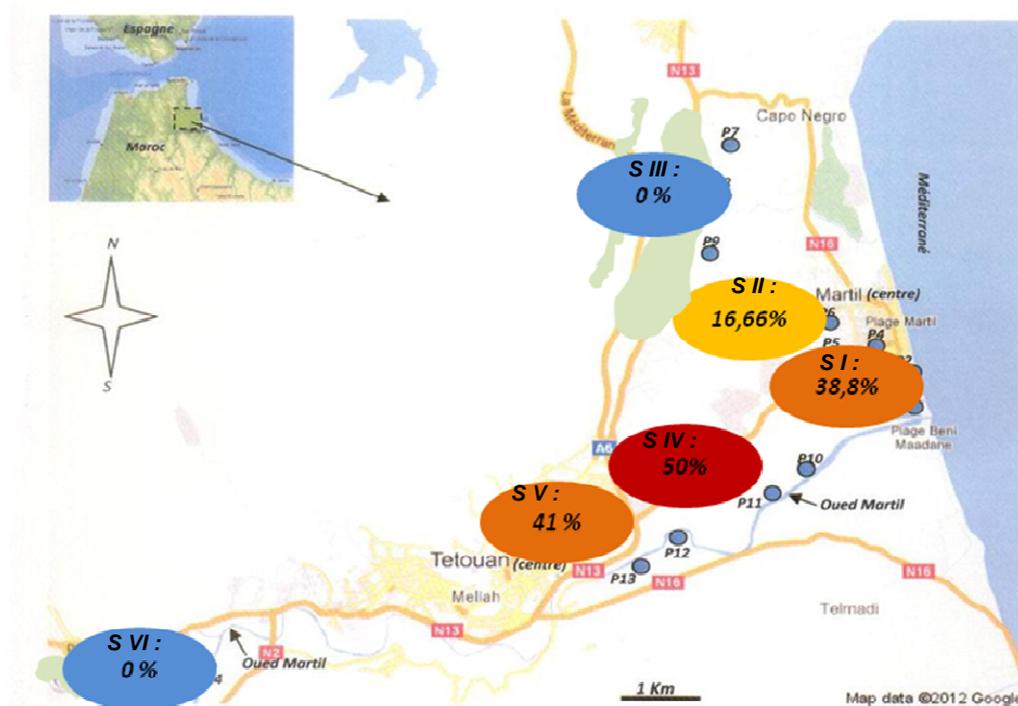


Figure 28 : Pourcentage de dépassement du seuil de 200 UFC /100 ml de SF selon les secteurs étudiés (Secteur I, II, III, IV, V et VI).

2.2. Influence probable de la saisonnalité

L'étude a relevé une probable influence saisonnière sur le taux de contamination microbienne de la nappe phréatique de Martil. En effet, 52,27% ; 72,22% et 92,30% des échantillons qui dépassent les 200 UFC/100 ml de CT, CF et SF respectivement, l'ont été durant la période sèche (été) de l'année contre 47,73% ; 27,78% et 7,69% durant la période humide (hiver).

Le pourcentage des échantillons dont les concentrations en SF, CF et CT dépassent le seuil de 200 UFC /100 ml, selon les saisons estivale et hivernale, est bien mis en évidence dans la figure 29.

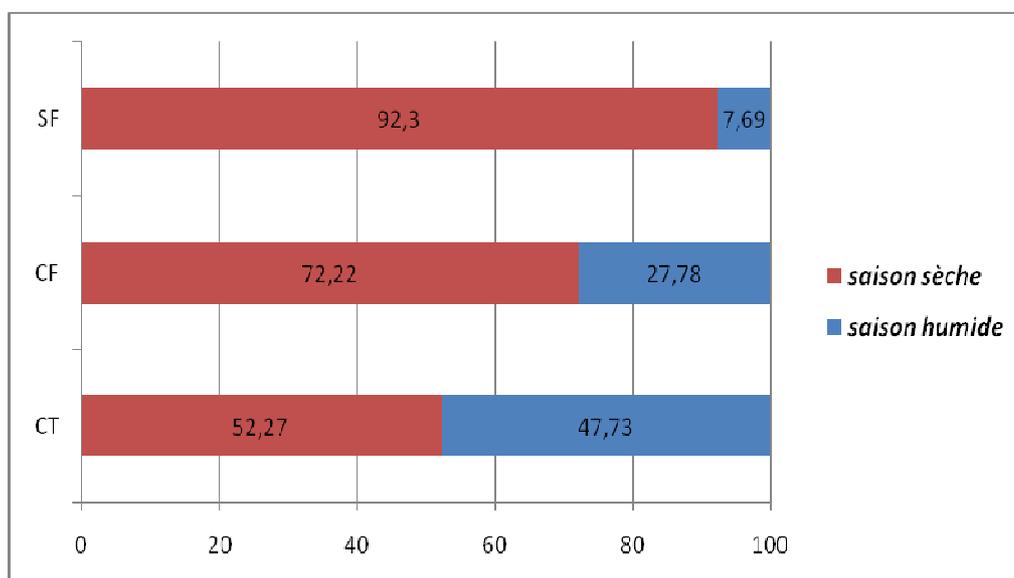


Figure 29 : Pourcentage des échantillons dont les concentrations en SF, CF et CT dépassent 200 UFC/100 ml selon les saisons sèche et humide

L'augmentation du taux des bactéries indicatrices de la contamination fécale en période sèche pourrait être expliquée par l'élévation de température favorable à la multiplication dans les eaux usées des microbes dépistés. Durant la période humide, la température n'est pas optimale pour la prolifération des groupes microbiens suivis. Selon BAHIR et al. (2002), les conditions pluviales pourraient avoir un rôle de dilution dans la nappe phréatique et par conséquent la diminution de la concentration bactérienne dans l'eau. D'autre part, et selon BENAJIBA et al. (2013), Les variations temporelles des concentrations des bactério-contaminants pourraient aussi trouver leur origine dans les variations des potentialités de rétentions des bactério-contaminants par les particules de sol, suite aux changements saisonniers des propriétés de sol. L'autre

origine pourrait aussi être les variations des propriétés abiotiques des eaux d'infiltration, ces propriétés impactant le transfert des bactério-contaminants de la surface de sol vers la nappe phréatique.

L'importante concentration des groupes microbiens dépistés durant la période estivale, pourrait également être due à l'augmentation du volume des eaux usées durant la dite période à cause de l'augmentation du nombre des résidents de la ville de Martil durant l'été (ZINEBI, 2014).

Les CT, CF et SF dépistés dans notre étude sont des groupes de bactéries indicatrices de la contamination fécale, et la gravité réside dans le fait que plusieurs autres pathogènes microbiens, viraux ou parasitaires, plus ou moins graves, pourraient être associés à ces indicateurs dans l'organisme humain ou/et animal et causer ainsi des épidémies. MARTIN A. C. et al. (1994) précisent que les agents pathogènes des épidémies ou zoonoses pourront être *Enterovirus*, *Rotavirus*, *Salmonella*, *Vibrio cholerae*, *Shigella*, *Campylobacter jejuni*, *Balantidium coli*, *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium* etc.

Toutefois, une des limites de notre étude est qu'elle a été réalisée pendant une courte période (une année) où la contamination microbienne de l'eau ne pourrait refléter la situation pour une longue durée dans la région. Des conditions climatologiques particulières, ou le cycle hydrique annuel pendant la période d'étude peuvent expliquer partiellement nos résultats. On ne peut donc pas totalement généraliser ces résultats à une période où les conditions environnementales seraient différentes. Autres études similaires à la notre et sur une période de temps plus longue devront être menées afin de confirmer ou d'infirmer les résultats observés.

2.3. Comparaison de nos résultats avec ceux d'autres études

2.3.1. À Martil

Rares sont les études ou enquêtes consacrées à la qualité microbiologique de la nappe phréatique de Martil. Par exemple, NEJJARI (2007), en analysant arbitrairement la qualité des eaux de deux puits, a noté la contamination d'un premier puits par 1600 UFC de CT/100 ml et 100 UFC de CF/100 ml ; alors que le deuxième puits a été contaminé par 90 UFC de CT/100 ml et 60 UFC de CF/100 ml. De sa part, NABIL (2008), en se basant sur la norme fixée pour la qualité des eaux souterraines, a déclaré dans son étude sur la nappe de Martil (sans préciser ni les lieux ni le nombre de puits)

que 7,5% des puits sont de mauvaise qualité (concentration supérieure à $2 \cdot 10^4$ CF/100 ml), 75% de qualité moyenne (concentration entre $2 \cdot 10^3$ et $2 \cdot 10^4$ CF/100 ml), et 15% de bonne qualité (concentration entre $2 \cdot 10^1$ et $2 \cdot 10^3$ CF/100 ml). L'auteur conclue que la qualité excellente de l'eau souterraine, où la concentration serait entre 0 et 20 CF/100 ml est absente dans la nappe de Martil.

2.3.2. Autres régions du Maroc

Dans d'autres régions du Maroc, la problématique de la pollution bactériologique des nappes phréatique a été soulevée par d'autres chercheurs. A Tétouan, MORARECH (2002) a observé, dans son étude, la pollution des puits par les CT, CF et SF comme indicateurs de la pollution fécale. Selon l'auteur, tous les puits prospectés dans son étude présentent des charges élevés en coliformes totaux et fécaux. La contamination des puits, situés à l'aval de la décharge, par les coliformes totaux est conditionnée par le ruissellement du lixiviat des ordures ménagères jusqu'à l'oued Mhjarate, et par son infiltration à travers les fractures. L'auteur a relevé également la contamination microbiologique d'un forage de l'Office National de l'Eau Potable (ONEP) destiné à la production de l'eau potable.

Dans leur étude, EL ASSLOUJ et al. (2007) ont montré dans la région de Chaouia l'origine polyfactoriel de la contamination des eaux souterraines de la région. L'origine de cette contamination est due essentiellement à l'utilisation des eaux usées à des fins d'irrigation et à leur infiltration continue dans le sol. Leur étude a démontré l'impact de la pollution urbaine généralisée sur la qualité microbiologique et physicochimique des eaux souterraines.

Dans la région de M'nasra, BRICHA et al. (2007) ont trouvé une forte pollution bactériologique de la nappe phréatique, avec une concentration en flore mésophile aérobie totale de l'ordre de $11,55 \log_{10} /100$ ml. En outre, la contamination fécale est caractérisée par la présence d'un degré élevé en coliformes totaux, coliformes fécaux et en streptocoques fécaux respectivement de l'ordre de $5,10 \log_{10} /100$ ml ; $2,43 \log_{10} /100$ ml ; et $5,31 \log_{10} /100$ ml. Les auteurs ont observé une augmentation de la pollution fécale après la saison des pluies. A terme, l'utilisation de la nappe pourrait constituer un risque sanitaire important pour les habitants de la zone M'nasra.

2.3.3. Dans le monde :

D'autres chercheurs ont confirmé l'impact de la pollution urbaine et agricole sur la qualité microbienne des eaux souterraines. MOUKOLO et GAYE (2001) ont conclu dans leur étude que l'accroissement de la population à la périphérie des grandes villes des pays africains, et les pollutions générées mettent de plus en plus en péril les nappes phréatiques alimentant en eau les populations. Les auteurs ont observé dans leur étude, menée à Brazzaville au Congo, que la pollution est essentiellement bactériologique et elle est due en particulier à une contamination d'origine fécale.

Selon le travail de NOLA et al. (2006), la plupart des bactéries des eaux souterraines proviennent par l'infiltration des eaux de surface vers les eaux souterraines.

Dans leur étude, DEGBEY et al. (2008) ont soulevé que 100 % des eaux de puits analysées dans la commune d'Abomey-Calavi au Bénin présentent une pollution bactériologique par des *Escherichia coli*, streptocoques fécaux, salmonelles, shigelles, *Clostridium perfringens* et des staphylocoques. Selon les auteurs, cette situation présenterait la population à des risques de maladies d'origine hydrique qui représentent 54 % de l'ensemble des maladies au Bénin, et demeurent les principales causes de morbidité (diarrhées, 7 % ; et affections gastro-intestinales, 8 %) et de mortalité (12,5 %), en très grande majorité des enfants de moins de 5 ans.

Dans une autre étude à Abomey-Calavi au Bénin également, DEGBEY et al. (2011), ont étudié la qualité des eaux de puits et la prévalence des maladies hydriques à travers l'analyse des paramètres microbiologiques couramment utilisés pour la qualité de l'eau de consommation. Les auteurs ont conclu que l'ensemble des puits enquêtés était contaminé par les *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Staphylococcus aureus*, *Salmonella spp*, *Clostridium perfringens* et Streptocoques fécaux qui avaient des prévalences respectivement de 12,5% ; 12,2% ; 12,2% ; 12,1% ; 12% et 11,1 %. Les forts pourcentages des maladies enregistrées par l'étude rétrospective concernaient les diarrhées, les infections urinaires, les fièvres typhoïdes et les douleurs abdominales qui étaient en adéquation avec les résultats de la qualité de ces eaux de puits. Les résultats acquis faisaient ressortir une forte influence de l'activité humaine sur la qualité des eaux. La dégradation de la qualité des eaux était, selon les auteurs, fortement impactée par le défaut d'assainissement dans les différents arrondissements et quartiers.

A Yaoundé, NOLA et al (1998) ont soulevé que les eaux souterraines hébergent de fortes densité de bactéries fécales et de bactéries pathogènes opportunistes. Les

densités de ces germes subissent d'importantes fluctuations spatiales, et les degrés de corrélation entre les densités de ces microorganismes varient selon les sites. L'origine de la pollution fécale de ces points d'eau varient d'un site à l'autre et peut être soit humaine, soit animale, soit mixte.

Dans la région de Niakhar au Sénégal, CHIPPAUX et al. (2007) ont mené des analyses microbiologiques et chimiques des eaux souterraines et des eaux de surface. Ils ont soulevé des contaminations par entérocoques fécaux, très élevées dans la majorité des points d'eau, y compris les bornes-fontaines. Ces contaminations pourraient être dues, selon les chercheurs, davantage aux conditions de distribution et de stockage en aval favorisant la multiplication bactérienne, qu'à une pollution d'origine fécale.

En Amérique latine à titre d'exemple, PEDROMO et al. (2001) ont analysé 355 échantillons des eaux souterraines (puits) dans une région au sud-ouest de l'Uruguay. Ils ont soulevé l'existence d'une relation directe entre contamination des puits par les coliformes fécaux et la proximité des puits à des sources ponctuelles de pollution.

2.4. Essai de dépistage de pathologies liées à la contamination fécale des eaux de puits dans la commune de Martil

L'enquête parallèle que nous avons menée dans ce cadre indiquerait l'impact négatif sur la santé humaine et animale des eaux de puits pollués par les bactéries indicatrices de la contamination fécale. Le tableau 20 illustre l'impact probable des eaux de puits

Tableau 20 : Impact probable des eaux de puits contaminés sur la santé humaine et animale dans la Commune Urbaine de Martil

Source de l'enquête	Nature de l'impact
Centre de santé Martil	Diarrhées, douleurs abdominales (selon le centre de santé, ce dernier n'a réalisé aucune étude sur la relation cause/effet concernant eaux de puits et diarrhées au niveau de la Région)
Laboratoire des analyses médicales	Présence importante de parasitoses et bactérioses gastro-intestinales chez les malades provenant des quartiers utilisant les eaux de puits pollués (<i>Tænia saginata</i> , oxyures, <i>E. coli</i> etc.)
Vétérinaire privé	Diarrhée néonatale du veau Diarrhées et morts des poussins Mauvaise efficacité des médicaments vétérinaires administrés dans l'eau polluée

contaminées sur la santé humaine et animale dans la Commune Urbaine de Martil. Le centre de santé de la ville de Martil a informé sur la présence de cas de diarrhées chez les usagers des eaux de puits sans, toutefois, confirmer une relation de cause à effet concernant les eaux de puits et diarrhées au niveau des secteurs étudiés. L'unique laboratoire privé des analyses médicales de la ville a affirmé, de sa part, la présence très importante de parasitoses et bactérioses gastro-intestinales et urinaire chez les habitants des secteurs périphériques pouvant provenir, entre autres, des puits pollués. La directrice dudit laboratoire nous a indiqué que parmi les agents pathogènes parasitaires et bactériens relevés dans les selles des patients figurent les œufs des oxyures et de *Tænia saginata*, *E. Coli*, *proteus spp.*, des staphylocoques et des *Shigella spp.* De l'autre côté, l'unique vétérinaire privé exerçant à Martil a déclaré pour notre enquête que l'abreuvement par les animaux des eaux de puits pollués causerait les diarrhées néonatales des veaux, les diarrhées et la mort des poussins, surtout durant l'été. De plus, selon le vétérinaire questionné, les médicaments vétérinaires administrés aux animaux avec des eaux de puits pollués, perturbent la bonne efficacité des substances médicamenteuses.

Malheureusement, le manque d'archivage et de statistiques rigoureuses chez les différents responsables sanitaires enquêtés (centre de santé, laboratoire et vétérinaire privés) ne laissent pas dégager des résultats détaillés et concrets sur l'impact des eaux de puits polluées sur la santé humaine ou animale dans la zone d'étude. De même qu'un refus ou mauvaise communication de la part d'autres partis responsables nous ont privé d'informations précieuses sur l'état de qualité de l'eau et l'impact de celle-ci sur la santé (des enquêtes et demandes d'informations auprès de la Délégation de santé à Tétouan, Amendis, ONEP à titre d'exemple sont restées totalement sans suivi de la part des intéressés). Dans le même sens, et dans une étude sur la détérioration de l'environnement et son impact probable sur la santé, une enquête sur terrain a été réalisée en 2002 au quartier Diza de Martil auprès de 102 foyers questionnés (Lamribah, 2004). Selon l'enquête, 23 cas pathologiques sur 195 cas déclarés appartenaient à une catégorie de pathologie gastro-intestinale (diarrhées, intoxications alimentaires), c'est-à-dire environ 11,8 % de toutes les pathologies survenues chez les foyers enquêtés. Dans un autre axe de l'étude, 16 médicaments sur 143 utilisés par les 102 foyers dépistés appartiennent à la famille des médicaments antibiotiques gastro-intestinaux et anti-diarrhéiques, le fait qui révèle l'importance de la problématique gastro-intestinale et diarrhéique à étiologie microbienne dans le quartier étudié. Quoique

ces chiffres ne permettent pas de tirer une conclusion irréfutable de cause à effet, des questions pourront être posées sur les causes de ces pathologies gastro-intestinales et sur un éventuel rôle de l'eau contaminée (ou autre aliment) dans leur déclenchement.

3. Conclusion de la partie microbiologique:

Une fois contaminées, les eaux souterraines sont plus difficiles à “nettoyer” que les eaux superficielles, et les conséquences peuvent se prolonger pendant des décennies ; car il est difficile de récupérer la pureté d'origine.

Puisque les eaux souterraines sont très utilisées pour l'alimentation en eau potable, pour l'industrie et pour l'agriculture, sa pollution peut être dangereuse pour la santé humaine et pour le bon déroulement des activités économiques. Les eaux souterraines servent, d'autre part, de tampon dans les périodes de sécheresse et deviennent alors essentielles pour conserver les zones humides.

Le développement urbain et infrastructurel de la ville de Martil (nord-ouest marocain) sans accompagnement par un assainissement liquide et solide adéquats, semble avoir eu un effet néfaste sur la qualité de l'aquifère de la commune. La qualité de l'eau au niveau microbiologique est inacceptable, et vu que l'eau de la nappe est utilisée largement pour différents besoins ménagers, y compris la boisson, les ablutions, la cuisine et pour l'abreuvement du bétail ; la consommation de cette eau constitue un risque grave de contamination par différents germes pathogènes.

La protection des eaux souterraines devra constituer, pour plusieurs raisons, une priorité de la politique de l'eau au Maroc. L'étude a relevé des contaminations sérieuses, concrètement, au niveau du quartier informel Diza, entouré par le bras mort de l'oued Martil, et aussi au niveau des zones longeant la rivière.

Concernant la possibilité de produire de l'eau potable à partir de la nappe de Martil, notre étude soulève une telle possibilité dans les secteurs les moins contaminés comme Jammae Tassiast, Foum el Oullek ou Groua à Martil, et en amont de la pollution urbaine de Tétouan, c. à. d. au niveau des sorties vers Tanger et Chefchouen. Cet axe sera traité dans la partie de la discussion générale (Eaux de la nappe de Martil et possibilité de production de l'eau potable).

III. ÉTUDE PHYSICOCHEMIQUE

1. Matériel et méthodes

1.1. Campagnes de prélèvements:

Les campagnes de prélèvements ont été réalisées durant une année (2010-2011). Ont été analysés les nitrates, les nitrites ; des paramètres physicochimiques tels que le pH, la conductivité électrique, le total des solides dissous (TSD), la salinité, l'oxygène dissous, la turbidité, la dureté totale (TH), les ions calcium, les ions magnésium, les ions sulfates et les ions chlorures.

Concernant les nitrates et les nitrites, et vu leur importance comme indicateurs de la pollution de la nappe, on a réalisé six prélèvements bimestriels au niveau de chaque puits durant la période d'étude. Les premières, deuxièmes, troisièmes, quatrièmes, cinquièmes et sixièmes prélèvements et analyses ont eu lieu respectivement aux mois de mai/juin 2010, juillet/août 2010, septembre/octobre 2010, novembre/décembre 2010, janvier/février 2011 et mars/avril 2011.

Pour les autres paramètres physicochimiques, les analyses ont été réalisées suivant les saisons, c.à.d. durant le printemps 2010, été 2010, automne 2010 et l'hiver 2010/2011.

Chaque prélèvement contient un litre et demi d'eau. Tous les prélèvements dans les puits sont effectués après pompage de trois minutes pour prélever de l'eau profonde du puits. Pour les puits ne disposant pas de système de pompage, l'eau est prélevée à environ 50 cm de la surface libre de l'eau, et c'est la troisième levée de l'eau qui est retenue comme eau d'analyse. Les analyses commencent 2 à 5 heures après échantillonnage selon l'emplacement des puits prospectés.

Une première approximation des caractéristiques physicochimiques des eaux souterraines est obtenue en connaissant la lithologie de l'aquifère, puisque le chimisme de l'eau dépend, en partie, des interactions entre les phases solides et aqueuses qui se produisent dans l'aquifère.

1.2. Analyses de laboratoire (principes, appareillage et méthodes)

Les analyses se sont déroulées au laboratoire de l'environnement se trouvant à la Faculté des Sciences de Tétouan et géré par la Commune Urbaine de Tétouan. Les

nitrate et les nitrite, la dureté totale (TH), les ions calcium, les ions chlorure et les ions sulfate ont été déterminés d'après la méthode Rodier (RODIER et al., 1984).

Ainsi, la concentration des nitrates est déterminée par la méthode au salicylate de sodium. En effet, en présence de salicylate de sodium les nitrates donnent du paranitrosalicylate de sodium, coloré en jaune et susceptible d'un dosage colorimétrique à l'aide du spectrophotomètre UV visible (415 nm)

La concentration des nitrites est déterminée par la méthode à la sulfanilamide, qui consiste à la diazotation de la sulfanilamide par les nitrites en présence de la N-1 naphthyléthylènediamine qui donne un complexe coloré susceptible d'un dosage colorimétrique à l'aide du spectrophotomètre UV- visible (537 nm)

Pour les sulfates, la concentration est déterminée par la méthode néphélométrique, qui consiste à précipiter les sulfates en milieu chlorhydrique à l'état de sulfate de baryum, les suspensions du précipité obtenu sont mesurées au spectrophotomètre UV- visible (420 nm).

La dureté totale et les concentrations des échantillons en ions calcium et ions magnésium sont déterminées par complexométrie. Les alcalinoterreux forment un complexe de type chélate par le sel disodique de l'acide éthylènediaminetétracétique, la disparition des dernières traces des éléments à doser est décelée par le virage d'un indicateur coloré spécifique (RODIER et al., 1984).

Les teneurs en chlorures sont déterminées par dosage volumétrique de ces derniers par la méthode des nitrates mercuriques.

La turbidité des échantillons se fait par lecture directe avec un turbidimètre de marque Orbeco-Hellige. En fait, la turbidité est la mesure de l'effet de diffusion de la lumière produit par les particules qui se trouvent dans l'eau, et non pas une mesure de ces particules-mêmes. En termes plus généraux, plus l'eau est trouble, plus elle diffuse la lumière et plus la turbidité est élevée (SANTE CANADA, 2003).

L'instrument de mesure professionnel Thermo scientifique Orion 5 Star a été utilisé pour la détermination des mesures des paramètres physicochimiques pH, conductivité, le total des solides dissous (TSD), l'oxygène dissous et la salinité.

2. Résultats et discussion

2.1. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le paramètre (pH) mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau, et donc l'acidité ou l'alcalinité de l'eau sur une échelle logarithmique de 0 à 14. En fait, La valeur p d'une entité est définie comme le logarithme décimal négatif de cette entité; ainsi, $pM = -\log_{10}M$ où M peut être une activité, une concentration ou une constante d'équilibre. Le pH d'une solution est le logarithme décimal négatif de l'activité des ions hydrogènes aH^+ : $pH = -\log_{10}(aH^+)$. Dans une solution diluée, l'activité des ions hydrogène est à peu près égale à leur concentration.

Le pH dépend de l'origine des eaux, de la nature géologique du substrat et du bassin versant traversé. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibres physicochimiques entre l'eau, le gaz carbonique dissous, les carbonates et les bicarbonates. Le pH est compris habituellement entre 6 et 8,5 alors que dans les eaux tièdes, celui-ci est compris entre 5 et 9 (BELGHITI et al., 2013). La norme marocaine pour une eau potable recommande un pH entre 6,5 et 8,5 (NORME MAROCAINE, 2006)

Dans certaines sources d'eau douce, le pH peut être considérablement plus bas à cause du lessivage des acides organiques provenant de la végétation en décomposition et de la présence de gaz carbonique dissous. Dans certaines sources d'eau souterraines, le gaz carbonique issu de l'oxydation bactériologique ne peut être libéré dans l'atmosphère et il en résulte un pH encore plus bas. (SANTÉ CANADA, 1979).

Les valeurs du pH des eaux de la nappe de Martil (figure 30) montrent des variations notables, avec un minimum de 7,60 au puits 9 en été, et un maximum de 8,94 au puits 10 en automne. Les puits 7 ; 8 et 9 dans le secteur de III, montrent globalement un pH inférieur à 8,00 à l'exception de deux valeurs de 8,39 (puits 8) et 8,08 (puits 7) respectivement en printemps et en hiver. Le pH des eaux de ces puits sont dans l'intervalle de potabilité. Par contre le puits 10 se trouvant à proximité de l'oued Martil montre un pH supérieur à 8,00 durant les quatre campagnes de prélèvement.

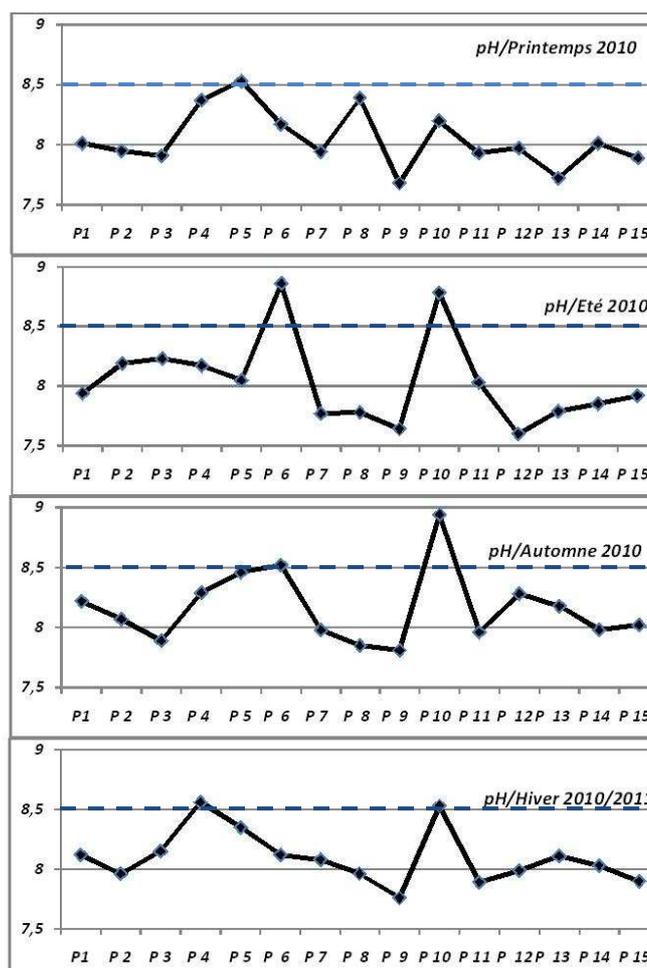


Figure 30 : Evolution saisonnière du pH au niveau des puits prospectés. Le trait désigne la VMA du pH (8,5)

La rareté des études sur les caractéristiques physicochimiques de la nappe de Martil ne laisse pas comparer nos résultats avec celles d'autres études. Dans le travail de EL MORABITI (1991), les valeurs du pH des eaux souterraines de Martil varient entre 6,3 et 8,4 et 45% des valeurs pH se situent entre 6,50 et 7,50.

2.2. Conductivité électrique

La conductivité électrique d'une eau est la conductance d'une colonne d'eau comprise entre deux électrodes métalliques (Platine) de 1cm² de surface et séparée l'une de l'autre de 1cm. Elle est l'inverse de la résistivité électrique. L'unité de la conductivité est le Siemens par mètre (S/m). La conductivité donne une idée sur la minéralisation d'une eau, et elle est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau (BELGHITI et al., 2013).

La conductivité peut être mesurée sur un intervalle très large puisqu'il s'étend de 1×10^{-7} S/cm pour la conductivité de l'eau pure jusqu'à 1 S/cm pour des solutions très concentrées. D'une manière générale, on peut dire que la conductivité constitue un moyen rapide et peu coûteux de déterminer la force ionique d'une solution. Cependant à ne pas oublier que c'est une méthode non spécifique, c'est-à-dire qu'elle n'est pas capable de distinguer les différents types d'ions et ne peut fournir qu'un résultat proportionnel à tous les ions présents.

D'après MELLOUL et al. (2009), la conductivité électrique est aussi une analyse chimique de l'eau pour déterminer les différents faciès d'eau qui peuvent nous indiquer les différents processus responsables de phénomènes de salinisation. Elle dépend des charges de matière organique endogène et exogène, génératrice de sels après décomposition et minéralisation ; elle varie avec le phénomène d'évaporation qui concentre des sels dans l'eau. La conductance varie suivant le substrat géologique traversé. Par conséquent, elle renseigne sur le degré de minéralisation d'une eau.

Selon notre étude, les eaux de la nappe phréatique de Martil ont des valeurs globalement inférieures à la valeur maximale admise (VMA) marocaine qui est de 2700 $\mu\text{S/cm}$. La valeur moyenne de la conductivité au niveau des points étudiés est de 1614,76 $\mu\text{S/cm}$, avec une valeur minimale de 580 pour l'eau de puits 12 au printemps, et maximale de 2937 $\mu\text{S/cm}$ pour l'eau de puits 8 durant la saison hivernale (figure 31). Ces valeurs semblent indiquer une teneur moyenne du sol en sels. Le sens du courant de la nappe qui est de l'ouest vers l'est (DRAOUI, 2007) pourrait expliquer ce résultat.

La conductivité est partiellement hausse durant toute l'année (entre 2500 et 2937 $\mu\text{S/cm}$) au niveau des puits 9 et 10, ce qui indique une croissance exceptionnelle de la minéralisation au niveau de ces puits. Ce résultat pourrait être expliqué par une probable infiltration des eaux de mer salées dans la nappe. Selon NABIL (2009), l'infiltration pourrait se faire aussi à partir de l'oued El Maleh au Nord de la plaine, et à partir de l'eau de mer pendant les transgressions en haute houle comme celle du 03/03/1986. EL MORABITI (1991) a également signalé une hausse de la conductivité dans les secteurs proche du littoral. Selon lui, cette caractéristique semble augmenter dans le sens de l'écoulement qui est de l'ouest vers l'est de la nappe. Le chercheur a trouvé une conductivité comprise entre 250 et 21700 $\mu\text{S/cm}$. Mais, paradoxalement, le puits 8 qui se trouve aussi dans le même secteur montre, dans notre étude, une conductivité moyenne inférieure à 2000 $\mu\text{S/cm}$.

D'autres nappes marocaines sont plus minéralisées, et par conséquent montrent une conductivité électrique plus importante. A titre d'exemple, La nappe de Tadla est caractérisée par une forte conductivité qui peut atteindre 10800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Les valeurs enregistrées en 2005/2006 par l'Agence du Bassin Hydraulique d'Oum Er-rbia (ABHOE, 2009) au niveau de cette nappe varient de 730 à 10800 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Plus de 60 % des puits analysés ont une conductivité supérieure à 4000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui nous permet de conclure que les eaux souterraines sont très minéralisées dans cette région du Maroc. Selon l'ABHOE, une forte minéralisation est désagréable car elle peut causer des maladies chez les hommes et surtout chez les enfants, et elle donne aussi à l'eau un mauvais goût.

2.3. Total des solides dissous (TSD)

Le total des solides dissous (TSD) ou les matières dissoutes totales (MDT) sont les sels inorganiques et les petites quantités de matières organiques qui sont dissous dans l'eau. Leurs principaux constituants sont habituellement les cations calcium, magnésium, sodium et potassium et les anions carbonate, bicarbonate, chlorure, sulfate et, en particulier dans les eaux souterraines, nitrates en raison des utilisations agricoles. La concentration du TSD dans l'eau varie en fonction de la solubilité des divers minéraux dans diverses régions géologiques (SANTÉ CANADA, 2009).

Notre travail a montré que l'ensemble des puits prospectés de la nappe de Martil renferme des eaux faiblement minéralisées avec un TSD entre 284 et 1439 mg/L avec une moyenne de 794 mg/L. Comme le montre la figure 31, les fluctuations des teneurs en TSD suivent globalement les fluctuations de la conductivité.

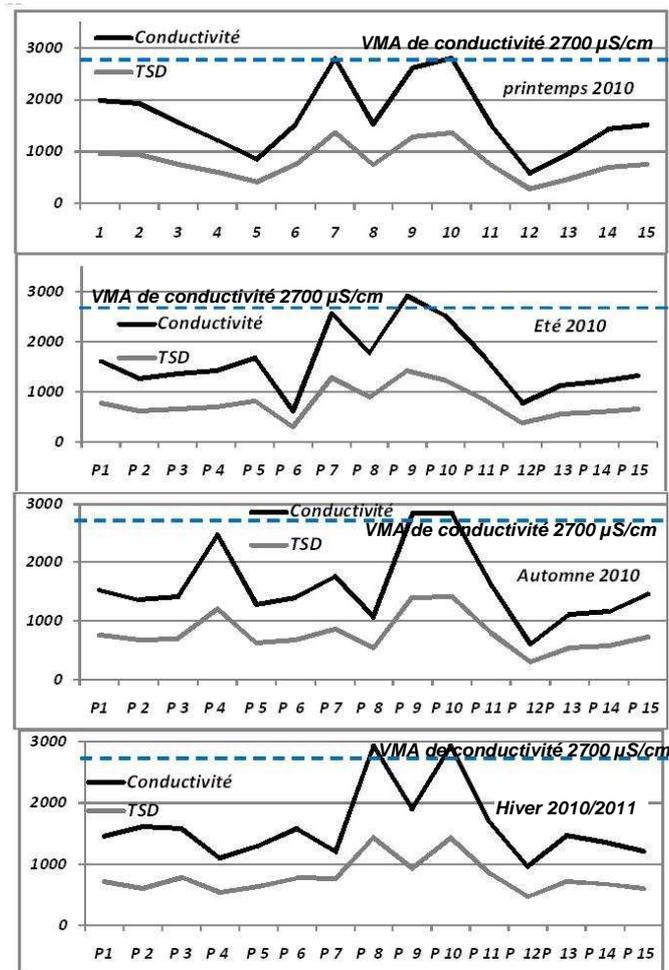


Figure 31 : Evolution saisonnière de la conductivité et des teneurs en TSD des eaux des puits prospectés (respectivement en $\mu\text{S/cm}$ et mg/L . Le trait en tirets indique la VMA de la conductivité ($2700 \mu\text{S/cm}$)

Le secteur de Jamaa Tassiast montre une augmentation légère du TSD comparativement avec les autres secteurs, le fait qui pourrait être interprété par une influence légère des eaux marines dans ce secteur. D'autre part, aucune conclusion ne peut être dégagée en ce qui concerne les variations saisonnières du TSD et de la conductivité, le fait qui pourrait montrer que ces paramètres ne sont pas influencés par la température ou le climat. Une concentration plus grande en TSD peut rendre l'eau trop dure, lui donner un mauvais goût et entraîner des dépôts minéraux et de la corrosion, le fait qui n'est pas connu et n'a pas été observé au niveau de la zone d'étude.

A titre de comparaison avec d'autre lieux à travers le monde, à Manitoba par exemple (Canada), les concentrations du TSD mesurées en 1988 dans l'eau traitée de 168

collectivités variaient de 56 à 2 510 mg/L, mais elles étaient inférieures à 550 mg/L dans 19 % des analyses. Les teneurs en TSD mesurées dans 1978 échantillons d'eau potable prélevés entre 1970 et 1989 dans des collectivités de la Saskatchewan variaient de 6,5 à 5 376 mg/L. Les concentrations du TSD trouvés dans l'eau de 54 % des collectivités de l'Alberta ayant fait l'objet d'un contrôle en octobre 1989 étaient inférieures à 500 mg/L (SANTÉ CANADA, 1978).

2.4. Salinité

La salinité désigne la quantité de sels dissous dans un liquide, notamment l'eau qui est un puissant solvant pour de nombreux minéraux. Il ne faut pas confondre la salinité avec la dureté de l'eau qui est relative à son dosage en calcium et magnésium. La présence de sel dans l'eau modifie certaines propriétés (densité, compressibilité, point de congélation, température du maximum de densité); et certaines sont essentiellement déterminées par la quantité de sel dans l'eau (conductivité, pression osmotique). La quantité de sels dissous dans un liquide modifie la pression osmotique de celui-ci. La salinité est sans unité, mais elle est encore souvent exprimée en gramme de sel par kilogramme d'eau (g/kg), en gramme de sel par litre d'eau (g/L), en pour mille ou encore en Practical Salinity Unit (PSU).

Dans la présente étude de la nappe phréatique de Martil, les salinités varient entre 0,3 et 1,5 g/L, avec une moyenne de 0,79 g/L. Globalement, la majorité des échantillons ont une salinité variant entre 0,3 et 1,2 g/L, ce qui démontre, globalement, une faible minéralisation de la nappe excluant une possible infiltration importante des eaux marines dans la nappe étudiée. L'évolution de la salinité dans les puits prospectés est représentée dans la figure 32. Les concentrations moyennes de la salinité au niveau des secteurs dépistés sont illustrées dans la figure 33. Les secteurs I, II, III, IV, V et VI ont des moyennes de salinité respectivement de 0,75 ; 0,66 ; 1,05 ; 1,07 ; 0,47 et 0,66 mg/L.

Nos résultats concordent avec celles de HILALI et al. (2003) qui relèvent une absence d'intrusion de l'eau salée dans la nappe de Martil. Mais, contrairement à notre étude, NABIL (2009), dans son enquête, déclare avoir relevé (sans préciser ni lieux ni méthodes d'analyses) entre 10 et 12,25 % des puits ayant une eau à goût salin au niveau de la nappe étudiée.

A l'étranger, et à titre de comparaison, SEBEL et al (2004) ont réalisé une recherche physicochimique sur les eaux souterraines de la région de Grombalia en Tunisie nord-

orientale. Ils ont observé que les eaux souterraines sont caractérisées par une salinité comprise entre 0,7 g/L et 4,7 g/L ; et les concentrations des ions majeurs, qui dépassent généralement les normes nationales et internationales, montrent un gradient croissant de l'amont vers l'aval de la plaine.

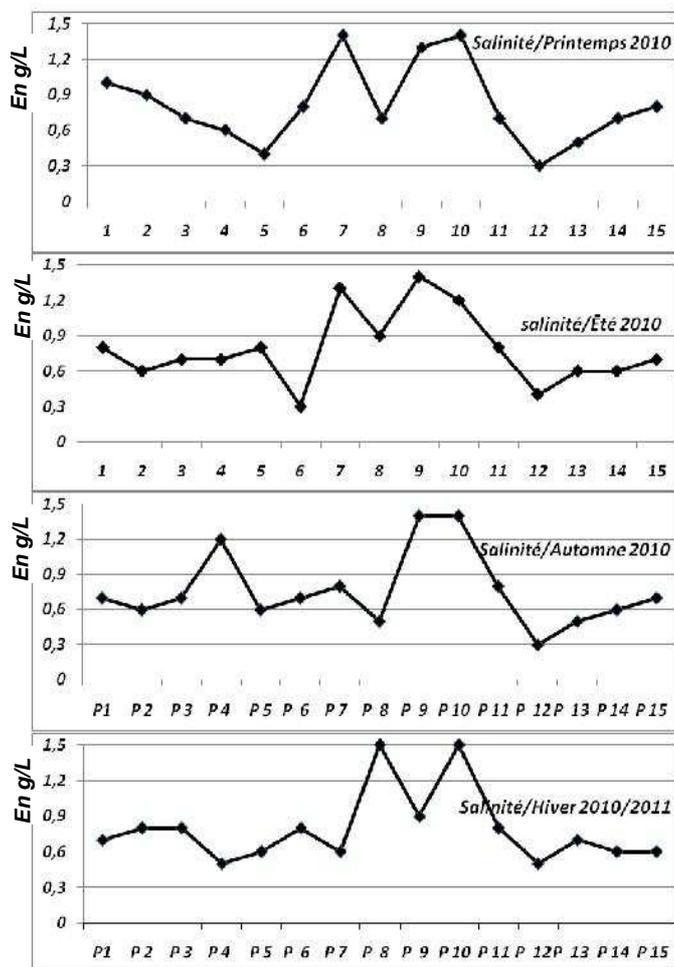


Figure 32 : Evolution saisonnière de la salinité (en g/L) dans les puits prospectés (les puits désignés de P1 à P15)

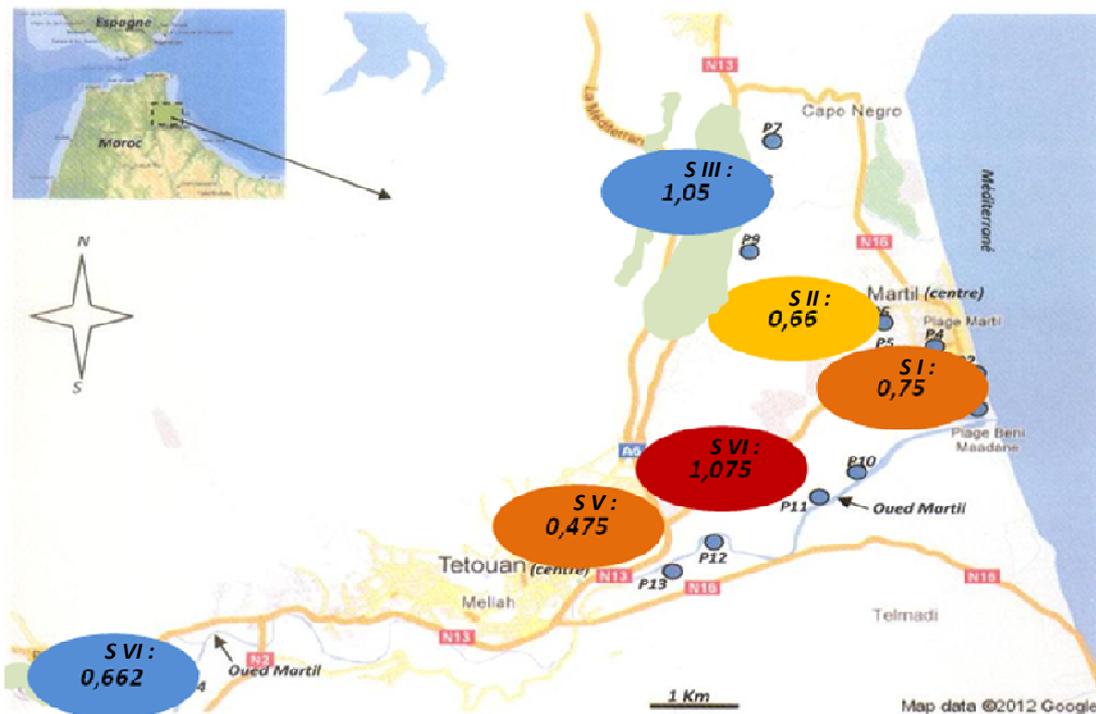


Figure 33 : Moyennes des concentrations de salinité (en g/L) dans les secteurs étudiés (S I, S II, S III, S IV, S V et S VI).

2.5. Oxygène dissous

L'eau absorbe autant d'oxygène que nécessaire pour que les pressions partielles d'oxygène dans le liquide et dans l'air soient équilibrées. La solubilité de l'oxygène dans l'eau est fonction de la pression atmosphérique (de l'altitude), de la température et de la minéralisation de l'eau : la saturation en oxygène dissous diminue lorsque la température et l'altitude augmentent. On évalue la quantité de dioxygène dissous (O_2) en mg/L, au moyen d'un oxymètre (ABHOE, 2009). Sa concentration peut être aussi estimée en pourcentage de saturation.

L'oxygène dissous est l'un des plus importants indicateurs sur le degré de la pollution des eaux. Il participe à la majorité des processus chimiques et biologiques en milieu aquatique (DERWICH et al., 2010). Les concentrations obtenues durant notre étude sont représentées dans la figure 34. Ils présentent des variations notables.

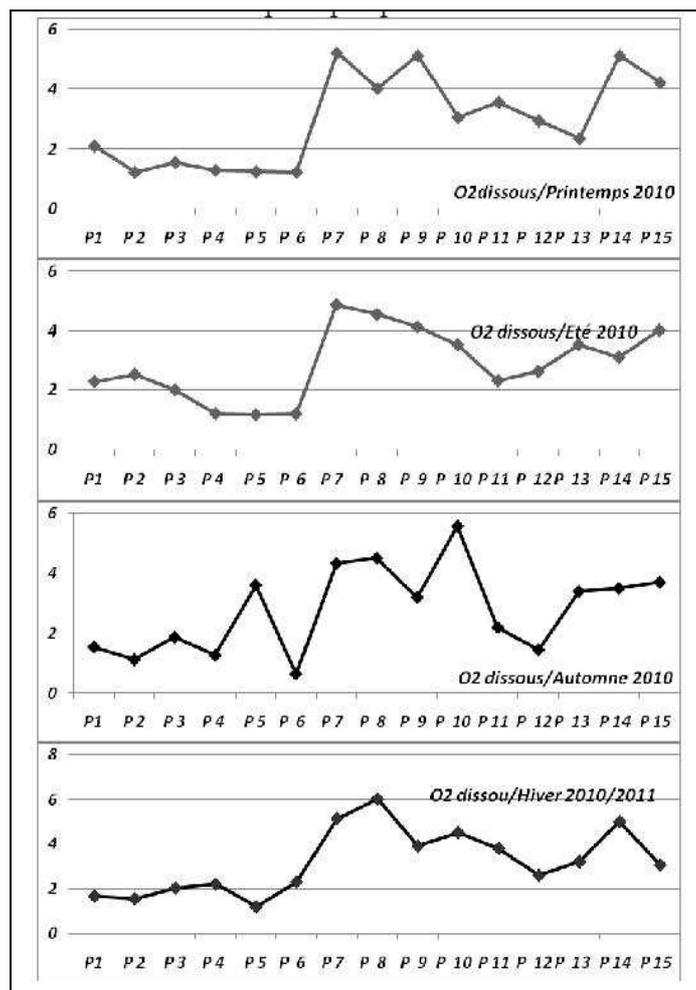


Figure 34 : Evolution saisonnière des teneurs en oxygène dissous (en mg/L) au niveau des puits prospectés

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de l'oxygène dissous (OD) mesurées sont comprises entre 0,65 et 6,01 mg/L. 90% des valeurs de l'OD relevées sont inférieures à la norme marocaine comprise entre 5 et 8 mg/L (NORME MAROCAINE, 2006). Seulement 10% des valeurs s'inscrivent dans l'intervalle de norme de potabilité.

En fait, ces valeurs sont corrélées avec l'importance de la pollution organique par les eaux usées domestiques déversées dans ces secteurs. Les valeurs les plus basses en OD ont été enregistrées au sein des secteurs Diza et Chbar (P1, P2, P3, P4, P5 et P6), c'est-à-dire au niveau des quartiers les plus pollués par les eaux usées. Quant aux concentrations élevées en OD, elles ont été enregistrées au niveau des puits 7, 8 et 9, où les valeurs oscillent entre 3,2 et 6,01 mg/L, et où les sources ponctuelles de pollution par les eaux usées sont minimales. Les moyennes des concentrations de l'OD au niveau des secteurs étudiés sont exprimées dans la figure 35.

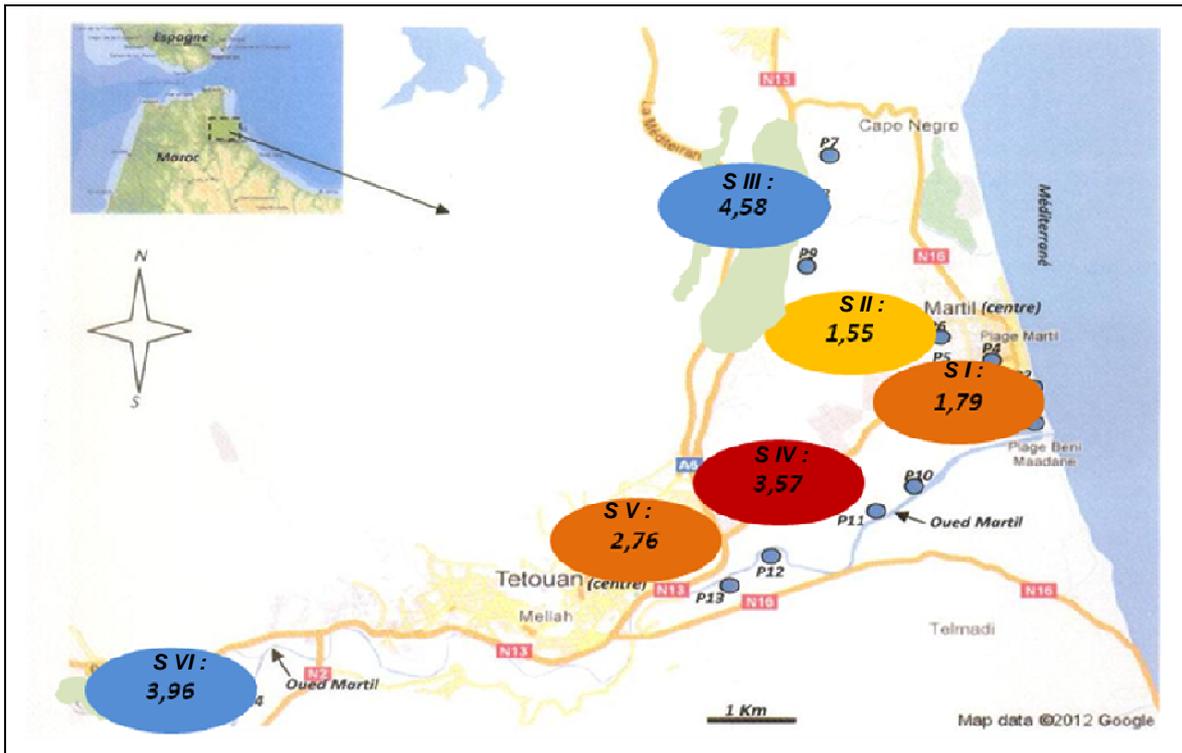


Figure 35 : Moyennes des teneurs en oxygène dissous en mg/L dans les secteurs prospectés : S I, S II, S III, S IV, S V et S VI.

Les secteurs Diza et Chbar relèvent les moyennes les plus basses des concentration en OD avec des valeurs respectivement de 1,79 et 1,55 mg/L. Contrairement à ces résultats, Les puits 7, 8 et 9 (secteur III) situés dans une zone loin de sources de pollution (Jamaâ Tassiast et Foum el Oullik) sont les plus riches en oxygène dissous avec une moyenne de 4,58 mg/L. les secteurs route Tétouan/Martil ; Coelma et routes Tanger/Chefchaouen ont respectivement des valeurs moyennes de 3,57 ; 2,76 et 3,96 mg/L.

2.6. Turbidité

Des particules en suspension existent naturellement dans l'eau, comme le limon, l'argile, les matières organiques et inorganiques en particules fines, le plancton et d'autres microorganismes.

La turbidité de l'eau brute peut varier de moins de 1,0 UTN à plus de 1 000 UTN. La taille des particules qui causent la turbidité de l'eau peut aller des dimensions colloïdales (environ 10 nm) à 0,1 mm de diamètre. On peut diviser ces particules en trois grandes catégories : les argiles, les particules organiques produites par la

décomposition de débris végétaux et animaux et les particules fibreuses des minerais. Le diamètre maximal des particules argileuses est habituellement d'environ 0,002 mm, mais il peut atteindre 0,02 mm. Les organismes biologiques peuvent aussi causer de la turbidité. Les particules présentes dans les eaux naturelles sont composées principalement de particules de sol érodé provenant des environs (CFPTEP, 2012).

Les sources d'eau qui risquent le plus d'avoir une turbidité élevée sont les eaux de surface (lacs, réservoirs, rivières et ruisseaux) et les puits peu profonds, mal construits ou mal entretenus. La turbidité peut être causée par (CFPTEP, 2012) :

- Des particules organiques comme des matières animales ou végétales décomposées ou des organismes vivants (par exemple des algues), des particules inorganiques (limon, argile et composés chimiques naturels tels que le carbonate de calcium).
- Des matières organiques et inorganiques.
- des pluies abondantes, des inondations et l'écoulement printanier, des glissements de terrain et l'érosion des berges, l'activité animale, l'activité humaine perturbant la terre (par exemple la construction).

Les puits peu profonds ou mal construits ainsi que les sources peuvent être contaminés par l'eau de surface, surtout après des pluies abondantes et au moment de l'écoulement printanier. La turbidité de l'eau souterraine est généralement inorganique et causée par des facteurs géologiques naturels. On mesure la turbidité en unités de turbidité néphalométriques (UTN) à l'aide d'un turbidimètre.

Concernant les puits prospectés dans la plaine de Martil, la turbidité a varié de 0,2 à 24,4 UTN avec une moyenne de 2,19 UTN (figure 36). Parmi les causes de la turbidité qui ont été relevées au niveau des puits prospectés, il s'agit de l'argile, des algues, des débris végétaux, des restes d'insectes (moustiques et leurs larves et nymphes), et autres saletés ménagères, surtout dans les puits mal entretenus et de faible profondeur.

La valeur trop élevée de la turbidité (24,4 UTN) au niveau du puits 11 (la route de Martil-Tétouan) a probablement été influencée par les pluies abondantes qu'a connues la région le jour de prospection au niveau de ce puits mal entretenu. L'influence saisonnière semble être relevée, puisque la moyenne de la turbidité de l'eau est sensiblement élevée en hiver (3,81 UTN) par rapport à la saison printanière, estivale et automnale (valeurs respectivement de 1,48 ; 1,24 et 2,12 UTN).

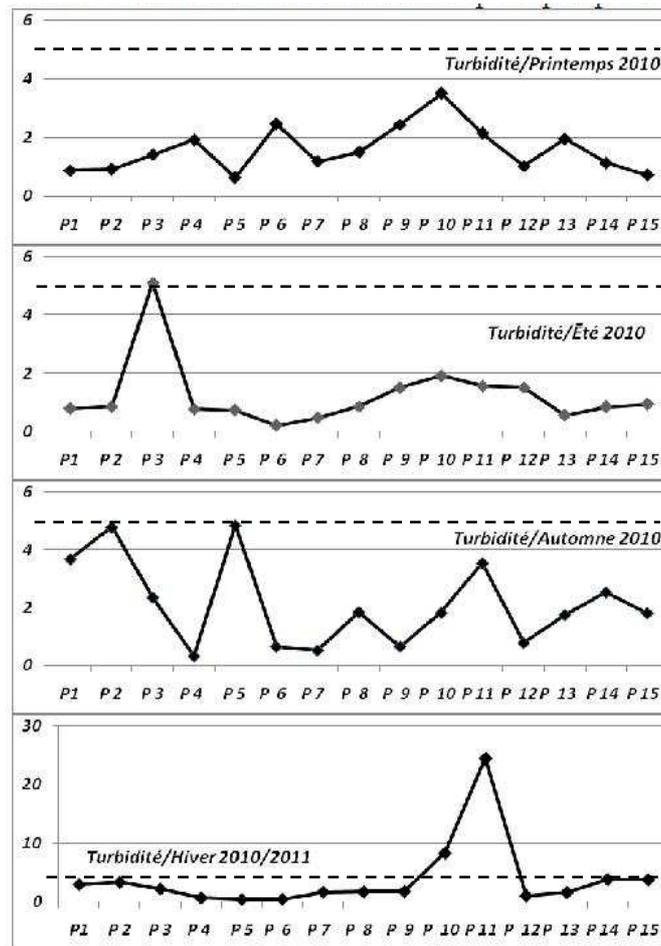


Figure 36 : Evolution saisonnière de la turbidité au niveau des puits prospectés. Le trait en tirets désigne la VMA de 5 UTN

La turbidité des puits analysés est globalement dans l'intervalle de la VMA marocaine à l'exception de trois échantillons qui l'ont dépassée. Il s'agit du puits 3 en été et des puits 10 et 11 durant l'hiver avec des valeurs respectivement de 5,1 ; 8,25 et 24,4 UTN. La turbidité est contrôlée dans les eaux de puits lorsque l'eau est consommée comme eau potable pour des raisons de santé et pour des raisons esthétiques.

Les matières en suspension peuvent contenir des toxines telles que des métaux lourds et des biocides et héberger des microorganismes qu'elles protègent de la désinfection. Des études récentes ont montré l'existence d'un lien entre la turbidité et la contamination de l'eau par des protozoaires de *Giardia* et *Cryptosporidium*. Ces germes peuvent causer des éclosions de maladies du tube digestif. La turbidité peut être utilisée comme paramètre sanitaire de mesure de la salubrité de l'eau. Une turbidité excessive peut être aussi associée à des goûts et à des odeurs désagréables (SANTÉ CANADA, 2003).

2.7. Dureté totale (TH)

La dureté de l'eau, ou titre hydrotimétrique (TH), est un indicateur de la minéralisation de l'eau, qui correspond à la teneur de l'eau en ions calcium (Ca^{2+}) et ions magnésium (Mg^{2+}). L'unité utilisée pour exprimer la dureté est le degré français ($^{\circ}\text{F}$) : $1^{\circ}\text{F} = 10 \text{ mg/L}$ de carbonate de calcium (calcaire) ou 4 mg/L de calcium. Les classes suivantes sont généralement adoptées pour caractériser la dureté de l'eau (DAVEZAC et al, 2008):

- $\text{TH} \leq 8^{\circ}\text{F}$: Eau très douce,
- $8^{\circ}\text{F} \leq \text{TH} < 15^{\circ}\text{F}$: Eau douce,
- $15^{\circ}\text{F} \leq \text{TH} < 30^{\circ}\text{F}$ Eau moyennement dure
- $30^{\circ}\text{F} \leq \text{TH}$ eau très dure

Même si la dureté de l'eau peut être source de désagrément (dépôt de calcaire), la présence de calcium et magnésium est bénéfique pour l'organisme. On distingue: une dureté carbonatée qui correspond à la teneur en carbonates et bicarbonates de Ca et Mg, et une dureté non carbonatée produite par les autres sels.

Une dureté plus importante de l'eau possède des propriétés gênantes telles que formation de dépôts durs dans les canalisations du réseau et gêne dans les opérations de lavage. (GUERGAZI et ACHOUR 2005)

L'évolution saisonnière de la dureté totale (TH) au niveau des puits prospectés montrent que les eaux de la nappe de Martil sont relativement douces à moyennement dures (figure 37). Les valeurs de la dureté sont comprises entre 6 et $89,3^{\circ}\text{F}$. 58,33% des échantillons dépassent la norme de 35°F . 41,66% des échantillons ont une dureté inférieure à 35°F . Ce fait est probablement lié à la nature lithologique de la formation géologique de la nappe phréatique de Martil, et en particulier à sa composition en magnésium et en calcium.

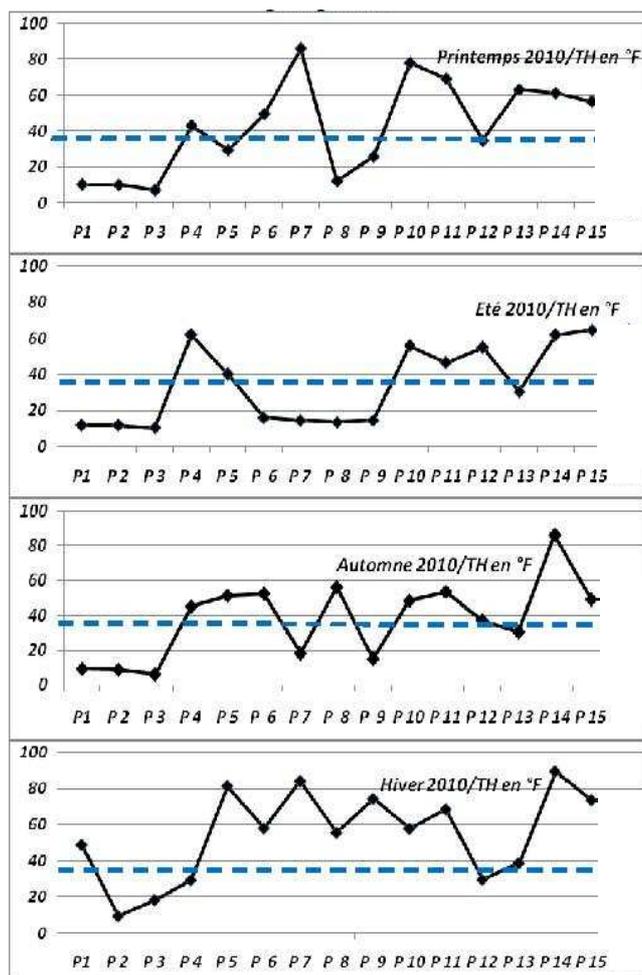


Figure 37 : Evolution saisonnière de la dureté totale (TH) au niveau des puits prospectés (en degré français °F). le trait en tirets désigne la VMA de 35°F.

Quant aux concentrations moyennes de TH au niveau sectoriel (figure 38), on constate que le secteur ayant la moyenne la plus grande est le secteur VI avec une valeur de 67,8° F. Le secteur ayant la plus petite valeur TH est le secteur I avec une valeur moyenne de 13,5 °F.

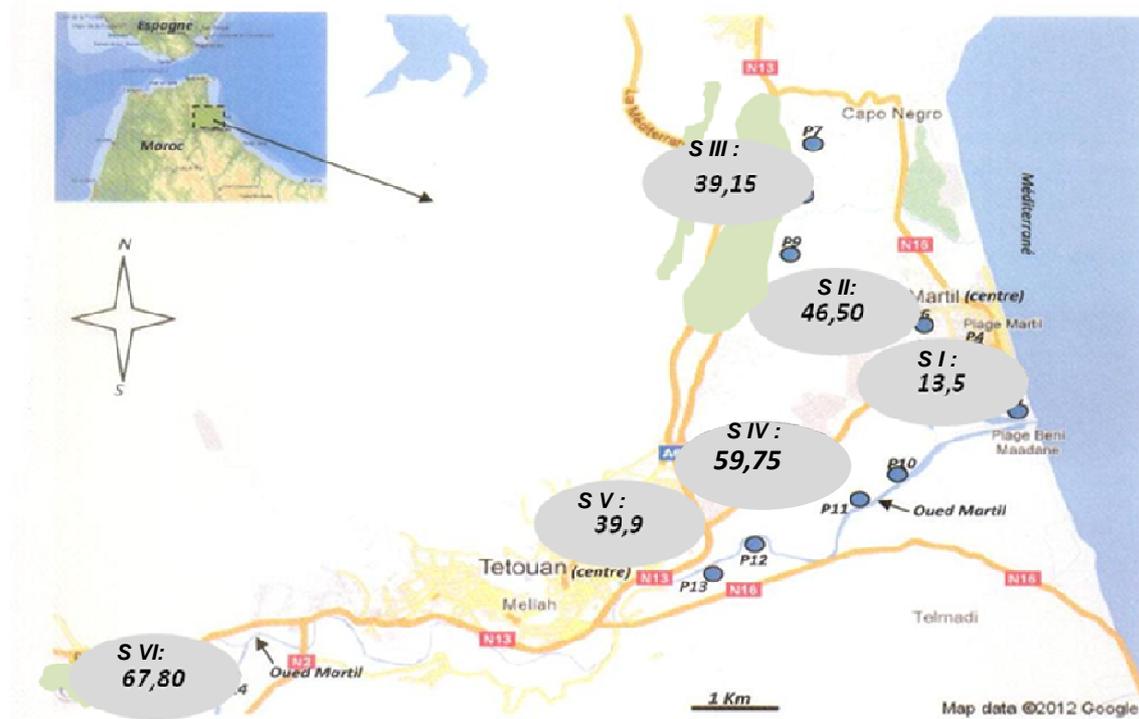


Figure 38 : Répartition des moyennes de TH (en F) au niveau des différents secteurs S I, S II, S III, S IV, S V et S VI.

2.8. Ions calcium

Le calcium est le cinquième élément le plus abondant dans la nature. Il s'introduit dans le système d'eau douce sous l'action de la météorisation des roches, particulièrement celle des roches calcaires, et par entraînement à partir du sol dans les eaux d'infiltration, par lixiviation et par ruissellement. La concentration du calcium dans l'eau dépend du temps de séjour de l'eau dans des formations géologiques riches en calcium. Les eaux de surface renferment généralement moins de calcium que les eaux souterraines (SANTE CANADA, 1987).

L'étude a révélé que la nappe de Martil contient une moyenne de concentration en ions calcium de 104,5 mg/L. Cette valeur ne peut être qualifiée ni de grande ni de faible puisque la norme marocaine ne désigne aucune VMA pour le calcium dans l'eau. Même les normes internationales ne recommandent pas de norme pour le calcium. Selon le Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement au Canada, il n'y a pas de preuve que le calcium dans l'eau potable ait des effets nocifs (SANTE CANADA, 2012). Toutefois, de récents travaux (DJELLOULI et al., 2005) soulignent l'effet

bénéfique des eaux calcaïques sur la prévention du risque de lithiases oxalo-calcaïques urinaires ; et Il y aurait une corrélation inverse entre la quantité d'apport de calcium et le risque de développer une lithiase chez des individus sans antécédents de lithiase, pour une consommation élevée de calcium (environ 1300 mg de calcium par jour)

L'évolution saisonnière des teneurs en ions calcium au niveau des puits prospectés, est représentée dans la figure 39. La valeur minimale de la concentration calcaïque est de 17,8 mg/L au puits 2 en hiver 2010/2011, et la valeur maximale enregistrée est de 284,0 mg/L au puits 10 en été 2010 . De point de vue comparatif, les puits 14 et 15 ont révélé des concentrations toujours supérieures à 100 mg/L. Le faible nombre des échantillons pour ces deux puits ne laisse pas conclure de façon significative une augmentation de la teneur du calcium dans l'eau souterraine de ce secteur. La constitution lithologique et rocheuse de cette zone pourrait, toutefois, avoir une influence sur la concentration de ce paramètre dans l'eau souterraine.

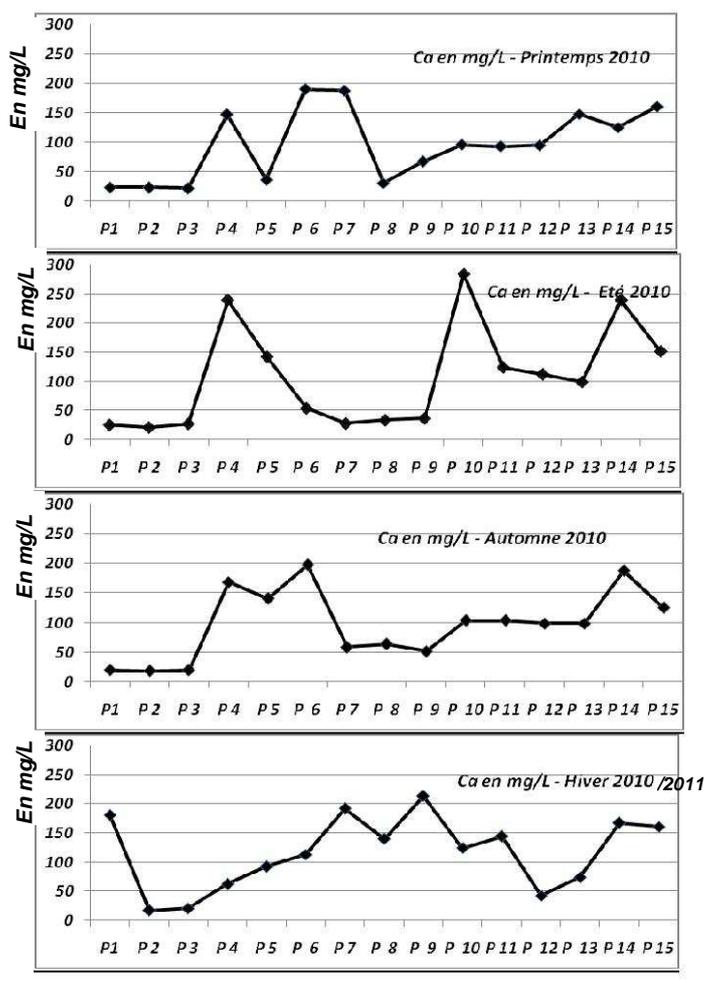


Figure 39 : Evolution saisonnière des teneurs en ions calcium au niveau des puits prospectés en mg/L (puits de P1 à P15)

EL MORABITI K. (1991) a relevé dans son étude une concentration moyenne de calcium dans la nappe de Martil de 113 mg/L, avec 64% des échantillons inférieurs à 50 mg/L. A titre de comparaison avec une région maghrébine, GUERGAZI et ACHOUR (2005) ont relevé des teneurs en ions calcium variant de 128 à 1314 mg/L dans des forages à la région de Biskra en Algérie.

2.9. Ions magnésium

Le magnésium (Mg) se place au huitième rang parmi les éléments naturels les plus abondants. Il constitue 2,5% de la croûte terrestre et forme généralement des minéraux comme la magnésite, la dolomie et l'amiante. Toutes les eaux naturelles en contiennent et il contribue largement à leur dureté. Ce paramètre se trouve dans les formations calcaires, marno-calcaire et dans les formations triasiques (gypse) (BELGHITI et al., 2013).

Les concentrations en ions magnésium dans les 15 puits prospectés durant la période d'étude sont exprimées dans la figure 40. Le trait en tirets désigne la VMA marocaine de 50 mg/L selon les références du laboratoire de l'environnement de la Commune Urbaine de Tétouan (LAB ENV, 2010). La norme française adopte également la même VMA (MEDDE- FRANCE, 2012).

Les résultats concernant les teneurs en magnésium des eaux de la plaine de Martil montrent une teneur relativement élevée en magnésium. Les valeurs oscillent entre 4,4 et 282,5 mg/L avec une moyenne de 80,38 mg/L. Ainsi, 31 échantillons analysés sur 60 dépassent la norme marocaine de 50 mg/L, c'est-à-dire que la nappe contient une eau majoritairement magnésienne. Des études seront nécessaires pour confirmer ou infirmer l'importante présence du magnésium dans la nappe de Martil.

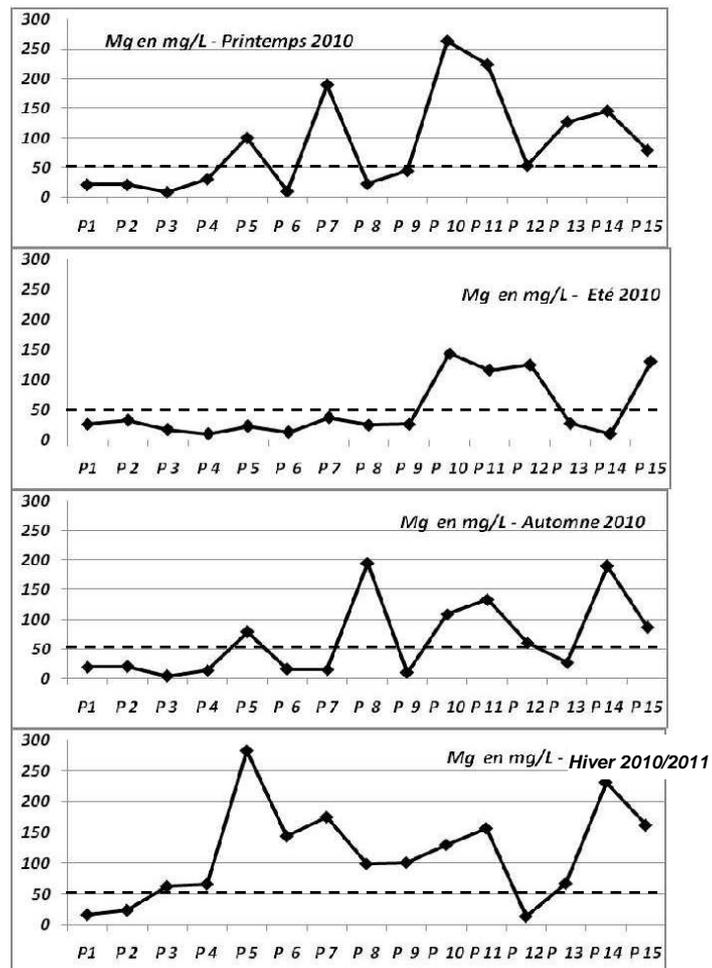


Figure 40 : Evolution saisonnière des teneurs en magnésium au niveau des puits prospecté. Le trait en tirets désigne la VMA marocaine de 50 mg/L

La distribution de la moyenne des concentrations en ions magnésium dans les différents secteurs étudiés, est configurée dans la figure 41. On constate que le secteur I (Diza) abrite l'eau souterraine la plus pauvre en magnésium (moyenne de 22,9 mg/L), alors que le secteur IV (route Martil/Tétouan) contient l'eau la plus riche en magnésium (159,67 mg/L).

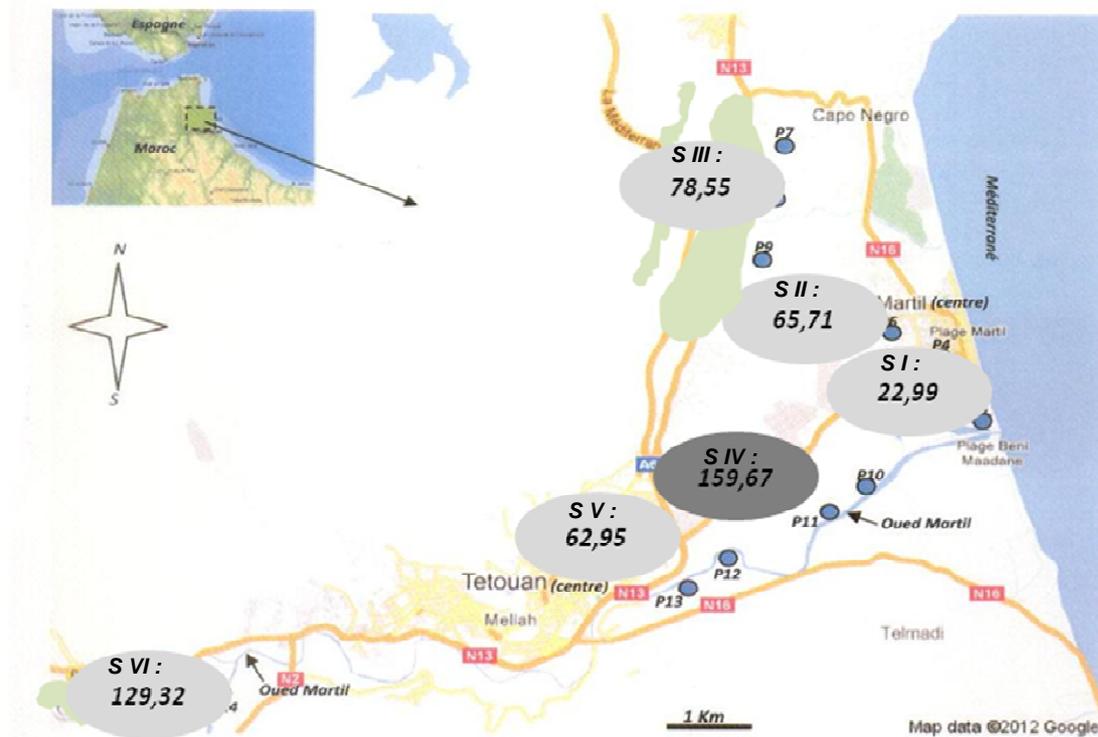


Figure 41 : Répartition des moyennes de concentration en magnésium (en mg/L) dans les secteurs étudiés S I, S II, S III, S IV, S V et S VI

2.10. Ions chlorures et sulfates

Les chlorures sont largement répandus dans la nature, généralement sous forme de sels de sodium (NaCl) et sels de potassium (KCl); ils représentent environ 0,05 % de la lithosphère. Ce sont les océans qui contiennent de loin la plus grande quantité de chlorures dans l'environnement (CNRC, 1977)

Notre étude a soulevé que toutes les teneurs en ions chlorure sont largement inférieures à la valeur maximale admise marocaine qui est de 750 mg/L à l'exception d'une seule valeur de 2115,8 mg/L relevée au niveau du puits 10 au printemps 2010. Toutefois les « valeurs guides » européenne et de l'OMS sont de 200 et 250 mg/L pour les chlorures et les sulfates respectivement (NEPE, 1975 et OMS, 2006). L'évolution des teneurs en ions chlorures dans les eaux de puits est illustrée dans la figure 42. Les valeurs varient entre 35,5 et 2215,8 mg/L. L'unique valeur de 2115,8 mg/L reste paradoxale. A moins qu'il s'agisse d'une erreur de dosage, elle peut émaner d'une importante et récente désinfection de puits par le chlore. Pour ne pas compromettre le

résultat, la valeur suspecte de 2115,8 mg/l n'a pas été comptée, et la moyenne a été calculée comme la somme des 59 autres valeurs divisée sur 59, le nombre des analyses non suspects. Ainsi, la moyenne de concentration des ions chlorures dans les puits suivis est de 175,85 mg/L.

L'absence de sources naturelles et environnementales du chlore dans la zone étudiée semble refléter les faibles concentrations de ce paramètre dans la nappe. En effet, l'absence d'intrusion marine, d'une industrie chimique ajoutée à une faible utilisation des fertilisants agricoles ne pourraient engendrer une importante présence de cet élément dans la nappe.

Dans sa recherche sur les caractéristiques physicochimiques de la nappe de Martil, El MORABITI (1991) a relevé des concentrations des ions chlorures variant de 19 à 7796 mg/L avec 60% des échantillons ayant une concentration entre 0 et 400 mg/L. l'auteur a trouvé un coefficient de variation de 184%.

A titre de comparaison, une étude a été menée en Algérie par DJELLOULI et al. (2005) sur la composition physicochimique des eaux destinées à la consommation humaine dans quelques régions du Sud algérien. Le travail a permis de constater que 77,5 % des échantillons d'eau analysée sont magnésiens ($[Mg^{2+}] > 50$ mg/L) ; 95 % sont sulfatées. Le taux des ions sulfates dépassant la concentration maximale admissible (CMA) préconisée par l'OMS ($[SO_4^{2-}] > 250$ mg/L).

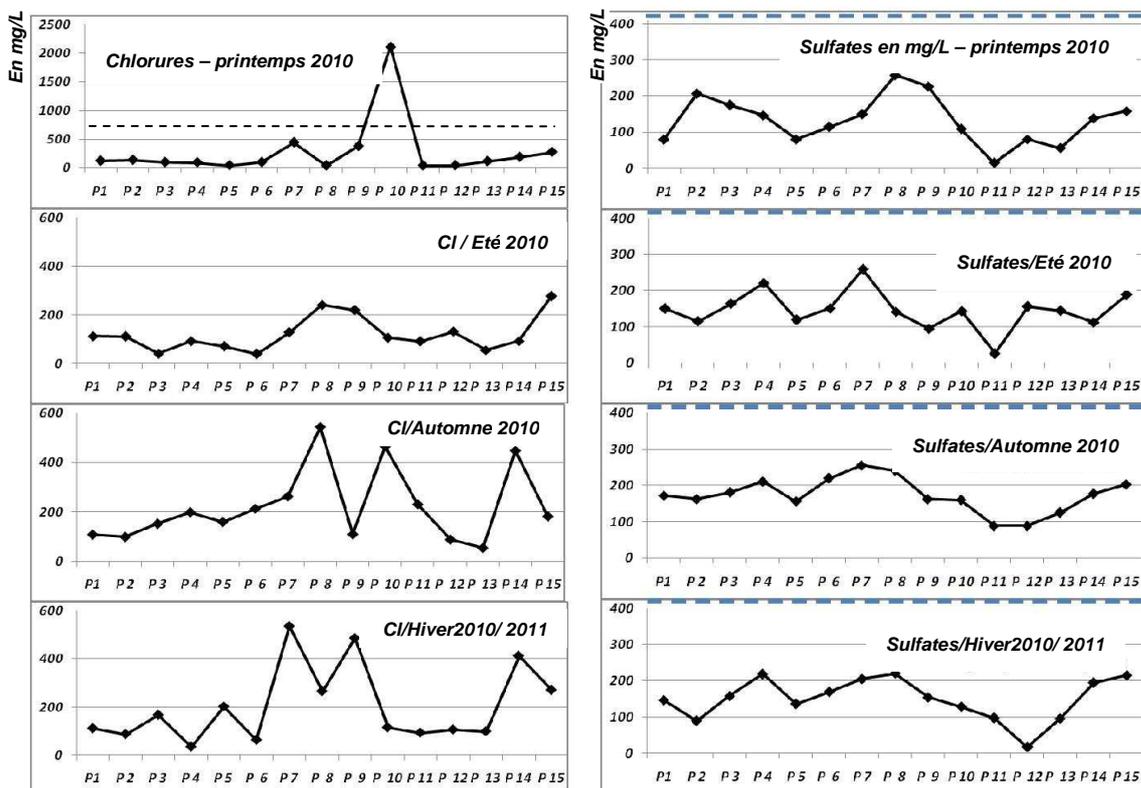


Figure 42 : Evolution saisonnière des teneurs en chlorures et en sulfates dans les puits prospectés (en mg/L). Les traits en tirets désignent les VMA des chlorures et des sulfates qui sont de 750 et 400 mg/L respectivement (puits de P1 à P15)

Une forte concentration des ions chlorures ne serait pas souhaitable. Des concentrations de chlorures supérieures à 250 mg/L dans l'eau potable peuvent provoquer la corrosion du système de distribution. La capacité que possède l'ion chlorure de former des sels solubles avec de nombreux ions métalliques empêche la formation de pellicules pouvant limiter la corrosion des surfaces métalliques (SANTÉ CANADA, 2008).

Les moyennes de concentrations en chlorures dans les eaux de puits au niveau des différents secteurs étudiés, est illustrée dans la figure 43.



Figure 43 : Répartition des moyennes de concentrations en chlorures (en mg/L) dans les eaux de puits des secteurs prospectés : S I, S II, S III, S IV, S V et S VI

Concernant les sulfates, le soufre est un élément non métallique qui existe à l'état naturel dans les sols et les roches sous forme organique (soufre protéique) et à l'état minéral (sulfures, sulfates et soufre élémentaire). Le soufre se combine à l'oxygène pour donner l'ion sulfate, présent dans certains minéraux comme le gypse par exemple. (DERWICH et al., 2010).

D'après les résultats des échantillons analysés (figure 42), les teneurs en sulfates enregistrées restent largement inférieures à la norme marocaine de 400 mg/L. Les 60 analyses effectuées sont toutes hyposulfatées. Les valeurs sont variables et oscillent entre 15,4 et 259,5 mg/L. Les puits prospectés ont une teneur moyenne de 150,83 mg/L, et les moyennes de concentrations des ions sulfates dans les eaux de puits au niveau des différents secteurs prospectés sont présentées dans la figure 44.

Dans d'autres pays on trouve des normes inférieures à la norme marocaine (250 mg/L en France et en Algérie par exemple). Les ions sulfates sont décrits comme ayant un effet préventif contre la cristallisation de l'acide urique, constituant chimique impliqué dans la formation des calculs rénaux.

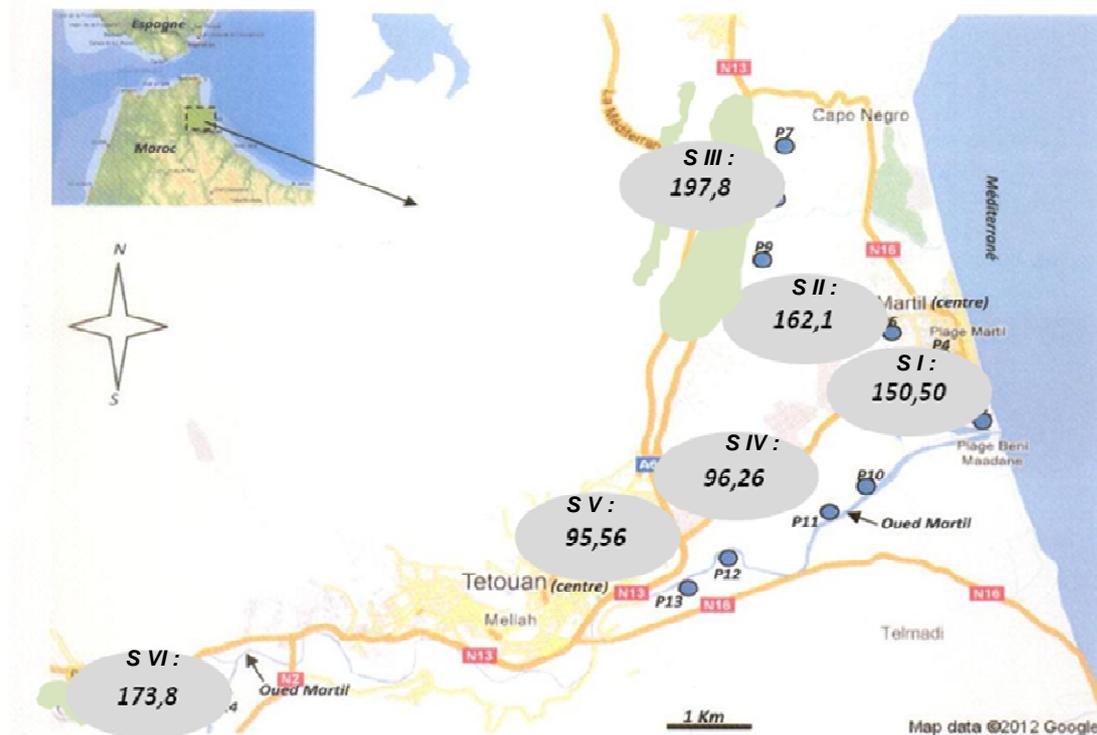


Figure 44 : Répartition des moyennes des concentrations de sulfates (en mg/L) dans les eaux de puits des secteurs prospectés S I, S II, S III, S IV, S V et S VI

2.11. Nitrates et nitrites :

Les nitrates et les nitrites sont répertoriés parmi les principales catégories de polluants chimiques rencontrés dans les eaux souterraines. Ils sont des composés chimiques constitués d'azote et d'oxygène. Leur présence excessive dans le sol peut contaminer les différentes sources d'eau et soulever des préoccupations pour la santé humaine et animale. Cette situation de risque de pollution de la nappe phréatique nous a poussé à évaluer la contamination des eaux souterraines par ces deux substances chimiques.

Vu l'importance des nitrates et des nitrites dans les eaux souterraines et leur probable impact sur la santé et l'environnement ; un suivi bimestriel leur a été consacré. Tous les deux mois des analyses de nitrates et nitrites ont été effectuées au niveau de tous les puits choisis. Les concentrations de ces éléments dans les quinze puits prospectés durant une année de suivi, sont respectivement représentées dans les figures 45 et 46. L'analyse de ces résultats est faite sur la base de normes fixées pour la qualité de l'eau potable. En effet, beaucoup de ménages utilisent l'eau de leurs puits pour les besoins ménagers et comme eau de boisson, comme a révélé notre enquête et autres études (NEJJARI, 2007 et NABIL, 2009).

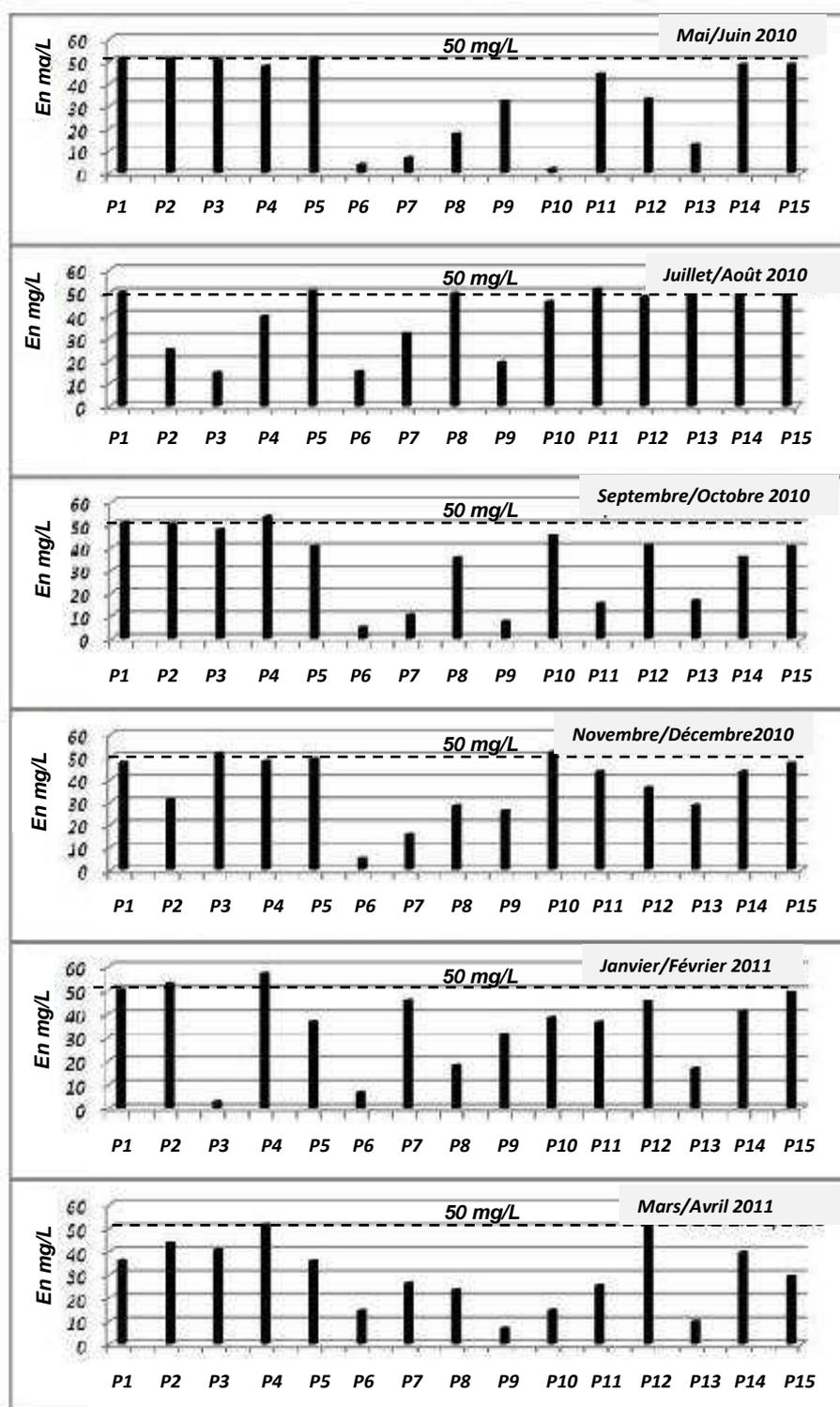


Figure 45 : Evolution bimestrielle des concentrations des nitrates en mg/L d'eau (les puits sont désignés de P1 à P15). Le trait en tirets désigne la VMA marocaine des nitrates dans l'eau potable (50 mg/L)

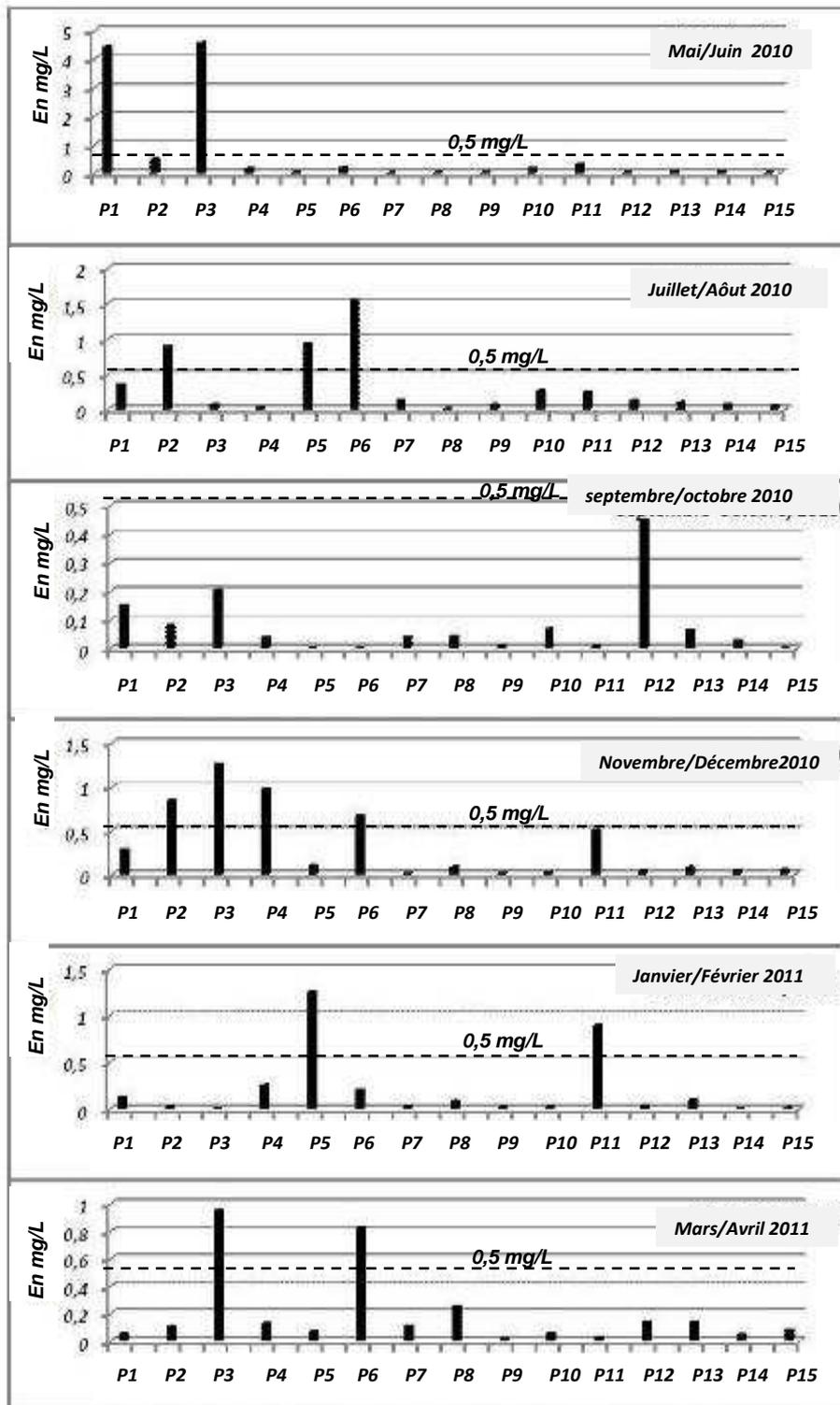


Figure 46 : Evolution bimestrielle des concentrations des nitrites en mg/L d'eau (les puits sont désignés de P1 à P15). Le trait en tirets désigne la VMA des nitrites dans l'eau potable qui est de 0,5 mg/L.

Il ressort des analyses effectuées que 18 échantillons sur 90 (soit 20%) dépassent la VMA marocaine de concentration en nitrates qui est de 50 mg/L (NORME MAROCAINE, 2006). 26 autres échantillons se trouvent dans la tranche critique entre 40 et 50 mg/L. La concentration minimale est de 2,39 mg/L. Les puits dépassant la norme ne sont pas gravement contaminés, puisque la concentration maximale des nitrates est de 56,88 mg/L relevée dans le puits 4 du secteur II.

Concernant les nitrites, les concentrations ont été comprises entre 0,001 mg et 4,574 mg/L. Sur les 90 échantillons analysés, 15 ont été supérieurs à la concentration de la VMA marocaine qui est de 0,5 mg/L, c. à. d. 16,66%.

L'étude n'a pas révélé d'influence significative de la saisonnalité sur les concentrations des nitrates et des nitrites dans les puits étudiés. Les différentes variations entre les secteurs analysés sont dues probablement aux différentes sources de pollution, leurs emplacements et leurs distances par rapport aux puits prospectés.

Secteur I : Les puits 1, 2 et 3 se trouvent dans le quartier Diza. Ce quartier informel souffre d'un manque total d'assainissement liquide, comme les eaux usées à l'air libre, fosses septiques non normalisées et de graves défaillances d'assainissement solide. Le quartier est entouré par un lac mort hautement pollué ; c'est le bras mort de Diza. 8 échantillons sur 18 (du secteur), soit 44,44% dépassent la VMA de 50 mg de nitrates par litre d'eau. L'intervalle critique de 40 à 50 mg/L est dépassé dans 5 autres échantillons, soit 27,77%.

Les analyses de nitrites montrent 7 échantillons qui dépassent la VMA de 0,5 mg/L d'eau, soit 38,88%. Des pics importants de nitrites ont été enregistrés au niveau des puits 1 et 3 par des concentrations respectivement de 4,428 mg/L et 4,574 mg/L, dépassant, ainsi, largement la VMA. Le secteur I contenant les puits 1, 2 et 3 est le secteur le plus contaminé par les nitrates et les nitrites parmi les secteurs étudiés de la plaine.

Secteur II (puits 4, 5 et 6) : L'équipement de ce quartier par un réseau d'assainissement liquide semble prévenir contre une pollution plus grave. On note 5 échantillons qui dépassent la norme de 50 mg/L de nitrates et 4 échantillons se trouvant dans l'intervalle critique de 40-50 mg/L. Quant aux nitrites, la recherche a soulevé 6 échantillons qui dépassent la concentration de 0,5 mg/L.

Secteur III : Les puits 7, 8 et 9 se trouvent dans une zone verte non résidentielle à caractère pastoral et agricole non intensifs, où la pollution de la nappe par les eaux usées, rejets industrielles et les fertilisants est minime. Les résultats de l'analyse semblent répondre à cette réalité : on ne trouve aucun échantillon qui dépasse les normes de concentration ni pour les nitrates ni pour les nitrites. Seulement deux échantillons se trouvent dans la tranche critique entre 40 et 50 mg/L pour les nitrates.

Secteur IV : Les puits 10 et 11 se trouvent au bord de l'oued Martil. Ils sont en aval des polluants liquides de la ville de Tétouan. La zone non équipée de réseau d'assainissement liquide est connue pour son activité agricole et l'élevage. L'analyse révèle le dépassement de la norme des nitrates dans deux échantillons. Trois autres échantillons sont dans la tranche critique de 40-50 mg/L. Toutefois, aucun puits ne dépasse la VMA pour les nitrites.

Secteur V : Quant aux puits 12 et 13, ils se trouvent dans un quartier à forte densité résidentielle (quartier Coelma). Le quartier se trouve juste sur la rive sud d'oued Martil en aval des polluants liquides versés dans la rivière. Quoique le site soit équipé de réseau d'assainissement liquide, les résultats des analyses des puits indiquent le dépassement de la norme pour les nitrates dans deux échantillons. Trois autres résultats se trouvent dans l'intervalle critique de 40-50 mg/L. La VMA des nitrites n'est pas dépassée dans le secteur étudié.

Secteur VI : Les puits 14 et 15 sont localisés en amont des sources de pollution de l'oued Martil, mais la zone est connue pour ses activités agricoles et l'élevage. Les résultats montrent seulement un échantillon qui dépasse la norme de nitrate. Toutefois, huit autres échantillons se situent dans la tranche critique de 40-50 mg/L, ce qui démontre que le secteur étudié est dégradé et susceptible de contenir prochainement une eau impropre à la consommation en l'absence de mise en œuvre de mesures adoptées. Au niveau des mêmes puits, aucun échantillon ne dépasse la norme de 0,5 mg de nitrites par litre d'eau.

Les moyennes des valeurs de concentrations des nitrates et des nitrites dans les eaux de puits, au niveau des secteurs étudiés, sont illustrées dans les figures 47 et 48 respectivement. Pour les nitrates, le secteur III est le secteur dont la moyenne est la plus basse (23,89 mg/L). La moyenne la plus grande est celle du secteur VI (43,48 mg/L). Cette valeur est probablement due au lessivage des engrais azotés et les déjections animales dans un secteur connu par son activité agricole et de l'élevage. Le

secteur I de Diza a également une moyenne importante de 41,33 mg/L qui serait causée par les eaux usées humaines et les déchets animaliers dans un quartier totalement dépourvu de service d'assainissement liquide.

Concernant les nitrites, le secteur I de Diza a relevé la plus grande valeur moyenne avec 0,828 mg/L, dépassant largement la VMA marocaine de 0,5 mg/L. les secteurs II, III, IV, V et VI ont affiché des valeurs moyennes de concentration de nitrites de 0,409 ; 0,049 ; 0,214 ; 0,011 et 0,038 mg/L respectivement (figure 48).

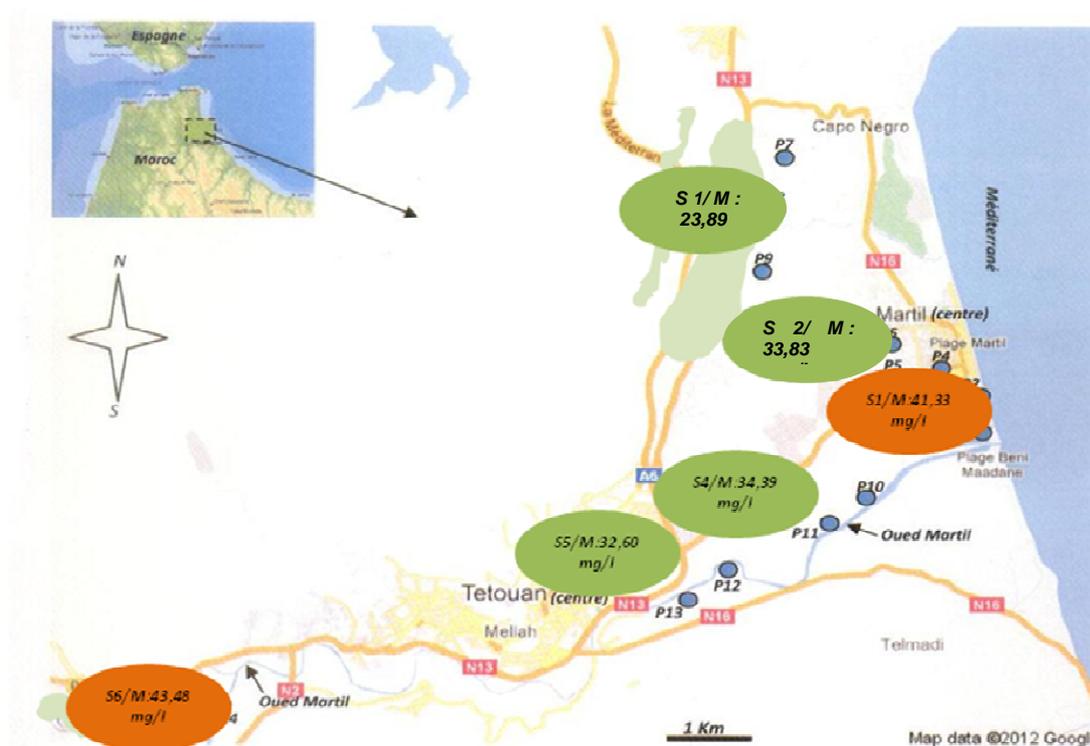


Figure 47 : Valeurs moyennes (M) des teneurs en nitrates dans les eaux des puits des secteurs prospectés (S I à S VI). La couleur orange désigne une concentration dans l'intervalle critique (40-50mg/L)



Figure 48 : Valeurs moyennes (M) des teneurs en nitrites dans les eaux des puits des secteurs prospectés (S I à S VI). La couleur en orange désigne le dépassement de la VMA.

Dans la zone d'étude, plusieurs facteurs peuvent causer la pollution de la nappe par les nitrates et les nitrites selon les secteurs territoriaux analysés. Vu la rareté des études antérieures sur l'origine de la contamination de la nappe phréatique de Martil par ces substances chimiques, une comparaison avec d'autres études peut nous guider sur les sources de cette pollution.

D'après MEHDAOUI et al. (2000) ; SEBEI et al. (2004) ; ARUMI et al. (2006) et MOUNI et al. (2009), les aquifères peu profonds ou non confinés peuvent être contaminés par des rejets ou des suintements dus aux pratiques agricoles ou aux réseaux d'égout présents sur le site. La même hypothèse de la faible piézométrie est évoquée également par d'autres études (DIENG et al., 1999 ; ROUABHIA et al., 2004 ; DEGBEY et al., 2011). Cependant, la nappe étudiée de Martil est connue par sa faible profondeur (HILALI et al., 2003), le fait qui pourrait favoriser l'hypothèse de la contamination des eaux souterraines par les nitrates et les nitrites à partir des eaux usées urbaines.

Dans les secteurs à vocation agricole (secteur IV et VI), les nitrates pourraient avoir également comme source le lessivage des engrais employés par les agriculteurs. La pollution des nappes par les fertilisants azotés est largement appuyée par d'autres travaux (MSS-FRANCE, 2004 ; DERRADJI et al., 2007 et ROUABHIA et al., 2009).

L'importance du dépistage des nitrates et nitrites dans les puits découle de l'impact sur la santé que pourraient engendrer ces substances. Des études soulignent la possibilité que des formations malignes dans des tissus biologiques puissent être formées par la présence des nitrates dans l'eau. A titre d'exemple, la fréquence élevée de cancers de l'estomac dans le Finistère (France) pourrait partiellement s'expliquer par la pollution de la nappe phréatique par des engrais à base de nitrates qui se transforment grâce aux nitrates-réductases buccales en nitrites, donnant naissance par la suite à des nitrosamines (BOUKERCHE, 2007). Plus grave, MEHDAOUI et al. (2000) affirment, dans leur travail sur la région de Moulay Bouselham au Maroc, qu'un dépassement de la VMA de 50 mg/L de nitrates peut provoquer une intoxication, voire la mort des animaux qui viennent s'abreuver des eaux polluées par ces substances chimiques.

3. Comparaison de nos résultats avec ceux d'autres études

3.1. Campagnes de prélèvement à Oued Laou

Dans le cadre de notre étude, deux campagnes de prélèvement ont été effectuées au niveau des eaux de puits d'Oued Laou en avril 2009 pour avoir des éléments de comparaison avec la qualité des puits de Martil. Il s'agit de huit puits choisis au hasard dans la commune d'Oued Laou. Certes, les résultats ne sont pas représentatifs de la qualité des eaux souterraine de cette région, mais ils peuvent être indicatifs sur l'état général de la nappe en comparaison avec la nappe de Martil.

Les prélèvements ont été effectués le matin et transportés au laboratoire dans une glacière réfrigérée. Les analyses ont été réalisées le même jour au laboratoire de l'Agence du Bassin Hydraulique du Loukkos (service qualité de l'eau) se trouvant au quartier Tamouda à Tétouan. Les teneurs en nitrates, nitrites, chlorures, calcium, dureté total, sulfates et magnésium ont été analysées. Le tableau 21 illustre les teneurs des dits éléments dépistés au niveau des huit puits prospectés à Oued Laou.

Tableau 21 : Concentrations de quelques éléments chimiques analysés au niveau de huit puits prospectés à Oued Laou (avril 2009)

Eléments Chimiques Puits	Nitrates (mg/L)	Nitrites (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	TH en°F	Mg ²⁺ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
Puits 1	0,252	0,012	31,50	97,04	41,62	84,36	5,17
Puits 2	0,370	0,010	46,15	107,60	41,70	71,92	23,82
Puits 3	0,391	0,010	28,40	101,52	37,22	57,54	34,07
Puits 4	0,267	0,018	21,30	129,28	47,68	74,64	45,41
Puits 5	0,421	0,016	145,55	127,27	52,20	99,04	35,53
Puits 6	0,286	0,013	92,3	77,04	39,58	98,75	56,87
Puits 7	1,711	0,015	177,5	135,84	82,60	236,38	108,82
Puits 8	0,863	0,005	39,05	66,4	27,64	53,64	20,17

Comme on peut le constater, aucun puits, prospecté par notre étude à Oued Laou, ne dépasse les VMA ni pour les nitrates ni pour les nitrites. Les valeurs des nitrates varient entre 0,252 et 1,711 mg/L, ce qui est très inférieur à la VMA marocaine des nitrates de 50 mg/L ; et les valeurs des nitrites oscillent entre 0,005 et 0,018 mg/L ; valeurs également en deçà de la VMA pour les nitrites qui est de 0,5 mg/L. Cela est probablement dû à l'absence de la pollution urbaine de la nappe. Vu la médiocrité de l'agriculture dans la région, il paraît que l'activité agricole paysanne n'a pas eu d'influence sur la qualité des eaux souterraines par des éventuels engrais azotés.

Les teneurs en ions chlorures varient entre 21,3 et 177,5 mg/L, c. à. d. inférieur à la VMA marocaine de 750 mg/L. Quant aux ions calcium, leurs teneurs varient entre 66,4 et 135,84 mg/L. Concernant les teneurs en magnésium, la nappe d'Oued Laou, à l'instar de celle de Martil, pourrait contenir une eau magnésienne puisque les concentrations de cet élément varient entre 53,64 mg/L et 236,38 mg/L, dépassant par cela la VMA marocaine de 50 mg/L dans les 100% des échantillons analysés. Les sulfates, comme indicateur de pollution urbaine de la nappe (déchets industriels) n'accusent non plus aucun dépassement de la VMA. Leurs teneurs oscillent entre 5,17 et 108,82 mg/L, c. à. d. largement inférieures à la VMA de 400 mg/L. Selon notre enquête sur terrain auprès des gens et consommateurs, la plus grande majorité des puits d'Oued Laou sont utilisés directement comme sources d'eau potable.

Le Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement (Département de l'Eau) a soulevé dans ses campagnes de mesures de l'année 2007/2008 que la qualité des eaux souterraines de la nappe de Oued Laou est bonne (SEEE, 2009).

D'autre part, une étude menée à Oued Laou par Rkiouak et al. (1997) a soulevé que la nappe est indemne de pollution nitrique. Les teneurs en nitrates au niveau de six puits prospectés par l'auteur ont été de 66,0 ; 0,3 ; 9,0 ; 0,5 ; 8,0 et 0,5 mg/L. Concernant les nitrites, toutes les concentrations ont été pratiquement nulles (entre 0,00 et 0,10 mg/L). Les teneurs en ions calcium ont varié de 11 à 105 mg/L, celles des chlorures ont varié entre 25 et 140 mg/L ; et les sulfates ont oscillé entre 26 et 99 mg/L au niveau des six puits suivis par les auteurs, traduisant ainsi une absence d'impact de pollution urbaine sur la nappe. Les teneurs en magnésium ont varié de 18 à 49 mg/L traduisant, contrairement à nos campagnes, une eau légèrement magnésienne.

3.2. Autres régions du Maroc :

Dans quelques régions du Maroc, la problématique de la pollution des eaux souterraines par les nitrates et les nitrites a été soulevée par d'autres études et chercheurs. Dans leur travail sur la nappe phréatique de Tadla au Maroc, AZGHAR et al. (2002) ont soulevé que le niveau de la pollution nitrique des eaux souterraines dans le périmètre irrigué du Tadla a commencé (en 2002) à devenir critique. Les zones dont les eaux souterraines dépassent une teneur en nitrates de 50 mg NO_3^-/L sont localisés en aval des Béni Moussa Est. Les auteurs détaillent l'origine polyfactorielle de la pollution nitrique de la nappe et les facteurs aidant à la contamination nitrique: Il s'agit de la présence des eaux usées urbaines et industrielles, les engrais agricoles, la faible profondeur de la nappe, la texture du sol, la vitesse de l'infiltration de l'eau dans la nappe et le sens d'écoulement de celle-ci.

Une autre recherche dans la région de Mzamza (EL ASSLOUJ et al., 2007) au Maroc a confirmé l'étiologie polyfactorielle de la pollution des nappes par les nitrates et les nitrites. Concernant ces dernières substances comme dérivées azotées, ils proviendraient, selon les auteurs, directement des eaux usées urbaines.

A M'nasra, la nappe phréatique n'a cessé de se dégrader par la pollution nitrique entre 1993 et 2003. En effet, une étude menée par IDRISSI ALAMI et al (2007) sur 161 puits a relevé que les moyennes générales des concentrations des nitrates en 1993 et 2003

sont respectivement de 106,4 et 119,6 mg/L ; soit une augmentation de 13,2 mg/L. Si en 1993, 44 des 161 puits prospectés (27,3 %) répondaient aux normes de potabilité et dosaient moins de 50 mg/L, en 2003 seulement 28 parmi les 161 puits prospectés (17,4 %) répondaient aux normes de potabilité. L'analyse spatiale de la pollution nitrique de la zone M'nasra, a montré qu'il y a une certaine amélioration de la qualité de la nappe entre 1993 et 2003 au Sud de la zone étudiée ; en revanche la qualité de la nappe a été dégradée dans la moitié Nord de cette zone.

Dans la nappe quaternaire, dans le bassin-versant de Rheris dans le Sud-Est marocain, KABIRI et al (2008) indiquent dans leur étude que la pollution nitrique de la nappe est alarmante autour des agglomérations humaines. Elle a pour origine l'utilisation intensive des fertilisants et surtout de la pratique généralisée des fosses septiques des rejets domestiques.

Dans les eaux souterraines du système aquifère de la plaine des Triffa au Maroc nord oriental, FEKKOUL et al (2011) ont soulevé, dans une étude sur 15 puits, la contamination des eaux souterraines de la plaine du fait de l'intensification agricole que connaît cette région. Les nitrates sont retrouvés quasiment dans tous les puits de la plaine avec des teneurs qui varient entre 1,5 et 151,9 mg NO_3^-/L avec une teneur moyenne de 43 mg NO_3^-/L . Les teneurs les plus importantes sont observées dans les régions des grandes cultures ce qui confirme l'origine agricole de la pollution nitrique. Les zones à concentration dépassant les 50 mg/L sont assez étendues et localisées au Nord Ouest et au centre de la plaine majoritairement dans le sens d'écoulement et sont répartis comme suit : 11,9% des eaux des puits analysés sont de qualité bonne à excellente avec une teneur inférieure 25 mg NO_3^-/L ; 18,8% des puits analysés présentent des teneurs comprises entre 25 et 35 mg NO_3^-/L ; leurs eaux sont de qualité moyenne ; 31,5% des puits analysés présentent des teneurs comprises entre 35 et 50 mg NO_3^-/L et leurs eaux sont de qualité médiocre. 33,9% des puits analysés présentent des teneurs supérieures à la norme de potabilité fixée à 50 mg NO_3^-/L par l'OMS. Ces eaux sont de qualité mauvaise. L'étude des 15 puits a permis aussi d'identifier une importante contamination par les organochlorés (25 % des puits) et leur bioaccumulation à des faibles doses. Les auteurs signalent que les valeurs enregistrées sont très inquiétantes, et indiquent que l'effet de cette pollution présente un danger direct pour la santé de l'homme.

S'agissant d'une région rurale à Meknès, non polluée par les effluents urbains, BELGHITI et al. (2013) ont soulevé que les eaux souterraines de la zone étudiée en

2010 avaient une qualité acceptable pour la consommation humaine et pour l'irrigation ; le fait qui serait expliqué par l'absence d'éléments polluants pendant la recharge de la nappe phréatique. Les teneurs en nitrates et nitrites sont comprises, selon l'étude, dans les intervalles de 4 -12 mg/L et 0,01- 0,35 mg/L respectivement.

Au Maroc, Le Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement, chargé de l'Eau et de l'Environnement (Département de l'Eau) a mené une campagne de mesures au cours de l'année 2007/2008 au niveau des nappes d'eau souterraine au Maroc. Leur qualité globale a été bonne pour 28% des stations, moyenne pour 28 % des autres et dégradée pour 44% des stations. Les paramètres responsables de cette dégradation sont la forte minéralisation de ces eaux et la présence de nitrates en teneurs élevées. Les nappes d'eaux souterraines fortement minéralisées sont les nappes de Berrechid, Chaouia côtière, Beni Amer et Tafilalt. En outre, des teneurs élevés en nitrates ont été enregistrés au niveau des nappes de Temara, Meskala-kourimate, Berrechid et Chaouia. Dans la même étude, le Département de l'Eau a qualifié la qualité de la nappe de Martil en 2007/2008 de moyenne à mauvaise. Le principal problème de la nappe de Martil selon le Département de l'Eau est le nitrate, sans pour autant donner des chiffres sur sa concentration dans les eaux de la nappe. Le Département de l'Eau dresse la qualité globale des eaux souterraine du Maroc dans le tableau 22 (SEEE, 2009).

Tableau 22 : Qualité globale des eaux souterraines au Maroc durant l'année 2007/2008 (SEEE, 2009 ; Remarquer la nappe de Martil en gras)

Bassins	Nappes	Classe de qualité	Problème
Sebou	Nappe de Fès Meknès par endroit	Mauvaise	Nitrate
	Nappe du Gharb par endroit	Bonne à moyenne	
	Nappe Maâmoura par endroit	Mauvaise	Nitrate
	Nappe de Taza	Bonne à moyenne	
Oum Er Rbia	Nappe de Beni Amer	Très mauvaise	Nitrate + conductivité
	Nappe de Beni Moussa	Moyenne à mauvaise	Nitrate
Loukkos	Nappe de Charf Al Akab	Bonne à moyenne	-
	Nappe de Martil	Moyenne à Mauvaise	Nitrate
	Nappe Smir	Moyenne	Conductivité
	Nappe de R'mel	Mauvaise à très mauvaise	Nitrate
	Nappe de Oued Laou	Bonne	
	Nappe de Nekkour	Mauvaise à très mauvaise	Conductivité
Moulouya	Nappe de Triffa (nord de Berkane)	Très mauvaise	Conductivité + nitrate
	Nappe de Guercif	Moyenne à mauvaise	Conductivité
	Nappe des Angad	moyenne à mauvaise	Nitrate
	Nappe du Kert, Gareb et Bou Areg	Très mauvaise	Conductivité
	Nappe de Beni Mathar	Moyenne	Conductivité
Bouregrag	Nappe de Berrechid	Très mauvaise	Nitrate + conductivité
	Nappe de la Chaouia côtière	Très mauvaise	Nitrate + conductivité
	Nappe de Temara	Très mauvaise	Nitrate
Tansift	Nappe de Haouz	Moyenne	Conductivité
	Nappe de Abda et Doukkala	Mauvaise	Nitrate + conductivité
	Nappe de la Bahira	Moyenne à Mauvaise	Nitrate + conductivité
	Nappe d'Essaouira	Mauvaise à très mauvaise	Nitrate
Sous Massa	Nappe de Sous	Bonne	
	Nappe de Massa Chtouka	Moyenne à Mauvaise	Nitrate + conductivité
	Nappe de Zagora	Bonne	
	Nappe de Guelmim	Moyenne	Nitrate + conductivité
	Nappe de Tantan	Moyenne	Nitrate + conductivité
	Nappe de Tata	Moyenne	Nitrate + conductivité
Ziz Guir-Rheris	Nappe d'Errachidia	Moyenne à Mauvaise	Conductivité
	Nappe de Tadigoust-Goulmina	Moyenne à Mauvaise	Conductivité
	Nappe de Tafilalt	Très mauvaise	Conductivité
	Nappe de Toudra Ferkala	Moyenne à Mauvaise	Nitrate + Conductivité
Sakiat El Hamra Oued Eddahab	Nappe de crécé de Sahara	Moyenne à Mauvaise	Conductivité
	Nappe de Foum El Oued	Moyenne à Mauvaise	Conductivité

3.3. Dans le monde :

Dans la région maghrébine, une étude menée en Algérie par ROUABHIA et al. (2009), au niveau de la plaine de la Merdja –Tébessa, a révélé l'existence d'une zone située à l'est et au nord de la ville où les teneurs en nitrates ne dépassent pas les normes, ce qui traduit, selon les auteurs, une protection argileuse de la nappe à cet endroit de la plaine, et celle d'une zone centrale et occidentale où la teneur en nitrates, supérieure à 50 mg/L caractérise une nappe moins protégée et polluée. L'étude menée sur 20 puits pendant dix mois (2000/2001) a montré aussi que la variation des concentrations en nitrates – souvent très élevées lorsque la surface piézométrique ne dépasse pas les dix mètres – est fonction de la profondeur de l'eau et est liée au processus de réduction par oxydation des matières organiques.

En Tunisie, SEBEL et al (2004) ont réalisé une recherche physicochimique sur les eaux souterraines de la région de Grombalia en Tunisie nord-orientale. Ils ont observé que les eaux souterraines ont des teneurs en nitrites généralement inférieures aux normes nationales, tandis que les nitrates présentent des concentrations très élevées en zone aval, témoignant d'une contamination de la nappe à ce niveau ; les teneurs relativement élevées en nitrates et surtout dans la partie aval de la plaine peuvent avoir comme origine le lessivage des terres cultivées renfermant des engrais, les rejets industriels ainsi que la décomposition de la matière organique.

En Tunisie, également, une étude de BEN HAMOUDA et al (2009) sur l'aquifère plio-quaternaire de la côte orientale du Cap Bon a démontré que l'aquifère connaît une dégradation de la qualité de ses eaux. En zone littorale, l'intrusion marine résultant de la surexploitation de la nappe est identifiée, mais elle n'est responsable que d'une partie de la détérioration qualitative : le développement de l'irrigation, avec le lessivage des sols et l'entraînement des produits agricoles, affecte l'ensemble de la nappe et participe aussi à l'augmentation de la minéralisation.

Au Liban, une étude de HALAWANI et al (1999), dans la plaine côtière d'Akkar a soulevé la contamination de 14 puits sur 15 par les nitrates. Les puits contaminés ont une eau qui dépasse la norme de 50 mg/L avec un maximum de 163 mg/L de nitrate. De plus une intrusion saline est présente dans la partie nord du littoral et la nappe phréatique dans cette région se dégrade. Dans la région d'étude une population estimée à 175 000 habitants puise depuis toujours, sans aucun contrôle sanitaire, dans la nappe phréatique l'eau nécessaire à ces besoins.

En France, MORLON et al. (1998) ont signalé que le département de l'Yonne est l'un de ceux où la pollution par les nitrates des nappes phréatiques utilisées pour la consommation humaine a été le plus tôt détectée. En effet, les concentrations de nitrates les plus élevées sont observées à proximité du confluent de l'Yonne avec l'Armançon et le Serein à 150 km au sud ouest de Paris. Les teneurs ont varié entre 5 et 80 mg/L, et la moyenne a brutalement été multipliée par 5 en deux ans passant de 7 à 34 mg/L (en 1970).

En Afrique et dans la commune d'Abomey-Calavi au Bénin, DEGBEY et al. (2008) ont, par contre, révélé que 100 % des puits prospectés ont une teneur normale en nitrates, à la différence des nitrites pour les quelles 13,3 % des eaux de puits analysés présentent un taux supérieur à 0,1 mg/L. 16,7 % des échantillons ont un taux de manganèse supérieur à 0,05 mg/L. La présence de ces éléments traduit la pollution chimique de certains puits étudiés. Cette situation pourrait s'expliquer, selon les chercheurs, par le niveau de l'assainissement et de l'hygiène publique dans la commune d'Abomey-Calavi.

En Amérique latine, une étude a été menée en Chile par ARUMI et al. (2006), où 14% des puits étudiés (94 puits analysés une seule fois chacun) ont montré des teneurs en nitrates dépassant la norme nationale du pays. Dans la zone du Parral, la contamination des puits par les nitrates a été associée principalement à la présence d'animaux d'élevage. Le risque sur la santé des nourrissons consommateurs de cette eau a été soulevé par les auteurs.

En sud-ouest de l'Uruguay, PEDROMO et al (2001), en menant des analyses des eaux souterraines de la région (355 puits analysés une fois chacun), ils ont indiqué que la pollution des puits par les nitrates est directement associée à la proximité des puits aux sources ponctuelles de pollution comme les fosses septiques, les déchets ménagers et la concentration des animaux d'élevage. Les concentrations de nitrates ont varié dans la dite étude entre 1 et 93 mg/L.

4. Possibilité de présence d'autres substances chimiques dans la nappe de Martil

Dans la Commune Urbaine de Martil et dans plusieurs autres zones de Tétouan et du Maroc, d'autres substances chimiques pourront être directement impliquées dans la contamination des nappes. A Martil et à Tétouan, à titre d'exemple, en plus des effluents industriels (paragraphe 1.5.4.2), des campagnes intensives de démoustication sont

effectuées chaque année pour éradiquer des maladies transmises par les anophèles et pour diminuer le degré de nuisance des ces insectes. Des risques de contamination des eaux souterraines par les substances chimiques de démoustication ne pourront être exclus, et des études dans ce domaine seront nécessaires pour évaluer l'importance et l'impact de la contamination de la nappe phréatique par les insecticides massivement utilisés contre les larves et les adultes de moustiques. En effet, plus de deux tonnes des insecticides sont écoulés chaque année sur le territoire de la commune de Martil pour lutter contre les moustiques. Ses produits se trouvent infiltrés dans le sol, la rivière et la nappe phréatique ou transportés par le ruissellement. Leur impact sur l'environnement n'a pas été encore évalué. Les principaux produits insecticides et leurs quantités utilisées par le bureau municipal d'hygiène de la commune de Martil sont dressés dans le tableau 23. On y trouve des substances actives à base de *Chlorpyrifos*, *Piperonyl butoxide*, *Perméthrine*, *Tétraméthrine*, *Flocoumafene* ; *Bromadiolone* et autres (BMH, MARTIL, 2013).

Tableau 23 : Principales substances actives des insecticides et raticides et désinfectants employés par la Commune Urbaine de Martil pour les campagnes de démoustication et dératisation (BMH, MARTIL, 2013)

Substances actives des pesticides, raticides et désinfectants:	Quantité
Insecticide liquide à base de 26% de <i>Chlorpyrifos</i> et 2% de <i>Tétraméthrine</i> et 8% de <i>Piperonyl butoxide</i>	400 L
Insecticide liquide concentré émulsifiable à base de 0,40% de <i>Perméthrine</i> + 0,15% de <i>Tétraméthrine</i> + 0,75% de <i>Piperonyl Butoxide</i>	600 L
Larvicide à base de 500g/L de <i>Temephos</i>	200 L
Produit à base d'agent de surface non ionique et parfum haute performance	600 L
<i>Chlorure de chaux</i> à 30° chlorométrique	200 Kg
<i>Hypochlorite de calcium</i> à 70% en pastille de 20 g	100 Kg
Désinfectant à base de Chlorure de <i>Didécylidiméthylammonium</i> , <i>Ethanol</i> , <i>Biguanide</i>	60 L
Raticide pellet à base de 0,005% de <i>Flocoumafene</i>	100 Kg
Raticide à base de 0,005% de <i>Bromadiolone</i> en bloc de 20 g	60 g

5. Conclusion de la partie physicochimique

Le développement urbain incontrôlé de la ville de Martil n'a pas été sans conséquences sur la qualité des eaux souterraines. En effet, le manque d'assainissement liquide dans des secteurs hautement condensés et non structurés, l'absence de l'épuration des eaux usées dans la commune ont engendré une pollution nitrique de la nappe phréatique de la région. L'étude a révélé que plusieurs secteurs accusent un dépassement des concentrations en nitrates et nitrites. Les résultats obtenus ont montré que 18 échantillons sur 90 (20%) dépassent la VMA de 50 mg de nitrates par litre, et 26 autres (28,88%) se trouvent dans le seuil critique entre 40 et 50 mg/L. Les résultats ont varié de 2,39 mg/L à 56,88 mg/L. Les nitrites se trouvent dans des concentrations comprises entre 0,001 et 4,574 mg/L. Sur les 90 échantillons analysés, 15 ont été supérieurs à la concentration de la VMA marocaine qui est de 0,5 mg/L, c. à. d. 16,66%. L'étude n'a pas révélé d'influence significative de la saisonnalité sur les concentrations des nitrates et des nitrites dans les secteurs étudiés.

D'autres valeurs de paramètres physicochimiques ont également été révélées. Elles sont hors normes comme l'oxygène dissous pour lequel 90% des échantillons ont une teneur inférieure à la norme marocaine (entre 5 et 8 mg/L).

Pour la dureté totale (TH), quelques 58,34% des échantillons dépassent la VMA de 35° F, et les eaux souterraines étudiées sont globalement moyennement dures.

Les résultats concernant la teneur en magnésium montrent que les eaux de la nappe sont relativement magnésiennes avec une moyenne de 80,38 mg/L. Des études seront nécessaires pour confirmer ou infirmer l'importante présence du magnésium dans la nappe phréatique de Martil.

Les autres éléments physicochimiques dépistés n'affichent globalement pas de déviations importantes aux valeurs maximales admises marocaine (pH, conductivité, salinité, TSD, turbidité, calcium, sulfates et chlorures)

IV. DISCUSSION GENERALE

1. Eaux de la nappe de Martil et potabilité

Les eaux des puits prospectés ont montré des fluctuations importantes dans le degré de contamination microbiologique et physicochimique selon les secteurs et les puits dépistés. Ces eaux souterraines ne peuvent être utilisées directement comme eau potable. Toutefois, dans les puits les moins pollués par les germes indicateurs de la contamination fécale et n'accusant pas une contamination nitrique (puits 7 ; 8 ; 9 ; 14 et 15), un traitement par désinfection (chloration) pourrait potabiliser l'eau en question si les autres conditions de potabilité exigées par la norme marocaine NM 03.7.001 seront remplies (NORME MAROCAINE, 2006). Parmi ces conditions, il ne doit pas y avoir de coliformes dans 95% des échantillons prélevés sur une période de 12 mois ; l'absence de résultats positifs dans deux échantillons consécutifs ; un pH < 8 (pour que la désinfection de l'eau par le chlore soit efficace, le pH doit être de préférence < 8) ; ainsi qu'une absence de germes pathogènes (*Salmonella* à titre d'exemple). Les suggestions de la Norme de potabilité sur les substances indésirables et les substances toxiques doivent également être remplies. Des études sur la chloration des puits de la nappe seront nécessaires pour confirmer ou infirmer la possibilité d'une potabilisation des eaux de quelques puits prospectés (ou autres) qui « s'approchent » de la potabilité, et s'assurer s'il s'agit de contamination passagère ou d'une contamination grave et irréparable.

2. Possibilité de production de l'eau potable dans la nappe de Martil:

Parmi les objectifs de la présente étude, figure l'évaluation de la qualité des eaux souterraines de la nappe de Martil par rapport aux critères de qualité des eaux utilisées pour la production de l'eau potable. En effet, vu la richesse de la nappe en eaux souterraines et l'augmentation de la population de la région avec l'augmentation permanente de la demande en eau potable, un recours éventuel aux eaux souterraines de la zone ne doit pas être écarté.

Le Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie des Mines de l'Eau et de l'Environnement chargé de l'Eau et de l'Environnement dresse une liste de valeurs de paramètres physicochimiques et bactériologiques, de substances indésirables et de substances toxiques des eaux utilisées pour la production de l'eau potable. Quelques paramètres de cette liste ont été dépistés dans notre étude. Ils sont affichés dans le tableau 24 (SEEE, 2013)

Tableau 24: Quelques éléments physicochimiques et microbiologiques entrant dans la classification des eaux utilisées pour la production de l'eau potable

Catégorie	A 1		A 2		A 3	
	G	I	G	I	G	I
Paramètres						
pH	6,5-8,5	-	6,5-9,2	-	6,5-9,2	-
Conductivité à 20°C (en µS/cm)	1300	2700	1300	2700	1300	2700
Chlorures (mg/L)	300	750	300	750	300	750
Sulfates (mg/L)	200	-	200	-	200	-
Oxygène dissous (mg/L)	7 (90%)	-	5 (70%)	-	3 (50%)	-
Nitrates (mg/L)	-	5	-	50	-	50
CF (UFC/100 ml)	20	-	2000	-	2000	-
CT (UFC/100 ml)	50	-	5000	-	5000	-
SF (UFC/100 ml)	20	-	1000	-	1000	-

Dans ce tableau, la **catégorie A 1** est réservée pour les eaux nécessitant, pour être potables, un traitement physique simple et une désinfection notamment par filtration et désinfection (SEEE, 2013). Pour la **catégorie A 2**, les eaux nécessitent, pour être potables, un traitement normal physique, chimique et une désinfection notamment par préchloration, coagulation, floculation²⁵, décantation²⁶, filtration²⁷ et désinfection (chloration finale). La **catégorie A 3** pour les eaux nécessitant, pour être potables, un traitement physique, chimique poussé, un affinage et une désinfection notamment par chloration au « break-point²⁸», coagulation, floculation, décantation, filtration, affinage (charbon actif), et désinfection (ozone, chloration finale).

²⁵ Floculation : Procédé d'épuration consistant à rassembler en flocons les impuretés en suspension dans un liquide

²⁶ Décantation : Les plus grosses et plus lourdes particules sont envoyées dans des bassins de décantation où elles se déposent au fond.

²⁷ Filtration : L'eau est ensuite envoyée dans des bassins filtrants à travers des couches de sable et de gravier, à travers des charbons actifs ou à travers une membrane.

²⁸ Break-point : Méthode de chloration utilisée pour éliminer les chloramines

A l'intérieur de chaque catégorie, il y a deux colonnes. **La colonne G** (valeurs guides) : les valeurs qui y sont indiquées correspondent à des exigences que doit satisfaire toute eau superficielle utilisée pour la production de l'eau potable pour être classée dans l'une des trois catégories mentionnées. **La colonne I** (valeurs impératives) : les valeurs qui y sont indiquées correspondent à des exigences que doit satisfaire impérativement toute eau utilisée pour la production de l'eau potable pour être classée dans l'une des trois catégories mentionnées.

D'après les catégories et critères cités ci-dessus, il serait impossible de conclure sur une possibilité générale d'exploiter la nappe de Martil pour la production de l'eau potable. Toutefois, des possibilités peuvent être énoncées au niveau sectoriel. Les secteurs Diza et Chbar (puits 1, 2, 3, 4, 5 et 6) ne répondent à aucune des catégories des eaux qui seraient utilisables pour la production de l'eau potable, car tous les paramètres dépassent largement les limites admises, surtout pour les paramètres microbiologiques. Ces quartiers ont une haute densité résidentielle et se trouvent sur des parties de nappe fortement polluées.

Les puits 7, 8, et 9 des quartiers Swani et Jamae Tassiast, répondent globalement aux critères microbiologiques des SF. Les concentrations des eaux de ces puits n'ont jamais dépassé les catégories A 2 et A 3 pour les SF, mais les concentrations en CT et CF ont été dépassées dans un puits ou un autre selon la période d'échantillonnage. Concernant les paramètres physicochimiques, les valeurs du pH dans ce secteur se trouvent dans la tranche de la catégorie A 1 (6,5 – 8,5). Les valeurs de la conductivité électrique se trouvent majoritairement dans les limites demandées de A 1, A 2 et A 3 (1300-2700 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Les valeurs des chlorures ne dépassent pas les 750 mg/L. Ils se trouvent ainsi dans les limites des eaux pouvant être exploitées pour la production des eaux potables. Pour les sulfates, bien que les colonnes I des catégories A 1, A 2 et A 3 n'indiquent pas de valeur exigée, les concentrations de ce paramètre dans les puits cités ne dépassent pas les valeurs maximales admises de 400 mg/L (NORME MAROCAINE, 2006), et les concentrations des nitrates sont inférieures à la valeur exigée de 50 mg/L.

Concernant, les puits 10, 11, 12 et 13 ; ils se trouvent au niveau de la route Martil-Tétouan et au quartier Coelma. Leurs eaux souterraines ne répondent pas à la quasi-totalité des critères des eaux pouvant être exploitées pour la production de l'eau potable. Il s'agit surtout de dépassement grave des seuils des CF, CT et SF. Les limites tolérées de nitrates sont également dépassés dans un puits ou un autre et selon la saison de prospection.

Les puits 14 et 15 qui se trouvent à 5 km en direction de Chaouen et de Tanger respectivement. Ils ont montré des concentrations microbiologiques acceptables pour la production de l'eau potable (catégorie A 1 et A 2). Les teneurs en nitrates se trouvent globalement dans les limites maximales admises. Les autres paramètres analysés n'enregistrent pas de dépassement. Les résultats concernant les puits 14 et 15 montrent que l'eau est de bonne qualité à l'amont de la ville. Celle-ci se dégrade à l'aval sous l'influence anthropique liée aux rejets agricoles, urbains et industriels.

Ainsi, notre étude a soulevé que la nappe phréatique de Martil connaît une hétérogénéité dans les niveaux de pollution selon les secteurs et les puits choisis et les paramètres analysés. Les secteurs où on pourrait avoir des possibilités de produire de l'eau potable se trouveraient loin des agglomérations urbaines, et seraient situées au niveau de Jammaâ Tassiast, Foum el Oullek et Groura dans la commune de Martil, et dans la partie sud-ouest de la ville de Tétouan (sortie vers Chaouen et Tanger), c'est-à-dire en amont de la pollution urbaine et de la tranche polluée de oued Martil. Toutefois, ce constat n'intéresse que les paramètres que nous avons eu les moyens de dépister. Autres études seront nécessaires pour déterminer les valeurs d'autres paramètres exigés par les critères de classification des eaux utilisées pour la production de l'eau potable (SEEE, 2013), comme les substances indésirables (bore, ammonium, cuivre, phénols etc.) et les substances toxiques (arsenic, cadmium, chrome, plomb etc.).

La figure 49 essaie de présenter, sur terrain, les secteurs dont l'eau souterraine est probablement valable pour la production de l'eau potable en procédant aux différentes techniques de traitement et épuration citées précédemment. Les zones colorées en bleu au niveau des secteurs S III et S VI (puits 7 ; 8 ; 9 ; 14 et 15) seraient les principales zones ayant une éventuelle possibilité de production de l'eau potable à partir des eaux de la nappe.



Figure 49: Carte montrant les secteurs où l'eau souterraine est susceptible d'être exploitée pour la production de l'eau potable, en bleu (p7, p8, p9, p14 et p15)

3. Prévention et lutte contre la pollution des puits

3.1. Localisation et hygiène des puits

La contamination peut être évitée grâce à une bonne construction du puits, de même que par l'aménagement et l'entretien régulier de ses abords. MAJDOUB et al. (2003) recommandent les mesures préventives et correctives suivantes pour la localisation et l'entretien des puits :

- S'assurer que les puits d'eau potables soient localisés à des distances raisonnables (réglementaires) des sources de contamination (fosse septique, puisard, champ d'épuration, puits d'évacuation, décharge d'égouts, parc d'animaux, fumier animal etc.)
- Veiller à ce que le tubage soit à une distance raisonnable au dessus de la surface du sol (à au moins 30 cm).

- Porter attention au tubage afin qu'il soit entouré d'un monticule de terre (plate-forme et collets imperméable) et à la pente du sol autour du puits pour qu'elle soit orientée de manière à ce que l'eau de ruissellement ne puisse pas s'infiltrer le long du tubage

Selon BLANCER (1978) ; Les conditions d'hygiène d'un puits doivent être étudiées de la profondeur à la superficie. Il faut puiser de l'eau de la nappe profonde et non dans la nappe superficielle, phréatique en règle souillée. La maçonnerie du puits doit être imperméable et on ne doit pas se servir d'un seau ; au contraire, le puits doit être couvert et muni d'une pompe ; autour de la pompe le sol doit être cimenté et une rigole d'évacuation de l'eau doit être prévue. Un périmètre de protection sera établi autour du puits (pas de fumier, pas de déversement des eaux usées).

L'OMS recommande que tout puits doive être situé à une distance minimale de 15 m d'une fosse septique (BABA-MOUSSA, 1994). Cependant plusieurs études observent que cette distance n'est pas suffisante pour prévenir d'une contamination. Le dessus du puits foré devrait être fermé par un couvercle étanche à l'exception d'une ouverture prévue pour l'admission d'air. Cette petite ouverture devrait être protégée par une moustiquaire. Il est recommandé de vérifier l'intérieur et l'extérieur du puits tous les printemps, et aucune accumulation de débris, matériaux ou déchets ne devrait se trouver aux abords du puits. Concernant les puits abandonnés, ils doivent être scellés de façon permanente.

3.2. Désinfection d'un puits

La désinfection revêt une importance incontestable dans la salubrité d'un approvisionnement. La destruction des agents pathogènes microbiens est une opération capitale, qui fait très souvent appel à des réactifs chimiques tels que le chlore. La désinfection constitue une barrière efficace contre de nombreux agents pathogènes (en particulier des bactéries) lors du traitement de l'eau de boisson, et doit être pratiquée sur les eaux de surface et les eaux souterraines susceptibles de contamination fécale. On emploie des concentrations résiduelles de désinfectant comme mesure de sauvegarde partielle contre les contaminations de faible ampleur.

La désinfection chimique d'un approvisionnement en eau de boisson contaminée par des matières fécales réduit le risque global de maladie, mais ne suffit pas nécessairement à assainir totalement cet approvisionnement. Par exemple, la désinfection par le chlore de l'eau de boisson n'a qu'une efficacité limitée contre des agents pathogènes du type protozoaire, en particulier *Cryptosporidium*, et contre certains virus.

L'efficacité de la désinfection peut aussi être insuffisante à l'égard d'agents pathogènes présents à l'intérieur de floccs ou de particules, qui les protègent de l'action des désinfectants. Une forte turbidité peut aussi protéger les micro-organismes des effets de la désinfection, stimuler la croissance des bactéries et déclencher une forte demande en chlore.

Plusieurs moyens permettent de désinfecter l'eau avec du chlore. Les étapes de nettoyage et de désinfection d'un puits peuvent être procédées comme suit (QUÉBEC, 2002 c) :

- Nettoyer le puits, si possible, à l'aide d'une puisette afin d'enlever les corps étrangers, les dépôts, les matières animales ou végétales, etc.
- Verser dans le puits de l'eau de Javel selon les quantités mentionnées dans le tableau 25, intitulé « Quantité requise d'eau de Javel pour la désinfection d'un puits ». Il s'agit à peu près de quelques 1000 ml d'eau de Javel par mètre cube d'eau de puits ou 1 ml du produit/dm³ d'eau.
- Mélanger l'eau de Javel avec l'eau du puits et, si possible, laver et brosser la paroi intérieure.
- Ouvrir tous les robinets de la résidence. Lorsque l'odeur du chlore est perceptible aux robinets, arrêter la pompe du puits et fermer les robinets.
- Attendre 24 heures avant de faire circuler l'eau dans les tuyaux.
- Effectuer par la suite une purge prolongée en laissant couler l'eau d'un robinet jusqu'à ce que l'odeur du chlore disparaisse. Ouvrir ensuite tous les robinets pour rincer complètement la tuyauterie.
- Procéder à de nouvelles analyses de l'eau une semaine suivant la désinfection et quatre semaines plus tard, afin de savoir si l'eau répond aux normes de qualité.

Tableau 25 : Quantité requise d'eau de Javel pour la désinfection d'un puits (QUÉBEC, 2002b)

Profondeur d'eau dans le puits (en mètres)							
Diamètre du puits (millimètres)	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
Millilitres d'eau de Javel							
914	700 ml	1 000 ml	1 300 ml	1 600 ml	2 000 ml	2 300 ml	2 600 ml
1 067	900 ml	1 400 ml	1 800 ml	2 200 ml	2 700 ml	3 100 ml	3 600 ml
1 219	1 200 ml	1 800 ml	2 300 ml	2 900 ml	3 500 ml	4 000 ml	4 700 ml
1 372	1 500 ml	2 200 ml	3 000 ml	3 700 ml	4 400 ml	5 200 ml	5 900 ml
1 524	1 800 ml	2 700 ml	3 700 ml	4 600 ml	5 500 ml	6 400 ml	7 300 ml
1 676	2 200 ml	3 300 ml	4 400 ml	5 500 ml	6 600 ml	7 700 ml	8 800 ml

3.3. Quantités de désinfectants applicables à un puits de surface

Un puits de surface a le plus souvent un diamètre supérieur à 600 millimètres. Sa profondeur excède rarement neuf mètres. Les puits de la région étudiée (Martil/Tétouan) se trouvent dans cet intervalle de profondeur. AUBRY et GAÜZERE (2011) proposent le tableau 26 pour d'autres produits qui peuvent être utilisés comme désinfectants des puits. Il s'agit de l'hypochlorite de sodium, le tosylchloramide (Chloramine), le dichloroisocyanurate de sodium [DCCNa], l'ion argent et l'alcool iodé à 2%.

Tableau 26 : Agents chimiques et temps de contact pour rendre l'eau de boisson potable (AUBRY et GAÜZERE, 2011)

Agents chimiques	Dose	Temps de contact
<i>Hypochlorite de sodium</i>	3 gouttes/L	60 mn
<i>Tosylchloramide (Chloramine)</i>	12,2 mg/L	60 mn
<i>Dichloroisocyanurate de sodium [DCCNa]</i>	3,5 mg/L	30 mn
<i>Ion argent</i>	1 comprimé de 0,1 mg/L	120 mn
<i>Ion argent</i>	1 goutte/L	120 mn
<i>Alcool iodé à 2%</i>	5 gouttes/L	30 mn

Les communes urbaines de Martil et de Tétouan utilisent également des produits chimiques pour la chloration des eaux de puits de la région. Il s'agit d'une préparation à base d'*hypochlorite de calcium* à 70% en pastille de 20 g. Le principe actif agit par une réaction d'oxydation qui permet une destruction structurale de la cellule bactérienne. La Commune de Martil en utilise une quantité d'environ une centaine de kilogrammes par an (BMH, MARTIL, 2013)

4. Attributions des communes locales dans le domaine de la gestion et de la protection de l'eau au Maroc

La problématique de l'eau au Maroc est gérée par plusieurs parties et organismes spécialisés ou intéressés. Les communes urbaines (et rurales) disposent d'un important arsenal juridique leur conférant des attributions importantes dans le domaine de production, gestion et protection de l'eau, de l'assainissement et de la préservation de l'environnement. Ainsi, plusieurs articles de la Charte communale traitent les attributions des communes dans les domaines cités.

L'article 39 de la Charte communale (BULLETIN OFFICIEL, 2002) précise que le conseil communal décide de la création et de la gestion des services publics communaux, notamment dans les secteurs suivants :

- Approvisionnement et distribution d'eau potable ;
- Assainissement liquide ;
- Collecte, transport, mise en décharge publique et traitement des ordures ménagères et des déchets assimilés ;

Le paragraphe 4 de cet article stipule que le conseil communal décide, conformément à la législation et la réglementation en vigueur, de la réalisation ou de la participation à l'exécution :

- Des aménagements et des ouvrages hydrauliques destinés à la maîtrise des eaux pluviales et à la protection contre les inondations ;
- De l'aménagement des plages, des corniches, des lacs et des rives des fleuves situés dans le périmètre communal.

Quant à l'article 40 de la Charte, il est presque réservé entièrement à l'hygiène et à la salubrité de l'environnement. Le conseil communal veille, sous réserve des pouvoirs dévolus à son président par l'article 50 ci-dessous, à la préservation de l'hygiène, de la salubrité et de la protection de l'environnement. A cet effet, il délibère notamment sur la politique communale en matière de:

- Protection du littoral, des plages, des rives des fleuves, des forêts et des sites naturels ;
- Préservation de la qualité de l'eau, notamment de l'eau potable et des eaux de baignade ;
- Évacuation et traitement des eaux usées et pluviales ;
- Lutte contre les vecteurs des maladies transmissibles ;
- Lutte contre toutes les formes de pollution et de dégradation de l'environnement et de l'équilibre naturel. A ce titre, le conseil communal décide notamment de :
 - La création et l'organisation des bureaux communaux d'hygiène ;
 - L'adoption des règlements généraux communaux d'hygiène et de salubrité publique, conformément aux lois et règlements en vigueur.

Dans l'article 50, le président du conseil communal exerce les pouvoirs de police administrative, par voie d'arrêtés réglementaires et de mesures individuelles, portant autorisation, injonction ou interdiction, dans les domaines de l'hygiène, la salubrité et la tranquillité publiques et la sûreté des passages. Il exerce notamment les attributions suivantes :

- Il veille à l'hygiène et la salubrité des habitations et de la voirie, à l'assainissement des égouts, à l'élimination et la répression de l'entreposage des dépôts d'ordures en milieu habité ;
- Il participe à l'organisation et au contrôle de la qualité des aliments, boissons et condiments exposés à la vente ou livrés à la consommation ;
- Il veille à la salubrité des cours d'eau et de l'eau potable et assure la protection et le contrôle des points d'eau destinés à la consommation publique et des eaux de baignade.
- Il prend les dispositions nécessaires pour prévenir ou lutter contre les maladies endémiques ou dangereuses, conformément aux lois et règlements en vigueur ;

5. *Problématique de normes de potabilité*

L'eau est indispensable à la vie. Tous les hommes doivent disposer d'un approvisionnement satisfaisant en eau (suffisant, sûr et accessible), et tous les efforts doivent être consentis pour obtenir une eau de boisson aussi saine que possible. Les agents pathogènes d'origine fécale sont les principaux aspects pris en compte dans la fixation d'objectifs sanitaires destinés à garantir la salubrité microbienne. La qualité microbienne de l'eau varie souvent rapidement et dans de très larges proportions.

Les autorités nationales de santé publique ont souvent une responsabilité de premier plan dans la fixation de normes et de critères sur l'eau de boisson, qui peuvent inclure des objectifs en matière de qualité de l'eau, de performance et de salubrité, ainsi que des exigences directement spécifiées (traitement, par exemple). L'activité de normalisation ne porte pas uniquement sur la qualité de l'eau, mais couvre aussi la réglementation et l'autorisation de matériaux et de produits chimiques utilisés dans la production et la distribution de l'eau de boisson.

Selon l'OMS (2013 c), le meilleur moyen de mettre en œuvre les Directives de l'eau potable est un cadre de gestion préventive visant à assurer la salubrité de l'eau, qui s'applique du captage au consommateur. Les Directives fournissent une base scientifique permettant aux autorités nationales de développer des réglementations et des normes relatives à l'eau de boisson adaptées à la situation de chaque pays. Lorsque les ressources du pays sont très limitées, il ne serait pas préférable de mettre au point des normes très sévères concernant des substances d'importance relativement mineure pour la santé publique.

La nature et la forme des normes s'appliquant à l'eau de boisson peuvent varier d'un pays ou d'une Région à l'autre. Il n'existe pas d'approche unique, universellement applicable. Des démarches susceptibles de fonctionner dans un pays ou une Région ne sont pas nécessairement transposables à d'autres pays ou Régions. Selon l'OMS (2103 c), Il importe que chaque pays fasse le bilan de ses besoins et de ses capacités pour la mise au point d'un cadre réglementaire.

En analysant cette conception de fixation des normes de potabilité recommandée par l'OMS, des lacunes peuvent apparaître et des ambiguïtés pourront surgir concernant les bonnes interprétations et applications des normes. On peut se poser la question comment une substance donnée pour un seuil donné puisse porter atteinte à la santé d'un être humain dans un pays, et non dans un autre. Certes, lorsque les ressources du pays sont

très limitées, il convient de ne pas les dilapider inutilement par des normes sévères pour des substances d'importance mineure ; mais une application exagérée de cette démarche risquerait de porter atteinte au principe et fondement des normes de potabilité de l'eau.

Une tentative d'appliquer des seuils strictes risque de poser problème aux responsables pour le respect desdits seuils. A titre d'exemple, la directive européenne 98/83/CE a limité la teneur des trihalométhanes à 100 µg/L, le fait qui a posé un sérieux problème aux autorités sanitaires espagnoles pour le respect de cette valeur (GARCIA-VILLANOVA RUIZ, 2003)

Les normes (ou Valeurs Maximales Admises - VMA) de potabilité de l'eau pour quelques paramètres pour le Maroc, l'OMS et la France, sont répertoriées dans le tableau 27. On distingue des différences importantes entre les VMA de certains paramètres. A titre d'exemple, la norme des nitrites est de 0,5 mg/L au Maroc, alors qu'elle est seulement de 0,1 mg/L en France et l'UE et de 0,2 chez l'OMS. Les nitrites sont connus comme cause de méthémoglobinémie (syndrome du bébé bleu) chez les nourrissons âgés de moins de 3 mois (à court terme), et sont considérés comme possiblement cancérigènes pour l'être humain.

Quant à la conductivité électrique, sa VMA au Maroc est de 2700 µS/cm, alors qu'elle est seulement de 400 µS/cm comme niveau guide et de 1250 µS/cm comme valeur maximale admise en Union Européenne. Les VMA pour les sulfates et les chlorures sont respectivement de 400 et 750 mg/L au Maroc, tandis qu'elles sont limitées respectivement à 250 et 200 mg/L en France et en Union Européenne.

Ces différences substantielles ne peuvent en réalité rester sans impacts sur la santé à long terme chez l'homme et chez les animaux. Des études d'impact seront nécessaires pour éclaircir les différences de normes sur la santé et dégager une éventuelle relation de cause à effet.

Tableau 27 : Comparaison de VMA ou normes de quelques paramètres physicochimiques de l'eau potable pour le Maroc, la France et l'OMS. NORME MAROCAINE, (2006) ; MEDDE- FRANCE, (2012) et OMS, (2006)

Elément/ substance	Symbole/ formule	Valeurs marocaines (norme marocaine)	Lignes directrices fixées par l'OMS	VMA en France
pH		6,5<pH<8,5 Pour que la désinfection de l'eau par le chlore soit efficace, le pH doit être de préférence <8	Pas de valeur guide, mais un optimum entre 6,5 et 9,5	6,5<<9
Turbidité	NTU	5 (Turbidité médiane : 1 NTU et Turbidité de l'échantillon : 5NTU)	Non mentionnée	2 NTU
Conductivité	S/cm à 20°C	2700 µS		Entre 200 et 1100 µS à 25 °C
Oxygène dissous	Mg/L de O ₂	5 <O ₂ < 8	Pas de valeur guide	-
Dureté	mg/L CaC O ₃ ou en ° F	Inférieure à 35 °F (LAB ENV, 2010)	200 ppm	>15°F
Calcium	Ca	aucune	aucune	aucune
Magnésium	Mg	50		50
Sodium	Na	100 mg/L	Pas de valeur guide	150
Sulfate	SO ²⁻ ₄	400 mg/L	500 mg/L	250
Chlorures	Cl ⁻	750 mg/L	Pas de valeur, mais on peut noter un goût à partir de 250 mg/L	200
Nitrate	NO ₃	50 mg/L	50 et 3 mg/L (exposition à court terme)	50
Nitrites	NO ₂	0,5mg/L	0,2 mg/L (exposition à long terme)	0,5

Au Maroc, L'Office National de l'Eau Potable (ONEP) définit les normes de la qualité globale de l'eau selon cinq catégories en fonction des critères d'usage ou de vocation définis dans le tableau 28. Les paramètres choisis par l'ONEP sont la conductivité, le chlore, les nitrates, les matières oxydables et les coliformes fécaux.

Tableau 28 : Grille de classification des eaux souterraines selon les critères d'usage de l'ONEP (MORARECH, 2002)

Critères d'usage de l'ONEP Classification des eaux	Conductivité (μ S)	Cl (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	MO (mg/L)	CF (UFC/100 ml)
Eaux aptes à satisfaire les usages les plus exigeants	< 400	< 200	< 5	< 3	< 20
Eaux potables après traitement simple. Eaux de qualité pouvant néanmoins satisfaire tous les usages	< 1300	< 300	< 25	< 5	< 1000
Production d'eau potable par traitement poussée. Eaux de qualité suffisante pour l'irrigation et certaines industries	< 2700	< 750	< 50	< 8	< 10000
Eaux aptes à l'irrigation et au froidement	< 3000	< 1000	< 100	> 8	> 10000

D'autre part, La potabilité des eaux est classée d'après Scholler en quatre catégories, selon les niveaux de concentrations des ions sodium, chlorures et sulfates, et selon la dureté totale de l'eau. Les caractéristiques de chaque classe en plus de la classe « impotabilité » sont exprimées dans le tableau 29.

Tableau 29: Classification des eaux par rapport aux normes de potabilité d'après Schoeller (MORARECH, 2002)

Classe de potabilité absolue	Na (en mg/L)	Cl (en mg/L)	SO ₄ (en mg/L)	TH° F	r Ca + r Mg méq/L
1 - Potabilité permanente, eau bonne, sans saveur particulière	< 115	< 177,5	< 144	< 25	< 5
2 – Potabilité permanente, eau passable, à saveur faiblement perceptible.	< 230	< 335	< 288	< 50	< 10
3 - Potabilité permanente eau médiocre, à saveur peu perceptible.	< 460	< 710	< 288	< 100	< 20
4 - Potabilité permanente, eau mauvaise à saveur peu désagréable.	< 920	< 1420	< 576	< 200	< 40
5 - Potabilité permanente, eau mauvaise à saveur désagréable	< 1640	< 2840	< 2304	< 400	< 40
6 - Impotabilité	> 1640	> 2840	> 2304	> 400	> 80

V. CONCLUSION GÉNÉRALE ET RECOMMANDATIONS

Le développement urbain et infrastructurel de la Commune Urbaine de Martil, sans accompagnement par un assainissement liquide adéquat, s'est révélé néfaste sur la qualité de l'aquifère de la commune.

Les caractéristiques physicochimiques et microbiologiques ont révélé que l'eau de la nappe phréatique au niveau de la majorité des secteurs et puits prospectés présente une pollution accrue ; et des paramètres dépistés ne sont pas conformes aux normes exigées (CT, CF, SF, nitrates, nitrites, oxygène dissous). Les eaux souterraines de Martil subissent une pollution essentiellement organique suite au volume important des eaux usées urbaines et industrielles déversées en leur sein.

Les résultats des analyses montrent que l'eau prélevée au niveau du secteur Diza (secteur le plus anarchique, le plus pollué, le moins équipé et le moins réhabilité) est la plus contaminée par les germes indicateurs de la contamination fécale et par les nitrates et les nitrites, et cela probablement en raison de la quantité importante des eaux usées domestiques (émanant de plus de douze mille habitants du quartier) et au manque total de l'assainissement liquide dans ce secteur, ajoutée à la gestion médiocre des déchets ménagers.

Vu que l'eau souterraine est largement utilisée pour l'abreuvement du bétail et pour les différents besoins ménagers, y compris les ablutions, la cuisine et la boisson ; l'eau analysée de la nappe phréatique est impropre à la consommation humaine directe et constitue une menace pour l'environnement et la santé des consommateurs.

Généralement, les polluants accompagnants les eaux usées sont d'une très grande diversité. Pour les microorganismes biologiques, il s'agirait de virus, des bactéries, des protozoaires et d'helminthes, parmi les quels, des agents pathogènes pouvant engendrer de vraies et lourdes épidémies, comme il s'est passé dans quelques pays à travers le monde. Quant aux polluants chimiques ; ils englobent généralement une grande diversité de substances. Concernant la présente étude, en plus des nitrates et nitrites, les effluents pourraient contenir des produits dangereux, des substances toxiques et indésirables, des pesticides, produits phytopharmaceutiques et autres produits chimiques. L'impact de ces polluants et micropolluants sur la santé de l'homme et/ou des animaux dans la région et au niveau national reste à dépister par enquêtes et études spécialisées.

Les conséquences potentielles de la contamination microbienne et physicochimique des eaux sur la santé sont irréfutables et démontrées dans plusieurs études à travers le monde, et la problématique de la pollution des eaux souterraines pourra se poser avec acuité durant les années à venir. Ainsi, pour lutter contre la contamination microbienne et physicochimique provenant des eaux usées, de la pollution urbaine et industrielle généralisées et de l'agriculture dans la zone étudiée, des recommandations peuvent être apportées telles que :

Au niveau de l'équipement, de la gestion et de la réhabilitation:

- Equipement total de la commune de Martil par le réseau d'assainissement liquide et le service de la gestion des ordures ménagères, tout en achevant la réalisation de la station de traitement.
- Généraliser l'accès à l'eau potable dans tous les secteurs de la commune.
- Interdire les rejets des eaux usées domestiques et industrielles de façon anarchique à l'air libre et dans la rivière et dans le lac (bras mort) de la ville
- Utiliser avec modération les engrais dans les zones agricoles.
- Surveiller régulièrement la qualité des eaux souterraines par des prélèvements et analyses périodiques.
- Intégrer la dimension judiciaire dans la lutte contre la pollution et la prévention de celle-ci. Les procédés de suivis judiciaires contre les pollueurs pourront être une dimension efficace contre les pollueurs potentiels.
- Appliquer les études d'impact sur l'environnement pour les futurs projets de développement.
- Créer de nouvelles formes et procédures de lutte contre l'habitat informel (vu que les démarches classiques appliquées jusqu'à présent ont échoué)
- Renforcer le rôle et les moyens d'intervention des Agences des Bassins Hydrauliques et des communes dans la lutte contre la pollution des eaux souterraines et superficielles
- Elaborer une loi sur les puits pour organiser et gérer leurs creusage, exploitation, entretien, prévention des sources de pollution et éventuellement leur remblayage.
- Concernant concrètement le quartier Diza, il faut aménager le bras mort de l'oued Martil, actuellement dépotoir et déversoir sauvage pour ordures et eaux vannes. Il ne s'agit pas de le remblayer mais de la garder comme plan d'eau, après dragage, curage, traitement chimique et mécanique. L'opération peut constituer un autre

pôle d'animation et attirer l'investissement par l'installation de commerces et loisirs (FUM, 2006)

- Assurer une quantité et qualité suffisantes d'eau à l'oued Martil pour le convertir en un espace humide public (FUM, 2006)

Au niveau de la recherche :

- Encourager les approches multidisciplinaires de la protection des ressources hydriques et des eaux souterraines
- Assurer un suivi rigoureux au niveau des analyses de la qualité des eaux de la nappe.
- Créer des cycles de formations et des filières spécialisées dans le domaine de lutte, préservation des ressources en eaux et impact de leur dégradation sur l'environnement et la santé humaine et animale.
- Appuyer le rôle de la société civile dans le domaine de la protection de l'environnement.
- programmer des activités d'éducation à l'environnement sur le thème de l'eau, notamment dans les établissements scolaires.
- Mais en plus, et pour changer les pratiques et améliorer les comportements, les recommandations ne suffiront pas ; il faudra sans doute agir sur les déterminants culturels, sociaux, économiques et politiques de ces pratiques, et ce à moyen et long terme.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- ABHL (2013). Agence du bassin hydraulique du Loukkos / Tétouan. Service Climatologie. Rapport interne du 05/02/2013. Document non publié.
- ABHOE (2009). L'Agence du Bassin Hydraulique d'Oum Er-rbia. Etat de la qualité de l'eau dans la zone d'action de L'Agence pour l'année 2006/2007. Janvier 2009.
- ABREU A. N., DELGADO M. M., RIVAS A. O., DEL CASTILLO R. A., GONZALEZ E. A., et HERNANDEZ B. V. (2002). Presencia de *Giardia lamblia* y *Cryptosporidium spp.* en aguas residuales depuradas reutilizadas para riego agrícola en la isla de Tenerife, España. Efectos del transporte a larga distancia sobre la calidad del agua reutilizada. *Rev. Salud ambient.* 2000 ; 2(1): 2-7.
- ACES (2009). Association Canadienne des Eaux Souterraines. La contamination et la protection des eaux souterraines. Les eaux souterraines : Une ressource vitale cachée. Fiche de renseignements n° 3. En collaboration avec la commission géologique du Canada. http://www.cgwa.org/pdf/Fact3_fren.pdf. Consulté le 23/08/2013
- AGHZAR N., BERDAI H., BELLOUTI A. et SOUDI B. (2002). Pollution nitrique des eaux souterraines au Tadla (Maroc). *Rev. Sci. Eau*; 15(2) : 459-462.
- AGOUSSINE M., BOUCHAOU L. (2004). Les problèmes majeurs de la gestion de l'eau au Maroc. Étude de cas. *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 15(2) : 187-94.
- ANCELLE T., COLIN P., DELMAS M-C., DESENCLOS J-C, UFOUR B., JOUGLA E., LE STRAT Y., POUILLOT R., VAILLANT V., DE VALK H. et WEINBRECK P. (2003). Morbidité et mortalité dues aux maladies infectieuses d'origine alimentaire en France. Institut de veille sanitaire - Hafssa. France. http://www.invs.sante.fr/publications/2004/inf_origine_alimentaire/inf_origine_alimentaire.pdf. Consulté le 26/06/2013.
- ARUMI J. L., NUÑEZ J., SALGADO L. et CLARET M. (2006). Evaluación del riesgo de contaminación con nitrato de pozos de suministro de agua potable rural en Chile. *Rev Panam Salud Publica* ; 20(6) : 385–92
- ASTM-TMSA. (2010). Agence spéciale Tanger méditerranée. TMSA, maître d'ouvrage. Projet Offshore Tétouan. Etude d'impact sur l'environnement (Etude). Tétouan . Maroc. 58 p.
- AUBRY P. et BERNARD-ALEX GAÜZERE B-L., (2012). Médecine tropicale. Les maladies liées à l'eau. www.medecinotropicale.free.fr/cours. Consulté le 25/06 /2013.
- AUT (2011). AGENCE URBAINE DE TÉTOUAN. Projet de réhabilitation et d'Aménagement de l'Oued Martil. Premier ministre. Ministère de l'habitat, de

l'urbanisme et de l'aménagement de l'espace. (<http://www.medcities.org/docs/ATOUED-Agence%20Urbaine.pdf>); Consulté le 24/06/2013.

- BABA-MOUSSA A. (1994). Étude de la pollution bactériologique de la nappe phréatique à partir d'une latrine en Afrique subtropicale. Thèse n° 1276, pour l'obtention du grade de docteur en sciences techniques. 251 p. École polytechnique fédérale de Lausanne. France
- BAHIR M., MENNANI A., JALAL M. et FAKIR Y. (2002). Impact de la sécheresse sur les potentialités hydriques de la nappe alimentant en eau potable la ville d'Essaouira (Mogador, Maroc). Notes méthodologiques. *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 13(1) : 13-19.
- BELGHITI M. L., CHAHLAOUI A. et BENGOUMI D. (2013). Caractéristiques physico-chimiques des eaux de certains puits utilisés comme source d'eau potable en milieu rural dans la région de Meknès (Maroc). *Sciencelib éditions mersenne* : volume 5, n ° 130115. Issn 2111-4706.in www.sciencelib.fr/img/pdf/article_belghiti_et_al_.pdf (Consulté le 21/02/2013)
- BEN HAMOUDA M-F., LEDUC C., TARHOUNI J. et ZOUARI K. (2009). Origine de la minéralisation dans l'aquifère plio-quadernaire de la côte orientale du cap Bon (Tunisie). Eau et zones arides, Article de recherche. *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 20(1) : 78-863. DOI : 10.1684/sec.2009.0161.
- BENAJIBA M. H., SAOUD Y., LAMRIBAH A., AHRIKAT M., AMAJOUJ N. et OULED-ZIAN O. (2013). Evaluation de la qualité microbienne des eaux de la nappe phréatique de Martil au Maroc. *Rev. Sci. Eau* ; 26(3) : 223-233. ISSN : 1718-8598
- BLANCER G. (1978). Abrégé de Médecine préventive et d'hygiène. Masson Paris, New York, Barcelone, Milan. 2^{ème} édition revue et Corrigée.
- BMH, MARTIL (2011). Municipalité de Martil. Bureau municipal d'hygiène (BMH). Service vétérinaire et environnemental. Document non publié.
- BMH, MARTIL (2012). Municipalité de Martil. Bureau municipal d'hygiène (BMH). Service vétérinaire et environnemental. Document non publié.
- BMH, MARTIL (2013). Municipalité de Martil. Bureau municipal d'hygiène. Produits et matériel du BMH faisant objet de marché de l'année 2013. Documents non publiés.
- BOUKERCHE S, AOUACHERI W. et SAKA S. (2007). Les effets toxiques des nitrates : étude biologique chez l'homme et chez l'animal. *Annales de Biologie Clinique* ; 65(4) : 385-91. doi: 10.1684/abc.2007.0136
- BRICHA S., OUNINE K., OULKHEIR S., EL HALOUI N. et ATTARASSI B. (2007). Etude de la qualité physicochimique et bactériologique de la nappe phréatique M'nasra (Maroc). *Afrique SCIENCE* ; 3(3) : 391 – 404. ISSN 1813-548X

- BUDZINSKI H. et TOGOLA A. (2006) Présence des résidus de médicaments dans les différents compartiments du milieu aquatique. *Environnement, Risques & Santé* ; 5(4) : 248-53.
- BULLETTIN OFFICIEL (2002). Bulletin officiel du Royaume du Maroc, n° 5058 du 16 ramadan 1423 (21 novembre 2002) ; Dahir n° 1-02-297 du 25 rejev 1423 (3 octobre 2002) portant promulgation de la loi n° 78-00 portant charte communale
- CACHOT J., DEGREMONT C., ANDRE V., CAILLEAUD K., ABARNOU A., MOTELAY-MASSEI A. et al. (GROUPOEMENT D'INTERET PUBLIC). (2009). La Génotoxicité. Quel risque pour les espèces aquatiques ? Editions : AAZ Consultant. 38 p. http://seine.aval.crihan.fr/web/attached_file/componentId/kmelia106/attachmentId/20456/lang/ Consulté le 04/09/2013
- CDC (2013a). Centers for Disease Control and Prevention (USA). Hepatitis A. <http://www.cdc.gov/hepatitis/A/aFAQ.htm>. Consulté le 01/08/2013
- CDC (2013b). Centers for Disease Control and Prevention (USA). *Giardia*: Epidemiology and Risk Factors. <http://www.cdc.gov/parasites/giardia/epi.html>. Consulté le 01/08/2013
- CFPTEP (2012). Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable. Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Documentation à l'appui. La turbidité. Santé Canada. Ottawa (Ontario) Octobre 2003. http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/pdf/consult/_2011/turbidit/draft-ebauche-fra.pdf
- CHIPPAUX J-P., PERNOT C., JOUANNEAU D., CIORNEI G., MOULIN-ESNART P. et COURET D. (2007). Evaluation de la potabilité de l'eau dans une zone peuplée du sahel sénégalais : Niakhar. Article original. *Environnement, Risques & Santé* ; 6(5) : 373-81.
- CISSÉ I., TANDIA A. A., FALL S. F. et DIOP E. S. (2003). Usage incontrôlé des pesticides en agriculture périurbaine : cas de la zone des Niayes au Sénégal. Note de recherche. *Cahiers Agricultures* ; 12(3) : 181-6, .
- CND - HCP (2013). Centre National de Documentation. Haut Commissariat au Plan. Royaume du Maroc. Bassins hydrauliques du Maroc. <http://www.abhatoo.net.ma/maalama-textuelle/developpement-durable/environnement/eau-douce/ecosysteme-d-eau-douce/bassins-d-alimentation/les-bassinshydrauliques-du-maroc>. Consulté le 20/08/2013
- CNRC (1977). Conseil national de recherche du Canada. Les effets des halogénures alcalins dans l'environnement canadien. CNRC N° 150 19, Comité associé des critères scientifiques concernant l'état de l'environnement, Ottawa (1977). <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/chloridechlorure/index-fra.php> (Consulté le 25/05/2013)

- COGITERRA (2012). Actu-environnement. Les micropolluants de l'eau | 2 avril 2012 | Chapitre 2 / 7 http://www.actu-environnement.com/ae/dossiers/micropolluants-eau/micropolluants_eau.php4. (Consulté le 17/01/2013)
- CRAUN, G.F., BERGER P.S. et CALDERON R.L. (1997). Coliform bacteria and water borne disease outbreaks. *Journal of the American Water Works Association*; 89(3): 96-104.
- DAVEZAC H., GRANDGUILLOT G., ROBIN A., et SAOUT C. (2008). L'eau potable en France 2005-2006. Ministère de la Santé, de la Jeunesse, des Sports et de la Vie associative, Paris. http://www.sante.gouv.fr/IMG/pdf/bilanqualite_05_06.pdf. Consulté le 16/07/2013.
- DE ANDRADE LIMA J. R. P., MICHEL P., BRIGAS-POULIN P., RAVEL A. (2000). Développement d'indices agro-écologiques pour évaluer la pression hygiénique de la production animale dans les régions rurales du Québec. Université de Montréal. 85 p.
- DEGBEY C., MAKOUTODE M., AGUEH V., DRAMAIX M. et DE BROUWER C. (2011). Facteurs associés à la qualité de l'eau de puits et prévalence des maladies hydriques dans la commune d'Abomey Calavi (Bénin). Etudes originales. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Santé* ; 21(1), 47-55.
- DEGBEY C., MAKOUTODE M., OUENDO E-M., FAYOMI B. et DE BROUWER C. (2008). Qualité de l'eau de puits dans la commune d'Abomey-Calavi au Bénin. *Environnement Risque Santé* ; 7(4) : 279-83. doi : 10.1684/ers.2008.0158
- DERRADJI F., BOUSNOUBRA H., KHERICI N., ROMEO M. et CARUBA R. (2007). Impact de la pollution organique sur la qualité des eaux superficielles dans le nord-est algérien. *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 18 : 23-37. doi : 10.1684/sec.2007.0065.
- DERWICH E., BENAABIDATE L., ZIAN A., SADKI O., et BELGHITY D. (2010). Caractérisation physicochimique des eaux de la nappe alluviale du haut Sebou en aval de sa confluence avec oued Fès. *Larhyss journal* ; 8 : 101-112.
- DIENG Y., TANDIA A., WANE A.T., GAYE O., DIOP E. S. et DIALLO S. (1999). Les parasitoses intestinales chez les habitants d'une zone péri-urbaine à nappe phréatique polluée par les nitrates d'origine fécale (Yeumbeul, Sénégal). *Cahiers santé* ; 9: 351-356.
- DJELLOULI H.M., TALEB S., HARRACHE-CHETTOUH D. et DJAROUD S. (2005). Qualité physicochimique des eaux de boisson du Sud algérien : étude de l'excès en sels minéraux. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Santé* ; 15(2) : 109-12.
- DOS SANTOS S. (2012). L'accès à l'eau en Afrique subsaharienne : La mesure est-elle cohérente avec le risque sanitaire ? *Environnement Risque Santé*; 11 : 282-6. doi : 10.1684/ers.2012.0545.

- DRAOUI M. (2007). Cartographie de vulnérabilité à la contamination de l'aquifère côtier de Martil-Alila et contribution à l'élaboration de cartes de risque. Thèse de Doctorat. Faculté des sciences Tétouan, Maroc. 231 p.
- EL ASSLOUJ J., K., KHOLTEI S., EI AMRANI-PAAZA N. et HILALI A. (2007). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines de la communauté Mzamza (Chaouia, Maroc). *Rev. Sci. Eau* ; 20(3) : 309-321.
- EL BARDAI R. (2002): Contribution méthodologique à la gestion intégrée de l'eau dans l'oued Martil. Mémoire pour l'obtention de diplôme des études supérieures approfondies. Université Abdelmalek Essaâdi. Tétouan.
- EL GHARBAOUI A. (1981). La terre et l'homme dans la péninsule tingitane: étude sur l'homme et le milieu naturel dans le Rif occidental. Travaux de l'Institut scientifique, série Géologie et Géographie physique, Rabat, n°15, 439 p.
- EL MORABITI K. (1991) : Contribution à la connaissance hydrogéologique de l'aquifère de Martil-Alila (Tétouan-Maroc). Thèse 3° cycle, Université de Tétouan (Maroc), 230 p.
- ESREY S., GOUGH J., RAPAPORT D., SAWYER R., SIMPSON-HEBERT M., VARGAS J. et WINBLAD U. (1998). Assainissement écologique. Département des Ressources Naturelles et de l'Environnement. Stockholm, Suède. In http://www.ecosanres.org/pdf_files/Assainissement_Ecologique.pdf (Consulté le 20/06/2013)
- FEKKOUL A., ZARHLOULE Y., BOUGHRIBA M., KABBABI A., MACHMACHI I., et CHAFI A. (2011). Contamination par les pesticides organochlorés et les nitrates des eaux souterraines du système aquifère de la plaine des Triffa (Maroc nord oriental). *Sciencelib* éditions mersenne : volume 3, n ° 110801 Issn 2111-4706 (http://sciencelib.fr/IMG/pdf/article_fekkoul.pdf. Consulté le 19/03/2013)
- FESTY B., HARTEMANN P., LEDRANS M., LEVALLOIS P., PAYMENT P., et TRICARD D. (2003). Qualité de l'eau. In : Environnement et santé publique – Fondements et pratiques, pp.333-368. Gérin M, Gosselin P, Cordier S, Viau C, Quénel P, Dewailly É, rédacteurs. Edisem / Tec & Doc, Acton Vale / Paris <http://www.dsest.umontreal.ca/documents/19Chap13.pdf> (Consulté le 15/04/2013)
- FREDERIC Y. B., (2005). Mot à mot. Danger et risque. *Environnement, Risques & Santé* ; 4(5) : 416
- FUM (2006). FORUM URBAIN MAROC. Plan de développement communal de la Commune urbaine de Martil. Commune Martil, Maroc, 30 p.
- GARCIA-VILLANOVA RUIZ R. J. (2003). Nuevo siglo, nuevos riesgos sanitarios y ambientales en el agua. *Rev. Salud Ambient* ; 3(2): 77-85.
- GIVORD L. et DORIOZ J-M.(2010). La survie des microorganismes d'origine fécale dans les effluents et les sols. Eléments de cadrage bibliographique. <http://agro->

transfertbretagne.univ_rennes1.fr/Territ_Eau/Images_et_sons/Rapport%20_BF_V4_2010.pdf. Consulté le 09/07/2013.

- GOLDGEWICHT C. (2005). Exposition chronique à l'arsenic et effets indésirables sur la grossesse au Bangladesh. *Environnement, Risques & Santé* ; 4(5) : 319
- GOLDGEWICHT C. (2006). Exposition à l'arsenic via l'eau de boisson et risque de lésions cutanées précancéreuses au Bangladesh : résultats de la Health Effects of Arsenic Longitudinal Stu. *Environnement, Risques & Santé* ; 5(6) : 446 - 47.
- GONZALEZ ALONSO S., ESTEBAN-HERNANDEZ J., VALCARCEL RIVERA Y., HERNANDEZ-BARRERA V. et GIL DE MIGUEL A. (2010). Contaminación del agua en fuentes cercanas a campos petrolíferos de Bolivia. *Rev Panam Salud Publica* ; 28(4) : 235–43.
- GSE (2002). Groupe scientifique sur l'eau. Entérocoques et streptocoques fécaux. Fiches synthèses sur l'eau potable et la santé humaine, Institut national de santé publique du Québec. <http://inspq.qc.ca/pdf/publications/198CartableEau/Enterocoques.pdf> (consultation le 03/01/2012).
- GSE (2003). Groupe scientifique sur l'eau. Fiche Coliformes totaux. Institut national de santé publique du Québec. Mai 2003. <http://www.inspq.qc.ca/pdf/publications/198-CartableEau/ColiformesTotaux.pdf>. Consulté le 25/06/2013
- GUERGAZI S. et ACHOUR S. (2005). Caractéristiques physicochimiques des eaux d'alimentation de la ville de Biskra. Pratique de la chloration. / *Larhyss Journal* ; n°04, pp.119-127. ISSN 1112-3680,
- HALAWANI J., OUDDANE B., BAROUDI M. et WARTEL M. (1999). Contamination par les nitrates des eaux souterraines de la plaine d'Akkar au Liban Nord. Étude originale. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Santé* ; 9(4) : 219-23.
- HARISSON T.R., WINTROBE M.M., THORN G.W., ADAMS R.D., BENNETT I.L., BRAUNWALD E., ISSELBACHER K.J. et PETERSDORF R.G. (1978). Medicina interna. Prensa medica mexicana. Tomo I. (Reimpresión 1978). 1215 p.
- HAZEL A. B. et NORMAN R. P. (2005). Persistent coliform contamination in lechuguilla cave pools. *Journal of Cave and Karst Studies*; April 2005 : 55-57
- HILALI M., LARABI A. et AHARMOUCH A. (2003). Modélisation de l'intrusion marine dans l'aquifère de Martil (cote méditerranéenne, Maroc). Tecnología de la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros: Países mediterráneos. *IGME*. Madrid. ISBN. 84, 7840-470-8
- HMID K., M. KHALLAF, M., EL OUARDI A., EL HABIB F., ZOUTNI B., AMEUR N., BENABDERRAZAK F., MOUHCINE M., FAGRAOUI L. et CHLIHA K. (1997) : Manuel de microbiologie alimentaire. Ministère de la santé publique, Royaume du Maroc, 40 p.

- IDRISSI ALAMI I., ZERAOULI M., ADDOU M., MOKHTARI M. et SOULAYMANI A. (2007). Évaluation de la pollution nitrique de la nappe phréatique de la zone côtière du Gharb (M'nasra) au Maroc entre 1993 et 2003. *Afrique SCIENCE* 3(3) : 378 – 390.
- IME (2008). Institut méditerranéen de l'eau. Benblidia M. et Margat J. Problèmes de l'eau en Méditerranée. [http://www.ime-eau.org/images/publicationsweb/ArticleIME .pdf](http://www.ime-eau.org/images/publicationsweb/ArticleIME.pdf). Consulté le 12/08/2013.
- INSP- CANADA, (2004). Étude sur la qualité de l'eau potable dans sept bassins versants en surplus de fumier et impacts potentiels sur la santé. Étude du risque de gastro-entérite chez les familles utilisant l'eau d'un puits domestique. Direction risques biologiques, environnementaux et occupationnels. Institut national de santé publique du Québec et Unité de Recherche en Santé Publique Centre de recherche du CHUL (CHUQ, Canada). 165 p
- KABIRI L., BOUHLASSA S. et ALEHCHEIKH C. (2008). Origine de la minéralisation et de la détérioration de la qualité des eaux souterraines de la nappe phréatique du Quaternaire du bassin-versant de Rheris (Errachidia, Maroc). *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 19(1) : 67-75. DOI : 10.1684/sec. 2008.0116.
- KHABALI H., TARGUISTI K., EZZOUAK F. et VALENZUELA MONTES L. M. (2011). Diagnostic environnemental et urbanistique de la ville de Martil entre 1966 et 2003. Federación andaluza de ciencias ambientalís (FACCAA). Editorial Universidad de Granada. *Ambientalia. Revista interdisciplinar de las ciencias ambientalís* ; 114-127.
- LAB ENV (2010). Laboratoire de l'Environnement de la Commune Urbaine de Tétouan. Fiches internes. Documents non publiés.
- LAMRIBAH A. (2004). Etats sanitaire et environnemental à la Commune Urbaine de Martil. Quelles relations ? (en arabe). Editions Al Khaliij Al Arabi, Tétouan Maroc. 104 p.
- LENNTECH (2013). Water Treatment Solutions. <http://www.lenntech.fr/francais/faq-effet-polluants-sante.htm#ixzz2Z6Lt3xRP>. Consulté le 15/07/2013.
- LÉVI Y. (2006). Inquiétudes sur la présence d'antibiotiques et de bactéries antibiorésistantes dans les eaux (Communication). *Environnement, Risques & Santé* ; 5(4) : 261-265.
- LEWIS W.J., FOSTER S.S.D. et DRASAR B.S. (1988). Análisis de contaminación de las agua subterráneas por sistemas de saneamiento básico. Textos completos /Fulltext. <http://www.bvsde.paho.org/eswww/fulltext/repind46/analisis/analisis.html>. Consulté le 03/04/2013
- MAJDOUB R., CÔTÉ C., LABIDI M., GUAY K., et GÉNÉREUX M. (2003). Impact de l'utilisation des engrais de ferme sur la qualité Microbiologique de l'eau souterraine. Institut de Recherche et de Développement en Agroenviron-

nement. Avec la participation financière de: Agriculture, pêcheries et Alimentation. (IRDA).Québec.

- MARCHAND M. (1989). La contamination des eaux continentales par les micropolluants organiques. *Rev. Scie. Eau* ; 2(2) : 229-264.
- MARTIN A. C., JORDAN J. J. C., ARTIGAS M. P. F., RUIZ B. J-V., RUIZ J. A. H., SORINAS J. L., VARGAS-MACHUGA R. N., et MUÑOZ J. P. (1994). Reutilización Aguas Residuales. Criterios para la evaluación sanitaria de proyectos de reutilización directa de aguas residuales urbanas depuradas. Junta de Andalucía, Consejería de Salud, Fundación Empresa-Universidad de Granada, España, 256 p.
- MATILLA V., PUMAROLA A., BRAVO OLIVA J., GOMES LUZ R., DEL REY CALERO J., RODRIGUEZ TORRES A. GARCIA RODRIGUEZ A. PIEDROLA ANGULO G. et MIRA GUTIERREZ J. (1980). Microbiología y parasitología. Ediciones, Publicaciones San Juan Bosco 3. Madrid. España. 606 p.
- MEDDE – FRANCE (2012). Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie. Direction Générale de la Prévention des Risques. Arrêté du 11/01/07 relatif aux limites et références de qualité des eaux brutes et des eaux destinées à la consommation humaine mentionnées aux articles R. 1321-2, R. 1321-3, R. 1321-7 et R. 1321-38 du code de la santé publique. http://www.ineris.fr/aida/consultation_document/4837. Consulté le 15/08/2013
- MEDDE – FRANCE (2013). Ministère de l'Ecologie, du Développement durable et de l'Energie (MEDDE, France, 2013) <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Que-fait-on-avant-de-rejeter-l-eau.html>. Consulté le 23/07/2013.
- MEHDAOUI O., VENANT A. et FEKHAOUI M. (2000). Contamination par les pesticides organochlorés et les nitrates de la lagune de Moulay Bouselham, Maroc. *Cahiers d'études et de recherches francophones / Santé*; 10(6) : 381-8.
- MELLOUL A., BOUGHRIBA M. et BOUFAIDA M. (2009). Étude de la contamination des ressources en eaux souterraines et cartographie de la vulnérabilité d'un aquifère soumis au climat semi-aride méditerranéen : cas de la plaine côtière de Saïdia, Maroc. *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 20(2) : 223-31. DOI : 10.1684/sec.2009.0183.
- MORARECH M. (2002) : Etat de l'environnement de la ville de Tétouan : Sources de pollutions, Impact sur le milieu récepteur et traitement des eaux résiduaires. Thèse de Doctorat. Faculté des sciences de Rabat. 194 p.
- MORLON P., TROUCHE G., SOULARD C., MEGROT J-M. et GUYARD P.O. (1998). Diagnostic de la pollution azotée de l'eau par approche historique multi-échelles. Une étude de cas dans le département de l'Yonne (France). Étude originale. *Cahiers Agricultures* ; 7(1) :15-27
- MOUKOLO N. et GAYE C. B. (2001). Problèmes de contamination des nappes phréatiques par les rejets domestiques dans les métropoles d'Afrique Noire.

Cas de la nappe de Brazzaville au Congo. *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 12(3) : 175-182.

- MOUNI L., MERABET D., ARKOUB H. et MOUSSACEB K. (2009). Etude et caractérisation physicochimique des eaux de l'oued Soummam (Algérie). *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 20(4) : 360-6. DOI : 10.1684/sec.2009.0209.
- MOUTOU F. et JOSEPH-ENRIQUEZ B. (1991). Les animaux sauvages, sentinelles de la pollution du milieu naturel ? *Rev. sci. tech. Off. int. Epiz.* 10(3), 681-692.
- MS MAROC (2012). MINISTERE DE LA SANTE. Royaume du Maroc. Santé en chiffres 2011. <http://srvweb.sante.gov.ma/Publications/Documents/publications/SANTE%20EN%20CHIFFRES%202011%20Edition%202012.pdf>. Consulté le 28/06/2013.
- MSS-FRANCE (2004). Eau et santé. L'eau potable en France 2002- 2004. Guide technique. Ministère de la santé et des Solidarités. République française. 2004. www.sante.gouv.fr/IMG/pdf/bilanqualite_02_04.pdf. Consultation le 06/12/2012
- MSS-FRANCE (2005). La qualité de l'eau potable en France. Aspects sanitaires et réglementaires. Ministère de la Santé et des Solidarités, France. Direction générale de la santé. Dossier d'information. http://www.sante.gouv.fr/IMG/pdf/dossier_presse-3.pdf
- NABIL L. (2006). Le Rif nord-ouest et les politiques de l'état en matière d'aménagement du territoire. Thèse de doctorat d'état en sciences géographiques, Spécialité : aménagement du territoire. Faculté des lettres et des sciences humaines. Département de géographie. Université Abdelmalek Essaâdi, Tétouan. Maroc.
- NABIL L. (2008). Qualité des eaux de puits à Tétouan. Cas de l'agglomération urbaine et périurbaine de Martil (Nord- Oust du Maroc) en situation hivernale. *Revue Association Forum du Nord du Maroc* ; n° double 2 et 3 : 15-28.
- NABIL L. (2009) Pollution de la nappe phréatique de la plaine périurbaine de Martil (N-O du Maroc) et son impact sur l'environnement. *Revue Association Forum du Nord du Maroc* ; n° double 4 et 5 : 12-44.
- NEJJARI A. (2007). Situation de l'assainissement liquide dans la zone de Cabo Negro Martil. Thèse de licence. Université Abdelmalek Essaâdi. Tétouan, Maroc. 146 p.
- NEPE. (1975). Normes européennes de potabilité des eaux CEE (1975). <http://www.hydrologie.org/MISC/gest/norpotab.htm>. (Consulté le 10/06/2013)
- NOLA M., NJINE T., MONKIDJE A., SIKATI FOKO V., DJUIKOM E. et TAILLIEZ R.(1998). Qualité bactériologique des eaux des sources et des puits de Yaoundé (Cameroun). *Cahiers de santé* ; 8(5) : 330-336
- NOLA M., NJINE T., KEMKA N., TOGOUET S.H.Z., SERVAIS P., MESSOULI M., BOUTIN C., MONKIEDJE A. et MENBOHAN S.F. (2006). Transfert des

bactéries fécales vers une nappe phréatique à travers une colonne de sol en Région équatoriale : Influence de la charge en eau appliquée en surface. *Rev. Sci. Eau* ; 19(2) :101-112.

- NORME MAROCAINE (2006). Qualité des eaux d'alimentation humaine. Norme Marocaine NM 03.7.001, homologuée par arrêté conjoint du Ministre de l'Équipement et du Transport du Ministre de la Santé, du Ministre de l'Aménagement du territoire, de l'Eau et de l'Environnement et du Ministre de l'Industrie, du Commerce et des Télécommunications. Homologation au bulletin officiel n°5404 du 16/03/2006.
- OCDE (2008). Organisation de Coopération et de Développement Économiques. Synthèses. Santé environnement. Avril 2008 (<http://www.oecd.org/fr/sante/systemes-sante/40468101.pdf>. Consulté le 19/04/2013)
- OFEFP (2004). KOZEL R., DANIEL HARTMANN D., MARCUARD C.M., MATOUSEK F., MEYLAN B. et MICHEL P. L'environnement pratique. Instructions pratiques pour la protection des eaux souterraines. Office Fédéral de l'Environnement, des Forêts et du Paysage (OFEFP). Berne. Suisse. 143 p.
- OIE (1989). Office International des Épizooties, ACHA P. N. et SZYFRES, B : Zoonoses et maladies transmissibles communes à l'homme et aux animaux, Office International des Épizooties, Paris. France ; 2^{ème} éd., 1063 p.
- OMS (1979). Les virus humains dans l'eau, les eaux usées et le sol. OMS, série rapports techniques, 639 – Genève 1979. Rapport d'un groupe scientifique de l'OMS (http://whqlibdoc.who.int/trs/WHO_TRS_639_fre.pdf). Consulté le 15/05 /2013
- OMS (1989). L'utilisation des eaux usées en agriculture et aquaculture : recommandations à visées sanitaires. Rapport d'un groupe scientifique de l'OMS. OMS, série de rapports techniques. Genève 1989.
- OMS (2004). Directives de qualité pour l'eau de boisson. Troisième édition. Volume 1.Recommandations.Genève(2004).http://who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3_prel_1a5.pdf (consultation le 03/01/2012)
- OMS (2006). Normes de l'OMS sur l'eau potable. <http://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm> (Consulté le 10/06/2013)
- OMS (2013a). Maladies liées à l'eau. Diarrhée. In http://www.who.int/water_sanitation_health/diseases/diarrhoea/fr/index.html. Consulté le 25/06/2013
- OMS, (2013b). Santé de l'eau. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3fr_4.pdf. Consulté le 23/07/2013
- OMS, (2013c). Directives pour la qualité de l'eau de boisson. http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/gdwq3rev/fr/index.html
- ONTARIO (2012). Ministère de l'Agriculture et de l'Alimentation. Comprendre les eaux souterraines. <http://www.omafr.gov.on.ca/french/environment/facts/06-112.htm#1>. Consulté le 12/08/2013

- OUALAD MANSOUR N., TARGUISTI K. et STITOU J. (2009). Evaluation de la qualité des eaux dans les systèmes fluviaux du Rif (cas de la rivière Martil) et étude de la biodiversité des communautés de macroinvertébrés. Segundo congreso internacional sobre geología y minería en la ordenación del territorio y en el desarrollo. Utrillas-2009, P.08 PP 95-114. www.sedpgym.es/descargas/libros_actas/UTRILLAS_2009/08.UTRILLAS.pdf (Consulté le 04/03/2013)
- ORTH G. et SANSONETTI P. (2006). La maîtrise des maladies infectieuses : un défi de santé publique, une ambition médicocientifique. Rapport sur la science et la technologie N° 24. Institut de France. Académie des sciences. EDP Sciences. Les Ulis Cedex A. France. 440 p.
- PARLEMENT EUROPÉEN, (2000). Directive 2000/60/CE du Parlement Européen du 23 octobre 2000 (annexe VIII), établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau.
- PAYMENT P. et HARTEMANN P. (1998). Les contaminants de l'eau et leurs effets sur la santé. *Rev. Sci. Eau* ; n° spécial : 199-210.
- PEDROMO C. H., CASANOVA O. N., et CIGANDA V. S. (2001). Contaminación de aguas subterráneas con nitratos y coliformes en el litoral sudoeste del Uruguay. *Agrociencia* ; 5(1) : 10-22.
- QUÉBEC (2002). Développement durable, Environnement, Faunes et Parcs. Le puits. Démystifier l'eau souterraine www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/souterraines/puits/demystifier.htm. Consulté le 20/07/2013.
- QUÉBEC (2002b). Développement durable, Environnement, Faunes et Parcs. La qualité de l'eau de mon puits. <http://www.mddefp.gouv.qc.ca/eau/potable/depliant/index.htm>. Consulté le 20/07/2013
- QUÉBEC (2002c). Développement durable, Environnement, Faunes et Parcs. La qualité de l'eau de mon puits.. Gouvernement du Québec 2002. <http://www.mddep.gouv.qc.ca/eau/potable/depliant/>. Consulté le 20/07/2013.
- REASONER D. J. (1998). Agentes patógenos en el agua potable. Estado actual y perspectiva. División de Control de Contaminantes Microbiológicos. Curso de certificación de microbiología. WSWRD, NRMRL. Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. <http://www.bvsde.paho.org/bvsala/e/fulltext/agentes/agentes.pdf> (Consulté le 15/04/2013).
- RKIOUAK S., PULIDO-BOSCH A. et GAIZ A. (1997). Potentialités hydrogéologiques d'une plaine littorale marocaine (Oued Laou, Tétouan- Chefchaouen). *Journal des Sciences Hydrologiques* ; 42(1) : 101-117.
- RODIER J., LEGUBE B., MERLET N., BRUNET R. (1984). Analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires, eaux de mer, 7e. Edition Bordas.
- ROUABHIA A., BAALI F., KHERICI N. et DJABRI L. (2004). Vulnérabilité et risque de pollution des eaux souterraines de la nappe des sables miocènes de la

plaine d'El Ma El Abiod (Algérie). *Science et changement planétaires/ Sécheresse* ; 15(4) : 347-52.

- ROUABHIA A, BAALI F., HANI A. et DJABRI L. (2009). Impact des activités anthropiques sur la qualité des eaux souterraines d'un aquifère en zone semi-aride. *Science et changement planétaires/ Sécheresse* ; 20(3) : 279-85. DOI : 10.1684/sec.2009.0199.
- SALINES G. (2010). De quelques malentendus en santé environnement. *Environnement, Risques & Santé* ; 9(2) : 99-101
- SANCHEZ-PEREZ H. J., VARGAS-MORALES M. G. et MENDEZ-SANCHEZ J. D. (2000). Calidad bacteriológica del agua para consumo humano en zonas de alta marginación de Chiapas. *Salud pública de México* ; 42(5) : 397-406.
- SANTE CANADA (1978). Matières dissoutes totales. Canada Santé. Santé environnement. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/tds-mdt/index-fra.php> (Consulté le 23/05/2013)
- SANTE CANADA (1979). Santé de l'environnement et du milieu de travail. Le pH. Réimprimé en 1995. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/ph/index-fra.php>. Consulté le 14/04/2013.
- SANTE CANADA (1987). Santé de l'environnement et du milieu de travail. Le calcium. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/calcium/index-fra.php> (Consulté le 22/05/2013)
- SANTE CANADA (2003) Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada : Documentation à l'appui. La turbidité. Comité fédéral-provincial-territorial sur la santé et l'environnement. Santé Canada Ottawa (Ontario). Octobre 2003. http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/alt_formats/hecs-sesc/pdf/pubs/water-eau/turbidity/turbidity-fra.pdf (Consulté le 20/05/2013)
- SANTE CANADA (2008). Santé de l'environnement et du milieu de travail. Le chlorure. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/chloride-chlorure/index-fra.php>. Consulté le 13/12/2012
- SANTE CANADA (2009). Santé de l'environnement et du milieu de travail. Les matières dissoutes totales. (<http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/tds-mdt/index-fra.php>/ 29/04/2013)
- SANTE CANADA (2012). Recommandations pour la qualité de l'eau potable au Canada. Bureau de l'eau, de l'air et des changements climatiques, Direction générale de la santé environnementale et de la sécurité des consommateurs, Santé Canada, Ottawa, Ontario. http://publications.gc.ca/collections/collection_2013/sc-hc/H129-24-2012-fra.pdf
- SANTE CANADA (2013). Santé de l'environnement et du milieu de travail. Protozoaires entériques : Giardia et Cryptosporidium. Comité fédéral-provincial-territorial sur l'eau potable. <http://www.hc-sc.gc.ca/ewh-semt/pubs/water-eau/protozoa/index-fra.php>. Consulté le 15/06/2013

- SAREDI NELIDA G. (2002). Manual práctico de parasitología médica. -1a. ed.- Buenos Aires: Laboratorios Andrómaco, 2002. ISBN 987-20355-0-4. 112 p.
- SCGD. (2010). Service de contrôle de la gestion déléguée de la municipalité de Martil. Rapport interne sur la gestion des déchets solides à Martil, 2010. Document non publié.
- SEBEI A., CHAABANI F., SOUISSI F. et SAADI A. (2004). Hydrologie et qualité des eaux de la nappe de Grombalia (Tunisie nord-orientale). *Science et changement planétaires/ Sécheresse* ; 15(2) : 159-66.
- SEEE (2009). Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau de l'Environnement, chargé de l'eau et de l'Environnement. Département de l'eau. Etat de la qualité des ressources en eau au Maroc. Année 2007-2008.
- SEEE (2013). Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau de l'Environnement, chargé de l'eau et de l'Environnement. Grille de classification des eaux utilisées pour la production de l'eau potable. http://www.water.gov.ma/userfiles/file/2_Eau%20potable.pdf. Consulté le 16/ 07/2013.
- SEGUIN J., DIANE BELANGER D., BERRY P., BOUCHET V., CHARRON D., CLARKE K-L., DOYON B., FLEURY M., FURGAL C. et al (2008). Santé et changements climatiques : Évaluation des vulnérabilités et de la capacité d'adaptation au Canada. Santé Canada.
- STITOU EL MESSARI J. D. (1995) : Contribution à la connaissance hydrogéologique des aquifères côtiers Martil-Alila, Oued Laou et Smir. Thèse de 3^o cycle faculté des Sciences Tétouan, 157 p.
- STITOU EL MESSARI J. D. (2002) : Etude de la salinité des eaux souterraines des aquifères côtiers Martil-Alila et Smir : Intégration des méthodes hydrogéochimiques, géophysiques et isotopiques. Thèse d'état. Faculté des sciences de Tétouan, 270 p.
- TAZI O., FAHDE A. et EL YOUNOUSSI S. (2001). Impact de la pollution sur l'unique réseau hydrographique de Casablanca, Maroc. Etude de cas. *Science et changements planétaires / Sécheresse* ; 12(2) : 129-134.
- ZAPOROZEC A., CONRAD J. E., HIRATA R., JOHANSSON, P-O., NONNER J. C., ROMIJN E., et WEAVER J. M. C. (2002). A methodological guide groundwater contamination inventory. International hydrological programme within project 3.1 (IHP-V). Series on groundwater no.2. UNESCO.
- ZINEBI S. (2014). Discussion de soutenance de doctorat présenté par Lamribah Abdelilah et intitulé : Influence de la pollution urbaine sur la qualité microbienne et physicochimique des eaux souterraines de la nappe phréatique de Martil au Maroc. Faculté des sciences de Tétouan au Maroc. 25/01/2014. Document non publié.
- ZMIROU D., FERLEY J. P., COLLIN J. F., CHARREL M. et BERLIN J. (1987). A follow-up study of gastro-intestinal diseases related to bacteriologically substandard drinking water. *American Journal of Public Health* ; 77(5): 582-4.

ANNEXES (résultats détaillés des analyses microbiologiques et physicochimiques)

Tableau annexe 1 : Evolution bimestrielle des concentrations des CT (en UFC/100 ml d'eau) dans les eaux des puits prospectés (M-J : Mai-Juin ; Jui-A : Juillet-Août ; S-Oc : Septembre-Octobre ; N-D : Novembre-Décembre ; J-F : Janvier-Février ; M-Av : Mars-Avril. P: puits).

Puits	M-J/2010	Jui-A/2010	S-Oc/2010	N-D/2010	J-F/2011	M-Av/2011
P1	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
P2	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
P3	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
P4	>1000	159	>1000	>1000	>1000	88
P5	>1000	>1000	>1000	>1000	184	>1000
P6	>1000	>1000	324	>1000	>1000	>1000
P7	96	>1000	80	>1000	1	40
P8	66	>1000	144	74	4	44
P9	164	>1000	>1000	110	188	36
P10	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
P11	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
P12	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000	>1000
P13	>1000	>1000	>1000	>1000	220	119
P14	194	80	20	113	12	92
P15	234	90	>1000	45	>1000	>1000

Tableau annexe 2 : Evolution bimestrielle des concentrations des CF (en UFC/100 ml d'eau) dans les eaux des puits prospectés (M-J : Mai-Juin ; Jui-A : Juillet-Août ; S-Oc : Septembre-Octobre ; N-D : Novembre-Décembre ; J-F : Janvier-Février ; M-Av : Mars-Avril. P: puits).

Puits	M-J/2010	Jui-A/2010	S-Oc/2010	N-D/2010	J-F/2011	M-Av/2011
P 1	>1000	>1000	>1000	123	280	315
P2	>1000	320	>1000	59	164	17
P3	39	>1000	>1000	248	88	167
P4	3	13	280	60	59	16
P5	21	13	61	20	60	42
P 6	62	>1000	210	34	0	107
P7	48	>1000	204	89	77	59
P8	57	320	110	52	13	2
P9	57	14	35	8	13	2
P10	>1000	128	212	66	77	70
P11	>1000	>1000	180	>1000	59	84
P12	>1000	0	4	38	90	46
P13	50	0	>1000	>1000	16	60
P14	42	>1000	112	>1000	8	54
P15	55	51	72	31	2	22

Tableau annexe 3 : Evolution bimestrielle des concentrations des SF au niveau des puits prospectés (en UFC/100 ml d'eau) dans les eaux des puits prospectés (M-J : Mai-Juin ; Jui-A : Juillet-Août ; S-Oc : Septembre-Octobre ; N-D : Novembre-Décembre ; J-F : Janvier-Février ; M-Av : Mars-Avril. P: puits).

Puits	M-J/2010	Jui-A/2010	S-Oc/2010	N-D/2010	J-F/2011	M-Av/2011
P 1	>1000	220	180	0	29	627
P2	74	230	200	0	0	704
P3	57	154	220	14	92	119
P4	26	565	162	33	60	5
P5	0	240	218	68	104	5
P6	43	24	0	12	18	5
P7	134	52	120	18	25	15
P8	110	43	72	104	118	66
P9	10	34	0	25	20	110
P10	252	1520	136	104	79	2100
P11	408	425	>1000	120	88	115
P12	255	320	0	122	14	208
P13	180	400	112	280	35	20
P14	120	104	9	2	46	52
P15	54	106	152	33	23	98

Tableau annexe 4 : Evolution saisonnière du pH au niveau des puits prospecté

Période \ Puits	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	8,01	7,95	7,91	8,37	8,53	8,17	7,94	8,39	7,68	8,20	7,93	7,97	7,72	8,01	7,89
Été 2010	7,94	8,19	8,23	8,17	8,05	8,86	7,77	7,78	7,64	8,78	8,03	7,60	7,79	7,85	7,92
Automne 2010	8,22	8,07	7,89	8,29	8,46	8,52	7,98	7,85	7,81	8,94	7,96	8,28	8,18	7,98	8,02
Hiver 2010/2011	8,12	7,96	8,15	8,56	8,35	8,12	8,08	7,96	7,76	8,53	7,89	7,99	8,11	8,03	7,90

Tableau annexe 5 : Evolution saisonnière de la conductivité électrique (en $\mu\text{S/cm}$) des eaux des puits prospectés

Période \ Puits	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	1988	1923	1558	1216	856	1527	2792	1528	2603	2792	1528	580	960	1433	1521
Été 2010	1607	1269	1373	1430	1684	619	2566	1784	2914	2513	1700	774	1124	1206	1320
Automne 2010	1522	1355	1408	2461	1278	1405	1756	1064	2844	2855	1612	610	1119	1156	1455
Hiver 2010/2011	1455	1613	1584	1098	1302	1581	1207	2937	1898	2937	1698	961	1468	1350	1209

Tableau annexe 6 : Evolution saisonnière du TSD (en mg/L) des eaux des puits prospectés

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	955	933	753	596	419	748	1368	749	1275	1368	749	284	471	702	754
Été 2010	775	616	666	704	823	302	1280	894	1428	1226	846	379	559	598	652
Automne 2010	755	678	697	1205	625	681	860	541	1405	1413	795	302	548	584	721
Hiver 2010/2011	720	598	788	542	638	775	769	1439	930	1439	850	471	719	679	599

Tableau annexe 7 : Evolution saisonnière de la salinité (en g/L) dans les puits prospectés

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	1,0	0,9	0,7	0,6	0,4	0,8	1,4	0,7	1,3	1,4	0,7	0,3	0,5	0,7	0,8
Été 2010	0,8	0,6	0,7	0,7	0,8	0,3	1,3	0,9	1,4	1,2	0,8	0,4	0,6	0,6	0,7
Automne 2010	0,7	0,6	0,7	1,2	0,6	0,7	0,8	0,5	1,4	1,4	0,8	0,3	0,5	0,6	0,7
Hiver 2010/2011	0,7	0,8	0,8	0,5	0,6	0,8	0,6	1,5	0,9	1,5	0,8	0,5	0,7	0,6	0,6

Tableau annexe 8 : Evolution saisonnière des teneurs en oxygène dissous (en mg/L) au niveau des puits prospectés.

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	2,1	1,22	1,55	1,29	1,24	1,23	5,22	4,03	5,13	3,06	3,57	2,95	2,35	5,13	4,22
Été 2010	2,3	2,54	2,02	1,23	1,19	1,22	4,88	4,56	4,14	3,54	2,33	2,64	3,54	3,12	4,02
Automne 2010	1,55	1,13	1,87	1,27	3,61	0,65	4,33	4,51	3,2	5,57	2,2	1,46	3,40	3,5	3,7
Hiver 2010/2011	1,66	1,55	2,03	2,21	1,20	2,30	5,13	6,01	3,90	4,5	3,8	2,6	3,2	4,99	3,07

Tableau annexe 9 : Evolution saisonnière de la turbidité (en UTN) au niveau des puits prospectés.

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	0,87	0,92	1,41	1,92	0,62	2,46	1,18	1,5	2,44	3,50	2,13	1,02	1,95	1,14	0,71
Été 2010	0,79	0,86	5,10	0,78	0,73	0,20	0,47	0,87	1,50	1,91	1,57	1,51	0,55	0,85	0,93
Automne 2010	3,68	4,78	2,35	0,32	4,85	0,65	0,52	1,84	0,65	1,82	3,54	0,78	1,75	2,53	1,81
Hiver 2010/2011	2,89	3,25	2,112	0,61	0,36	0,41	1,6	1,65	1,70	8,25	24,4	0,96	1,55	3,76	3,7

Tableau annexe 10 : Evolution saisonnière de la dureté totale (TH en degré français °F) au niveau des puits prospectés .

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	10,3	10,1	7,2	43,2	29,6	49,6	86,2	12,3	25,9	78,1	69,3	34,8	63,2	61,2	56,6
Eté 2010	11,8	11,9	10,3	61,8	40,2	16,1	14,5	13,5	14,6	56	46,4	55,0	30,4	61,84	64,6
Automne 2010	9,1	8,8	6,0	45,0	51,4	52,6	18,0	56,2	15,0	48,4	53,6	37,2	30,4	86,2	49,2
Hiver 2011	48,8	9,4	18,3	29,3	81,3	58,0	84,0	55,5	74,2	57,8	68,4	29,5	38,7	89,3	73,5

Tableau annexe 11 : Evolution saisonnière des teneurs en ions calcium au niveau des puits prospectés (en mg/L)

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	23,5	22,8	21,4	147,2	35,9	190,0	188,0	30,4	66,8	95,2	92,7	94,8	147,8	124,8	160,8
Eté 2010	25,6	21,2	27,4	239,6	142,5	54,1	28,0	33,6	36,8	284,0	124,2	112,4	99,2	239,6	151,8
Automne 2010	20,2	18,5	20,4	168,7	140,8	197,4	59,0	64,0	52,0	104,0	104,0	98,9	99,2	188,0	125,5
Hiver 2011	181,0	17,8	21,4	62,6	92,8	113,3	192,0	140,2	213,2	124,0	144,2	42,6	74,5	167,1	160,8

Tableau annexe 12 : Evolution saisonnière des teneurs en chlorures dans les puits prospectés (en mg/L).

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	127,8	142,7	102,9	99,4	49,7	102,9	447,3	46,1	383,4	2115,8	46,1	49,7	120,7	195,2	280,4
Eté 2010	112,7	110,0	41,1	92,3	71	39,0	127,8	241,4	220,1	105,8	90,4	131,3	55,0	92,3	277,4
Automne 2010	108,9	99,4	152,6	198,8	159,7	213,0	262,7	543,1	110,0	465,0	230,7	88,7	55,0	447,3	182,2
Hiver 2010/2011	111,9	87,8	167,6	35,5	202,3	63,9	536,0	266,2	486,3	115,5	93,5	106,4	99,2	412,6	271,4

Tableau annexe 13 : Evolution saisonnière des teneurs en magnésium au niveau des puits prospecté (en mg/L)

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	21,6	21,4	9,0	31,1	100,5	10,5	190,4	23,0	45,0	264,0	224,3	53,8	127,6	146,0	79,7
Eté 2010	26,2	32,2	16,8	9,4	22,5	12,6	36,6	24,7	26,3	143,5	115,6	124,9	27,2	9,42	129,5
Automne 2010	19,6	20,3	4,4	13,9	78,9	15,9	15,7	195,3	9,9	108,8	134,1	60,8	27,2	190,5	86,7
Hiver 2010/2011	17,2	24,3	62,98	66,6	282,5	144,2	174,9	99,4	101,4	130,2	156,9	14,4	67,7	231	161,8

Tableau annexe 14 : Evolution saisonnière des teneurs en sulfates dans les puits prospectés (en mg/L).

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Printemps 2010	81,0	207,5	175,1	146,8	80,2	114,7	149,7	258,5	226,9	109,3	15,4	80,3	55,6	138,1	159,2
Été 2010	150,3	115,0	164,0	221,1	118,6	151,2	259,5	141,6	95,0	143,6	26	156	144,6	112,5	189,6
Automne 2010	172,6	163,2	181,3	211,5	156,3	219,6	256,1	241,4	162,3	160,1	89,2	89	125,0	177,5	203,1
Hiver 2010/2011	147,1	89,8	159,2	219	136,9	169,3	206,3	220,9	155,4	129,0	97,5	17,5	96,5	194,8	215,6

Tableau annexe 15 : Evolution bimestrielle des teneurs en nitrates (en mg/L) dans les eaux de puits prospectés.

Puits \ Période	P1	P 2	P 3	P 4	P 5	P 6	P 7	P 8	P 9	P 10	P 11	P 12	P 13	P 14	P 15
Mai-Juin/2010	50,76	50,69	50,33	47,88	51,13	3,65	6,85	17,45	32,14	1,89	44,22	33,12	12,78	48,50	48,54
Juillet-Août/2010	49,89	24,68	14,68	39,45	50,46	15,23	32,06	49,55	19,24	45,75	51,30	48,19	51,24	49,63	50,41
Septembre-Oct/2010	50,62	50,31	47,60	53,15	40,33	4,69	10,17	35,08	7,11	44,83	15,22	40,87	16,22	35,66	40,21
Novembre-Déc/2010	47,13	30,88	51,21	48,33	49,02	4,73	15,47	28,36	25,88	51,77	43,55	36,06	28,55	43,52	46,77
Janvier-Février/2011	50,19	52,52	02,39	56,88	36,54	6,52	45,73	18,23	30,61	38,12	36,44	45,08	16,52	41,03	49,25
Mars-Avril/2011	35,88	43,44	40,59	51,28	35,70	14,05	26,11	23,22	6,88	14,25	25,48	53,13	9,51	39,45	28,88

Tableau annexe 16 : Evolution bimestrielle des teneurs en nitrites (en mg/L) dans les eaux de puits prospectés.

Puits \ Période	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	P13	P14	P15
Mai-Juin/2010	4,428	0,510	4,574	0,147	0,027	0,201	0,005	0,009	0,012	0,170	0,302	0,012	0,066	0,085	0,015
Juillet-Août/2010	0,349	0,889	0,062	0,026	0,928	1,541	0,128	0,003	0,058	0,258	0,245	0,125	0,098	0,063	0,047
Septembre-Oct/2010	0,150	0,082	0,202	0,035	0,002	0,001	0,036	0,041	0,008	0,068	0,007	0,451	0,063	0,027	0,002
Novembre-Décem/2010	0,282	0,841	1,260	0,970	0,099	0,666	0,005	0,081	0,008	0,021	0,510	0,035	0,078	0,038	0,048
Janvier-Février/2011	0,130	0,020	0,003	0,256	1,258	0,201	0,019	0,088	0,015	0,019	0,890	0,033	0,098	0,004	0,012
Mars-Avril/2011	0,050	0,102	0,952	0,125	0,065	0,825	0,108	0,253	0,012	0,057	0,023	0,140	0,137	0,043	0,078