

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran

Mohamed BOUDIAF

FACULTE D'ARCHITECTURE ET DE GENIE CIVIL

DEPARTEMENT D'HYDRAULIQUE

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de Magister

Spécialité : HYDRAULIQUE

Option : Techniques et gestion de l'eau

Présenté par

Mr ZERROUKI Mohammed 

Sujet du mémoire

Simulation du transport et de diffusion de la pollution dans un cours d'eau

Cas de l'oued Mouïllah

SOUTENU LE : 05/12/2012 DEVANT LE JURY COMPOSE DE

Membres de jury :

Nom et Prénoms	Grade	Etablissement	
Mr. ERRIH Mohamed	Professeur	USTO-MB	Président
Mr. CHERIF El-Amine	Maitre de conférence-A	USTO-MB	Rapporteur
Mr. BOUDJEMLINE Djamel	Maitre de conférence-A	USTO-MB	Examineur
Mr. YEBDRI Djilali	Maitre de conférence-A	USTO-MB	Examineur

Remerciements

Je remercie « DIEU » tout puissant de m'avoir à empirer ses connaissances et son savoir pour accomplir une action qui lui plaise.

Je tiens à exprimer toutes mes reconnaissances à Monsieur CHERIF EL AMINE pour son encadrement, ses nombreux conseils et son soutien tout au long de ma thèse. Je le remercie chaleureusement pour sa confiance, sa patience et sa générosité.

Mes vifs remerciements vont aux membres de jury, Monsieur Med. ERRIH professeur au département d'hydraulique, Monsieur Dj. YEBDRI et Monsieur Dj. BOUDJEMLINE Maîtres de conférences au département de l'Hydraulique à la Faculté d'architecture et de génie civil, université des sciences et de la technologie Mohamed BOUDIAF Oran- Qu'ils trouvent à travers ces expressions mes sincères remerciements pour l'honneur qui m'ont fait en acceptant d'examiner ce travail.

Mes remerciements à Monsieur YEBDRI Dj responsable de la promotion pour ses encouragements.

Je ne saurais oublier mes enseignants de Département d'Hydraulique pour leurs aides, leurs informations et les encouragements qu'ils m'ont apportés.

Je n'oublierai pas à remercier les membres de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques, de l'Agence des bassins hydrographique Orani- Chott chergui, de la direction de l'hydraulique de la wilaya de Tlemcen en particulier les gents de la subdivision de l'hydraulique de la daïra de Maghnia et de L'Office National d'assainissement, pour leur contribution en matières de données nécessaires à la réalisation de ce travail.

Je suis reconnaissant envers tous les membres de ma famille qui m'ont soutenu tout au long de ces études.

Enfin, j'adresse mes remerciements à tous qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce Travail sans oublier, bien sûr, mes collègues de ma promotion de magister.

ملخص:

إن انتشار المواد الملوثة, الصادرة عن حادث عرضي أو عن طريق العمد, في الأنهار يترتب عنه تدهور مستمر في نوعية الموارد المائية. لهذا يجب وضع آليات تنبؤ تنقل هذه الملوثات. في هذا الإطار تدرج دراستنا التي هدفها الأساسي تمثيل ظاهرة انتقال و انتشار الملوثات في مجرى مائي.

و من أجل هذا اخترنا واد مويلح, أقصى الشمال الغربي للجزائر, حوض الصرف هذا ينقل عدة أنواع من التلوث ناتج عن النشاطات الحضرية, الصناعية و الفلاحية, الصادرة عن مدينة مغنية و المدينة المغربية وجدة و التي تصب في سد حمام بوغرارة.

ومن أجل الحد من هذا الإشكال, قد أنجزت دراسة معمقة للخصائص الفيزيائية و الكيميائية على مستوى عدة نقاط موزعة عبر الشبكة الهيدروغرافية لحوض الصرف قيد الدراسة.

قمنا بتمثيل نتائج انتشار التلوث على مستوى المجرى المائي على شكل منحنيات تبين تطور تركيز الملوثات في الزمن و في المكان.

التحليل المكاني و في أزمنة مختلفة يظهر جيد الإقصاء الذاتي التدريجي لمختلف الملوثات على طول المجرى المائي.

الكلمات المفتاحية : انتشار, تدهور نوعية الموارد المائية, تمثيل, واد مويلح, سد حمام بوغرارة, المجرى المائي.

Résumé :

Le transport et la diffusion des substances provenant des pollutions accidentelles ou intentionnelles dans les rivières entraînent une dégradation continue de la ressource en eau. Des outils de prédictions du processus de transport doivent être mis en place. C'est dans cette optique que s'inscrit notre étude dont le principal objectif est de réaliser une simulation numérique de la diffusion des polluants dans un cours d'eau.

Pour ce faire, notre choix c'est opté sur l'oued Mouillah, extrême nord ouest de l'Algérie, Ce bassin versant draine de divers type de pollutions générées par les activités urbaines, industrielles et agricole en provenance de la ville Maghnia et de la ville marocaine Oujda, ils trouvent refuge dans la cuvette du barrage Hammam Boughrara.

Pour atténuer le problème, une étude approfondie des paramètres physico-chimique au niveau de plusieurs points de prélèvement répartis sur le réseau hydrographique du bassin versant a été réalisée.

Les résultats, de la simulation du transport et diffusion de la pollution dans le cours d'eau, obtenus sont présentés sous formes des courbes qui montrent l'évolution de la concentration du polluant dans le temps et dans l'espace.

L'analyse spatiale à différentes périodes montre bien une auto-élimination naturelle et une dégradation progressive des différents polluants dans les cours d'eau.

Mots clés: Diffusion, Dégradation de la ressource en eau, Simulation, Oued Mouillah, Barrage Hammam Boughrara, Cours d'eau.

Abstract:

Transport and diffusion of substances from the accidental or deliberate pollution in rivers result in continued degradation of water resources. Tools for prediction of transport processes must be established. It is in this context that our study whose main objective is to achieve a numerical simulation of the diffusion of pollutants in a river.

To do this, our choice is decided on the river Mouillah, extreme north-west of Algeria, The watershed drains of various types of pollution generated by urban, industrial and agriculture from the Maghnia city and the Moroccan city Oujda, they find refuge in the bowl of the dam Hammam Boughrara.

To alleviate the problem, a thorough study of physico-chemical parameters at several sampling points spread over the drainage of the watershed was conducted.

The results of the simulation of transport and diffusion of pollution in the river, obtained are presented in the form of curves showing the evolution of the pollutant concentration in time and space.

Spatial analysis at different times shows an auto-I remove a natural and progressive degradation of various pollutants into waterways.

Key words: *Diffusion, degradation of water resources, simulation, Oued Mouillah, Barrage Hammam Boughrara, waterways.*

Liste des notations

Symbole	Unité	Identification
A	m ²	Section droite
ABH :	/	Agence des bassins hydrographiques
ANRH	/	Agence nationale des ressources hydriques
a _h	m ² /s	La diffusivité thermique du milieu
Al	/	L'aluminium
A _L	Hm ³	Apport liquide annuel
A _{Solide}	M tonne/an	Apport solide annuel
A _S	t/km ² .an	Dégradation spécifique
B	m	Largeur du canal
C	kg/m ³	Concentration de la matière
C _p	/	La chaleur massique à pression constante
Ca	/	Le cadmium
Cu	/	Le cuivre
Ca ⁺²	/	Le calcium
C _{max}	kg/m ³	La concentration maximale
Cr	/	Le chrome
Cl ⁻²	/	Le chlore
CERTAF	/	Complexe de la vaisselle et céramique.
°C	/	Degré Celsius
Cs	/	Coefficient d'asymétrie
DaI	/	Indice de Damköhler
DBO ₅	mg/l	La Demande Biochimique en Oxygène
DCO	mg/l	La demande Chimique en Oxygène
D(x, t) ou D _L	m ² /s	coefficient longitudinal de dispersion
DHW	/	direction de l'hydraulique de wilaya
E	mm	Le ruissèlement
ETR	mm	Evapotranspiration réelle
ETP	mm	L'évapotranspiration mensuelle
ENOF	/	Entreprise de bentonite et de la terre décolorante
ENCG	/	Entreprise des corps gras
ERIAD (Maïserie)	/	Entreprise des aliments et dérivés
<i>erfc</i>	/	Fonction d'erreur
FeCl ₃	/	Le chlorure ferrique
Fe	/	Le fer
H	m	profondeur de l'eau
H _{max}	m	Altitude maximale du bassin versant
H _{min}	m	Altitude minimale du bassin versant
H _{moy}	/	Altitude moyenne du bassin versant
H ₃ PO ₄	/	Le phosphorique
HCO ₃ ⁻	/	Les bicarbonates
G _t	/	Coefficient d'obliquité.
I	mm/h	Intensité pluviale
I _g	Valeur moyenne mensuelle de la radiation solaire globale
I _{gA}	Radiation maximale théorique donnée par les tableaux de l'ANGOT
K _c	/	Indice de compacité
K ⁺	/	Le potassium

K_x	m^2/s	Coefficient de dispersion
K	m^2/s	La diffusivité moléculaire
k_r	m^2/s	Coefficient de réaction
M_1	Kg	Masse instantanée
MES	mg/l	Matières En Suspension
Mg^{+2}	/	Manganèse
Mn	/	le manganèse
M_0	Kg	La masse injectée initialement.
NaOH	/	La soude
NaCl	/	Le sel
Na^+	/	Le sodium
Ni	/	Le nickel
O_2	/	L'oxygène dissous
O.N.A	/	Office nationale d'assainissement
P	mm	Précipitation moyenne annuelle
p	/	Le phosphore
Pb	/	Le plomb
P_{JMax}	mm	Pluie journalière maximale
q_{conv}	Flux convectif
Re	/	Nombre de Reynolds
Rh	m	Rayon hydraulique
SO_4^{-2}	/	L'oxyde de soufre
S_{ox}	%	la pente de lit du cours d'eau
T	$^{\circ}C$	Température moyenne annuelle
T_c	heure	Temps de concentration
T_e	/	paramètre d'échange lié au temps de rétention de la de zone morte
t	s	temps
STEP	/	Station de traitement des eaux polluées
V ou U	m/s	Vitesse d'écoulement
Zn	/	Le zinc
u_*	m/s	vitesse de cisaillement
λ	W/mK	La conductivité thermique du fluide
ν	m^2/s	La viscosité cinématique
ε_m^2	m^2/s	Coefficients de diffusivité ou la diffusivité massique
σ_x^2	/	La variance
ρ	m^3/g	La masse volumique
ζ_e	ml	le rapport du volume de la zone de stockage par unité longueur
α	/	paramètre de perméabilité du sol

LISTE DES FIGURES ET GRAPHES

Figure I.1	Comportement du polluant dans son environnement (Guide sur le comportement des polluants)	12
Figure II.1	Illustration schématique de la diffusion moléculaire superposée à la convection.....	23
Figure II.2	(a) Mouvement tourbillonnaire de l'écoulement turbulent ; (b) Fluctuations turbulentes de la composante longitudinale de vitesse autour d'une valeur moyenne, mesurées dans un point fixe d'un cours d'eau.....	25
Figure II.3	Mélange d'un colorant dans un bassin par diffusion moléculaire(a) et diffusion turbulente (b).....	26
Figure II.4	Représentation schématique de la dispersion.....	27
Figure II.5	Domaine matériel, D, délimité par une surface fixe, S, soumis à un bilan pour une grandeur physique, c_f	28
Figure II.6	Injection d'une quantité de sel sur une section $x = 0$, d'un canal rectangulaire.....	34
Figure II.8	La concentration calculée dans différentes sections du canal rectangulaire.....	36
Figure II.9	Illustration schématique d'un rejet continu des eaux usées par une station d'épuration.....	38
Figure III.1	Schéma de la zone d'étude.....	46
Figure III.2	Variation temporelle de la Concentration pour $kr=0$	47
Figure III.3	Variation temporelle de la concentration pour $k_r=0,5$	47
Figure III.4	Solutions analytiques exactes et approximatives.....	51
Figure III.5	Profils de Concentration dans le fleuve de Waikato à proximité de la source.....	53
Figure III.6	Profils de Concentration dans le fleuve de Waikato dans une zone éloignée de la source.....	54
Figure III.7	Illustration des mécanismes de la zone morte.....	55
Figure III.8	Courbe du modèle de la zone morte et du modèle d'advection, diffusion (pour $u= 0.50\text{m/s}$; $K= 0.10\text{m}^2/\text{s}$; $\varepsilon = 20\%$; $T= 100\text{s}$; $L=10.000\text{m}$; $DaI =240$).....	57
Figure III.9	Modèle d'advection–diffusion et celui de la zone morte représentant les données de la rivière de Mödling pour $DaI = 21.1$	58
Figure III.10	Variation des concentrations mesurées (représentées par les pointes) et des concentrations simulées (représentées par les lignes) de SF6 dans le fleuve Hudson.....	61
Figure III.11	Variation des concentrations mesurées (représentées par les pointes) et des concentrations simulées (représentées par les lignes) de SF6 en fonction du temps dans le fleuve Vent–Wind–Bighorn.....	62
Figure III.12	Variation des concentrations mesurées (représentées par les pointes) et des concentrations simulées (représentées par les lignes) de rhodamine en fonction du temps dans le fleuve de Missouri.....	63
Figure III.13	Variation des concentrations mesurées (représentées par les pointes) et des concentrations simulées (représentées par les lignes) de MITC en fonction du temps dans le fleuve de Sacramento.....	64
Figure IV.1	Les bassins versants en Algérie.....	66
Figure IV.2	Le bassin versant de la Tafna dans l'ensemble de l'Oranie Chott Chergui.....	67
Figure IV.3	Situation géographique du bassin versant de l'oued Mouillah.....	68
Figure IV.4	Plaine de Maghnia et Zriga	73
Figure IV.5	Réseau Hydrographique du Bassin Versant.....	78

Figure IV.6	Courbe hypsométrique.....	80
Figure IV.7	Carte de pente du bassin versant d'O/Mouilah.....	81
Figure IV.8	Carte lithologique du bassin versant d'oued Mouillah.....	85
Figure IV.9	Carte d'occupation du sol du bassin versant Mouillah.....	88
Graphe V.1	Chronologie des précipitations annuelles des différentes stations.....	91
Graphe V.2	Hystogramme des précipitations moyennes mensuelles.....	92
Graphe V.3	Variation des précipitations mensuelles des cinq stations.....	92
Graphe V.4	Chronologie des pluies journalières maximales des cinq stations.....	93
Graphe V.5	Courbes des Températures mensuelles.....	94
Graphe V.6	Diagramme Ombre Thermique De GAUSSEN.....	95
Figure VI.1	Représentation de la ville de Maghnia.....	104
Figure VI.2	STEP de Maghnia.....	105
Figure VI.3	Localisation des unités industrielles productives de la pollution (coté Algérien)....	107
Figure VI.4	Vue générale de l'unité ENCG (remarquons le rejet dans l'oued Abbes).....	108
Figure VI.5	Schéma de la filière de traitement des effluents de l'ENCG.....	110
Figure VI.6: MAISERIE	a) Vue intérieure	
	b) Vue extérieure.....	111
Figure VI.7	Processus de fabrication de la Maïserie.....	113
Figure VI.8	Mode de traitement de la Maïserie.....	114
Figure VI.9	Bilan du circuit des terres décolorantes de l'ENOF.....	118
Figure VI.10	Schéma de la station de traitement des eaux de l'ENOF.....	119
Figure VI.11	Schéma d'épuration de l'unité (CERTAF).....	121
Figure VI.12	a)-Processus de fabrication des produits rouges	
	b)- Processus de fabrication vaisselle.....	122
Figure VI.13	Localisation de la diguette (seuil) sur Oued Mouillah.....	126
Figure VI.14	Illustration de Barrage Hammam Boughrara.....	129
Figure VI.15	Vue de la cuvette du barrage Boughrara, Oued Tafna et Oued Mouillah	130
Figure VII.1	Transport des polluants dans le courant liquide.....	131
Figure VII.2	Localisation des stations de surveillance de l'ANRH. (Points de prélèvements)....	133
Graphe VII.1	l'évolution de la concentration du PH de la station de Mouillah amont digue.....	139
Graphe VII.2	l'évolution de la température T° de la station de Mouillah amont digue.....	139
Graphe VII.3	l'évolution de la concentration du DBO_5 de la station de Mouillah amont digue..	140
Graphe VII.4	l'évolution de la concentration du DCO en fonction du temps de la station Mouillah amont.....	141
Graphe VII.5	l'évolution de la concentration des MO de la station de Mouillah amont digue.....	142
Graphe VII.6	l'évolution de la concentration des MES de la station de Mouillah amont digue.....	142
Graphe VII.7	l'évolution de la concentration du P_{TOT} la station de Mouillah amont digue.....	143
Graphe VII.8	l'évolution de la concentration du NH_4 de la station de Mouillah amont digue.....	144
Graphe VII.9	l'évolution de la concentration du Na la station de Mouillah amont digue.....	144
Graphe VII.10	L'évolution du PH en fonction du temps (station Legfaf)	145
Graphe VII.11	L'évolution de la température en fonction du temps (station Legfaf).....	146

Graphe VII.12	L'évolution de la concentration de la DBO ₅ de la station Legfaf.	146
Graphe VII.13	l'évolution de la concentration de la DCO de la station Legfaf.....	147
Graphe VII.14	l'évolution de la concentration du P _{TOT} de la station Legfaf.....	148
Graphe VII.15	l'évolution de la concentration du HCO ₃ de la station Legfaf.....	148
Graphe VII.16	l'évolution de la concentration du MES de la station Legfaf.....	149
Graphe VII.17	l'évolution de la concentration de l'ammonium de la station Legfaf.....	149
Graphe VII.18	l'évolution de la concentration du sodium de la station Legfaf.....	150
Graphe VII.19	l'évolution de la concentration du PH de la station barrage.....	150
Graphe VII.20	l'évolution de la température T° de la station barrage.....	151
Graphe VII.21	l'évolution de la concentration de la DBO ₅ de la station barrage.....	151
Graphe VII.22	l'évolution de la concentration de la DCO de la station barrage.....	152
Graphe VII.23	L'évolution de la concentration du MES de la station barrage.....	153
Graphe VII.24	concentration du P _{TOT} de la station barrage.....	153
Graphe VII.25	concentration du HCO ₃ de la station barrage.....	154
Graphe VII.26	l'évolution de la concentration du Na de la station barrage.....	154
Graphe VII.27	l'évolution de la concentration du NH ₄ en de la station barrage.....	155
Graphe VII.28	l'évolution de la concentration du M O de la station barrage.....	155
Graphe VII.29	l'évolution du PH de la station de la station pierre de chat.....	156
Graphe VII.30	l'évolution de la température T° de la station de pierre de chat.....	157
Graphe VII.31	l'évolution de la concentration du DBO ₅ de la station pierre de chat.....	157
Graphe VII. 32	l'évolution de la concentration du DCO pierre de chat.....	158
Graphe VII. 33	l'évolution de la concentration du P _{TOT} pierre de chat.....	159
Graphe VII. 34	l'évolution de la concentration du NH ₄ pierre de chat.....	159
Graphe VII. 35	l'évolution de la concentration du Na pierre de chat.....	160
Graphe VII. 36	l'évolution de la concentration du HCO ₃ pierre de chat.....	160
Graphe VII. 37	l'évolution de la concentration du MES pierre de chat.....	161
Graphe VII. 38	l'évolution de la concentration du M O pierre de chat.....	161
Graphe VII.39	concentration de la DBO ₅ en fonction du temps (secteur moulliah amont –barrage).....	162
Graphe VII.40	concentration de la DCO en fonction du temps (secteur moulliah amont – barrage).....	162
Graphe VII. 41	concentration du MES en fonction du temps (secteur moulliah amont – barrage).....	163
Graphe VII. 42	concentration du P _{TOT} en fonction du temps (secteur moulliah amont – barrage H B)	163
Graphe VII.43	concentration du NH ₄ en fonction du temps (secteur moulliah amont – barrage H B).....	164
Graphe VIII.1	Evolution spatio-temporelle du P _{TOT} à Mouillah Amont.....	173
Graphe VIII.2	Evolution spatio-temporelle du P _{tot} à partir de O. Ouardeffou.....	174
Graphe VIII.3	Variation temporelle du P _{TOT} A l'entrée du Barrage Hammam Boughrara.....	175
Graphe VIII.4	Dégradation Spatiale En Chaque Instant De La DBO ₅ à Mouillah.....	176
Graphe VIII.5	Dégradation spatial en chaque instant de la DBO ₅ à Ouardeffou.....	177
Graphe VIII.6	Variation temporelle de la DBO ₅ à l'entrée de La Cuvette.....	178
Graphe VIII.7	Dégradation spatiale en chaque instant de la DCO à Mouillah amont.....	179
Graphe VIII.8	Dégradation spatial en chaque instant de la DCO à Ouerdeffou.....	180
Graphe VIII.9	Variation temporelle du la DCO à l'entrée de La Cuvette.....	181

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1	La teneur en oxygène dissous dans l'eau en fonction de la température de l'eau et sous une pression de 1 bar.....	12
Tableau I.2	Les Caractéristiques physico-chimiques de quelques polluants organiques. (Guide sur le Comportement des polluants : B.Lemiere et C.Guern, 1999).....	18
Tableau I.3	Méthodes et techniques de mesures.....	20
Tableau II.1	Système d'équations pour le champ de vitesse et la grandeur transportée.....	26
Tableau II.2	Quelques solutions analytiques pour la dispersion longitudinale	33
Tableau II.3	les valeurs de la variance, la largeur de nuage et la concentration en fonction du temps.....	35
Tableau II.4	Solutions analytiques pour deux cas de transport avec réaction.....	37
Tableau IV.1	Populations des agglomérations incluses dans le bassin versant d'oued Mouillah.....	70
Tableau IV.2	Population de la région d'Oujda à différents horizons.....	70
Tableau IV.3	Population de la daïra de Maghnia à différents horizons.	71
Tableau IV.4	population totale du bassin versant à différents horizons.	71
Tableau IV.5	Fiche technique du périmètre irrigué.....	72
Tableau IV.6	Espèces élevés.....	73
Tableau IV.7	Principales unités industrielles.....	74
Tableau IV.8	Courbe hypsométrique.....	79
Tableau IV.9	Caractéristiques géomorphologiques du bassin versant.....	82
Tableau IV.10	Distribution du couvert végétal dans le bassin d'oued Mouillah.....	87
Tableau V.1	présentation des stations pluviométriques prises en charge.....	90
Tableau V.2	Caractéristiques statistiques des précipitations.....	91
Tableau V.3	présente les différents paramètres statistiques.....	93
Tableau V.4	Calcul des intensités pluviales	94
Tableau V.5	Température moyennes mensuelles de 20 ans.....	94
Tableau V.6	Valeurs mensuelle du rapport P/T.....	95
Tableau V.7	Moyennes mensuelles des vitesses de vent à Maghnia durant la période 1976 à 1984.....	96
Tableau V.8	La durée d'insolation et La radiation solaire.....	96
Tableau V.9	Moyennes mensuelles de 30 ans d'observation de sirocco.....	97
Tableau V.10	Calcul de l'ETP par la méthode de Thoronhwaite.....	98
Tableau V.11	Paramètre de perméabilité du sol (α).....	101
Tableau VI.1	Fiche technique de l'Unité (STEP).....	105
Tableau VI.2	Fiche technique de l'Unité (ENCG).....	108
Tableau VI.3	Qualité des rejets à la sortie de la STEP de l'unité (ENCG).....	109
Tableau VI.4	Fiche technique de l'Unité (Maïserie).....	111
Tableau VI.5	Qualité des rejets à la sortie de la STEP de l'unité (Maïserie).....	112
Tableau VI.6	Fiche technique de l'Unité (ENOF).....	115
Tableau VI.7	Résultats des analyses du 30/10/2000	116
Tableau VI.8	Résultats d'analyses des lixiviations du dépôt de boues.....	116
Tableau VI.9	Caractéristiques du rejet brut.....	117
Tableau VI.10	Fiche technique de l'Unité (CERTAF).....	120
Tableau VI.11	Qualité des rejets de l'unité (CERTAF) après traitement.....	120
Tableau VI.12	Autres pollueurs.....	123
Tableau VI.13	Fiche technique de l'unité (Seuil de mouillah).....	125
Tableau VI.14	Les différentes caractéristiques de barrage Hammam Boughrara	129
Tableau VII.1	Type de pollution et paramètre physico-chimiques.....	134
Tableau VIII.1	Formules empiriques pour déterminer le coefficient de dispersion longitudinal.....	170
Tableau VIII.2	Caractéristiques forme de la section, d'écoulement et de l'élément analysé au niveau de des stations de prélèvement.....	172

Tableau VIII.3	Evolution spatio-temporelle du P_{TOT} à Mouillah Amont.....	172
Tableau VIII.4	Evolution spatio-temporelle du P_{TOT} à Ouardeffou.....	173
Tableau VIII.5	Variation temporelle du P_{TOT} A l'entrée du Barrage Hammam Boughrara.....	174
Tableau VIII.6	Paramètres de l'étude de la propagation de la DBO_5 au niveau des stations.....	175
Tableau VIII.7	Evolution spatio-temporelle de la DBO_5 à Mouillah Amont	176
Tableau VIII.8	Evolution spatio-temporelle de La DBO_5 Ouardeffou.....	177
Tableau VIII.9	Variation temporelle du la DBO_5 à l'entrée du barrage.....	178
Tableau VIII.10	Evolution spatio-temporelle de la DCO à Mouillah Amont.....	179
Tableau VIII.11	Evolution spatio-temporelle de La DCO Ouardeffou.....	180
Tableau VIII.12	Variation temporelle du la DCO à l'entrée du barrage.....	181

SOMMAIRE

I- Introduction Générale	08
Chapitre I : La pollution des eaux	
I-1 Introduction	11
I-2 Les polluants.....	12
I-3. Les sources et les origines de pollution :.....	13
I-3.1 En fonction de l'origine de pollution :.....	13
a) Pollution d'Origine urbaine (domestique).....	13
b) Pollution d'Origine industrielle	13
c) Pollution d'Origine agricole.....	14
I-3.2 Selon la nature des polluants :.....	14
a) Une pollution physique	14
b) Une pollution chimique	14
c) Une pollution microbiologique	14
I-3.3 Selon la répartition géographique :.....	14
a) Pollution ponctuelle et pollution diffuse	14
b) Pollution linéaire	14
I-3.4 En fonction de la répartition dans le temps :.....	14
a) Pollution temporaire (accidentelle) et pollution chronique (permanente)	14
b) Pollutions historiques	15
I-4 Caractères des polluants.....	15
I-4.1 Solubilité aqueuse.....	15
I-4.2 Tension de vapeur	15
I-4.3 Adsorption.....	15
I-4.4 Biodégradabilité	15
I-5 Principaux types de polluants.....	16
I-5.1 Polluants physiques.....	16
I-5.2 Polluants chimiques.....	17
I-5.2.1 Les micropolluants métalliques.....	17
I-5.2.2 Les substances minérales.....	17
I-5.2.3 Les détergents (tensioactifs).....	18
I-5.3 Les polluants organiques.....	18
I-6 L'Autoépuration.....	18
I-6.1 Phénomènes physiques.....	19
I-6.2 Phénomènes chimiques	19
I-6.3 Phénomènes biologiques.....	19
I-7 Les indicateurs de pollution les plus importants.....	19
I-8 L'échantillonnage.....	20
Chapitre II : Analyse de l'évolution spatio-temporelle -Méthodologie-	
II-1 Introduction.....	22
II.2. Les mécanismes de transport et de mélange.....	22
II.2.1. La convection.....	22
II.2.2. La diffusion moléculaire.....	22

II.2.3. La diffusion turbulente.....	24
II.2.4. La dispersion.....	26
II.3. Modélisation des mécanismes de transport et de mélange.....	27
II.3.1. Modélisation tridimensionnelle instantanée.....	27
II.3.2. Modélisation tridimensionnelle moyennée dans le temps	29
II.3.3. Modélisation unidimensionnelle moyennée dans le temps.....	30
a. Application.....	34
b. Solution.....	34
II.4. Transport avec réaction et pouvoir auto-épurateur des cours d'eau.....	37
II.4.1 Transport avec réaction.....	37
II.4.2. Pouvoir auto-épurateur des cours d'eau.....	38
II.4.2.1 Oxygénation biochimique de la matière organique, $C_{(DBO)}$	39
II.4.2.2 Ré oxygénation.....	39

Chapitre III : Revue bibliographique

III-1 Introduction.....	42
III-2 Travaux de M.K. Yoo, S.W. Cho, et K.S. JUN.....	42
III-2.1 Application du modèle.....	44
III-2.2 Application du modèle de dispersion.....	44
III-3. Travaux de R. L.Runkel	47
III-3.1 Source continue	48
III-3.2 Source continue de durée τ	49
III-3.3 Résultats – conclusions	50
III-4 Travaux de Y Ramsis Fares.....	51
III-5. Travaux de Bernhard H. Schmid, M.ASCE	54
III-5.1 Principes fondamentaux et méthodologies	55
III-5.2 Application.....	57
III-6. Travaux de FERDI L. HELLWEGER.....	59
III-6.1 Techniques de mesure de la dispersion à partir des traceurs.....	59
III-6.2 Technique de modélisation.....	59
III-6.3 Modélisation de la zone morte en mono–dimensionnelle.....	60
III-6.4 Application.....	61
III-6.4.1 Fleuve de Hudson (New York)	61
III-6.4 .2 Fleuve de Vent-Wind-Bighorn (Wyoming)	61
III-6.4 .3 Fleuve de Missouri (USA)	62
III-6.4 .4 Fleuve de Sacramento (La Californie)	63
III-7 Conclusion	64

Chapitre IV : Présentation de la zone d'étude

IV-1 Introduction	66
IV-2. Données Générales.....	66
IV-2.1 Situation du bassin versant de l'oued Mouillah.....	66
IV-2.2 Armature urbaine du Bassin versant de l'oued Mouillah.....	69
a) La région de d'Oujda.....	69
b) La commune de Maghnia.....	69
c) La commune de Hammam Boughrara.....	69
IV-3 Données Socio-économiques.....	70

IV-3.1 Situation Démographique.....	70
a) Oujda.....	70
b) La daïra de Maghina.....	70
IV-3.2 Estimation de la population future du bassin versant.....	70
IV-3.3 Activités économiques.....	71
IV-3.3.1 Région d'Oujda.....	71
IV-3.3.2 Région de Maghnia.....	72
a) Agriculture.....	72
b) Production animale.....	73
c) Industrie.....	73
d) Tourisme.....	74
IV-3.4 Les infrastructures hydrauliques.....	75
IV-3.4.1 Ressources en eau.....	75
a) Retenues collinaires.....	75
b) Forages, Puits et Sources.....	75
c) Alimentation en eau potable.....	75
d) Assainissement.....	76
d.1) L'assainissement de la ville d'OUJDA.....	76
d.2) Maghnia.....	76
d.3) Hammam Boughrara.....	76
IV-3.5 Morphométrie et Hydrographie.....	77
IV-3.5.1 Introduction.....	77
IV-3.5.2 Caractéristiques hydrographiques.....	77
IV-3.5.3 Relief.....	78
IV-3.5.4 Cadre Géologique et hydrogéologique.....	82
a) Cadre géologique.....	83
1. Quaternaire.....	83
2- Tertiaire.....	83
3- Secondaire.....	83
3-1 Crétacé.....	83
3-2. Jurassique supérieur.....	83
3-3 Jurassique moyen et inférieur.....	84
3-4 Primaire.....	84
3-5 Roches Volcaniques.....	84
b- Etude Hydrogéologique.....	85
1. Identification des aquifères et leurs caractéristiques.....	85
2- Présentation des principales nappes.....	86
2-1 Nappe : « NP01).....	86
2-2 Nappe : « NP02).....	86
2-3 Nappe : « NP03).....	86
2-4 Nappe : « NP04).....	86
2-5 Nappe : « NP05).....	86
IV-3.5.5 Sols et Végétation.....	86

Chapitre V : Hydro climatologie

V-1. Introduction.....	90
------------------------	----

V-2. Aspect du climat.....	90
V-3. Les précipitations	90
V-3.1 Analyse des précipitations annuelles.....	91
V-3.2 Analyse des précipitations mensuelles	91
V-3.3 Précipitations maximales journalières.....	93
V-4 Température.....	94
V-4.1 Diagramme Ombro-thermique de Gausсен.....	95
V-5 L'humidité.....	95
V-6 Les vents.....	96
V-7 L'insolation.....	96
1.8 Phénomènes secondaires.....	96
1.8.1. La grêle.....	96
V-8.2. Le Sirocco.....	96
V-8.3. Le brouillard	97
V-9. L'évapotranspiration (ET)	97
V-9.1. Introduction	97
V-9.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP)	97
V-9.3. L'évapotranspiration réelle (ETR)	98
V-10 Déficit d'écoulement.....	98
V-10 .1 Méthode de WUNDT.....	98
V-10 .2 Méthode de VERDEIL	98
V-11 Le Ruissèlement	98
V-12 Les apports moyens	99
V-12.1 Estimation du temps de concentration (T_c)	99
V-12.2 Apport liquide.....	99
V-12.2 Apport solide.....	100

Chapitre VI Analyse de la pollution- Qualité des rejets

VI-1. Introduction.....	103
VI-2. Les sources de pollution.....	103
VI.2.1. Coté Algérien.....	103
VI.2.1.1. Sources de pollution domestique.....	103
a)- Les eaux usées.....	103
b. les déchets solides.....	106
IV-2.1.2. Sources de pollution industrielle	106
a) AUDIT A L'ENCG	108
a-1) Fiche technique de l'Unité.....	108
a-2) Actions d'amélioration entreprises par l'unité	109
b) AUDIT A L'ERAD (La Maïserie de la Tafna)	111
b-1) Fiche technique de l'Unité.....	111
b-2) Actions d'amélioration entreprises par l'unité.....	112
c) AUDIT à l'ENOF	115
c-1) Fiche technique de l'Unité.....	115
c-2) Actions d'amélioration entreprises par l'unité.....	115
d) AUDIT AU CERTAF	119
d-1) Fiche technique de l'Unité.....	120

d-2) Actions d'amélioration entreprises par l'unité.....	120
d-3) autres actions vont améliorées la qualité des rejets.....	121
VI.2.1.3. Sources de pollution agricole.....	123
VI-2.1.4. Autres pollueurs.....	123
IV.2.2. Coté Marocain.....	125
IV.2.2.1 Audit au seuil de Mouillah.....	125
a) Fiche technique de l'Unité.....	125
VI.3 Conséquences de la pollution.....	126
VI.3.1. Impact de la pollution sur le bassin versant de l'Oued Mouillah.....	126
VI.3.1.1. Impact de pollution sur l'être humain.....	126
VI.3.1.2. Impact de la pollution sur le milieu récepteur.....	126
VI.3.2. Impact de la pollution sur le barrage de Hammam Boughrara.....	128
VI.3.2.1. Présentation du Barrage Hammam Boughrara.....	128
IV.3.2.2. Pollution du barrage Hammam Boughrara.....	130

Chapitre VII : Analyse spatio-temporelle de la pollution

VII.1. Introduction :	131
VII.2 Méthode et stratégie de travail :	132
VII.2.1. Présentation des points de prélèvement	132
VII.2.2. Présentation des éléments analysés et principe de prélèvement.....	134
VII.2.3. Critique et représentation des données.....	135
VII.3.2. Analyse structurale des éléments.....	135
VII.3.3. Justification du choix des éléments	135
VII.3.3.1. Familles des métaux de transition	136
VII.3.3.2. Famille du Sodium (Na^+), du Potassium (K^+), et du Chlore (Cl^-).....	137
VII.3.3.3. Famille du Manganèse (Mg^{+2}) et du Calcium (Ca^{+2})	137
VII.3.3.4. Famille des éléments Azotés.....	137
VII.3.3.5. Famille des éléments Phosphatés	138
VII.3.3.6. famille des composés en aluminium (Al) et en plomb (Pb).....	138
VII.3.3.7. famille des bicarbonates (HCO_3^-) et oxyde de soufre (SO_4^{2-})	138
VII.3.4. Interprétation des résultats.....	138
VII.3.4.1. analyses ponctuelles et temporelles de la pollution.....	139
a) Point Oued Mouillah Amont (St N7A 160202)	139
b) Oued Ouardeffou (station Legfaf 16031).....	145
c) Point du Barrage Hammam Boughrara (station Barrage 160520).....	150
d) Point Pierre du Chat (station Pierre de chat 160801).....	156
VII.3.4.2. <u>Analyse spatiale de la pollution</u>	162
❖ <u>DBO₅, DCO, MES, P_{Total}, NH₄⁺⁺</u>	162
❖ Etat général de la pollution.....	164

Chapitre VIII : Etude de la diffusion des polluants dans le milieu

VIII.1. Introduction.....	166
VIII.2 Présentation du modèle utilisé	166
VIII.3 Structure et fonctionnement du programme	168
VIII.4. Choix des polluants pour la simulation par	169
VIII.5. Etude de la diffusion du phosphore total, de la DBO ₅ et de la DCO.....	171
VIII.5.1. Etude de la diffusion du phosphore total.....	171

a) La propagation du PTOT à la St. du Mouillah Amont	172
b) La propagation du PTOT à la St. O. Ouerdffou.....	173
c) Variation temporelle du PTOT à l'entrée de la cuvette.....	174
VIII.5.2. Etude de la propagation de la Demande Biochimique en Oxygène.....	175
a) La dégradation de la DBO5 a partir de la St. Mouillah Amont.	176
b) la dégradation de la DBO5 a partir de la St. Oued Ouerdeffou.....	177
c) Variation temporelle du la DBO5 à l'entrée de la cuvette.....	178
VIII.5.3. Etude de la propagation de la Demande Chimique en Oxygène.....	179
a) La dégradation de la DCO a partir de la St. Mouillah Amont.	179
b) la dégradation de la DCO à partir de la St. Oued Ouardeffou.....	180
c) Variation temporelle du la DCO à l'entrée de la cuvette.....	181

Conclusion générale	183
----------------------------------	------------

Introduction générale

I-Introduction Générale :

L'eau joue un rôle primordial dans les activités socio – économiques d'une société. Cependant le développement industriel de ces dernières décennies a engendré des problèmes assez complexes ayant des répercussions sur la qualité de cette ressource. Le phénomène de la pollution qui devient de plus en plus préoccupant a entraîné la rareté d'une eau de bonne qualité.

Les eaux des rivières sont souvent sujettes à des pollutions accidentelles et parfois à des rejets intentionnels par les industriels. Quant à l'agriculture, elle contribue de façon directe ou indirecte à la dégradation de la qualité de la ressource en eau.

La pollution de l'eau et la dégradation des cours d'eau et des écosystèmes aquatiques peut se définir comme l'introduction, par suite de l'activité humaine, de substances ou de chaleur dans l'air, l'eau ou le sol, causant une pollution organique, chimique, mécanique ou thermique, lorsqu'elle peut avoir des effets nuisibles sur la santé humaine ou à la qualité de l'eau, des cours d'eau et des écosystèmes aquatiques.

L'introduction de la pollution recouvre le jet, le rejet, le déversement, l'écoulement ou le dépôt de toute nature et le déplacement. Elle peut être directe ou indirecte, volontaire ou involontaire et résulter d'une infiltration, d'une action ou d'une réaction, d'une inattention, d'un accident et d'une négligence. Elle peut enfin être chronique ou ponctuelle.

La "substance ou chaleur" polluante recouvre indifféremment des substances toxiques, nuisibles ou nocives, en particulier non dégradables, persistantes, bioaccumulables ou radioactives, d'énergie, des radiations ionisantes, des déchets solides ou liquides ou des hydrocarbures.

Sont indifféremment protégées les eaux intérieures, superficielles et souterraines, y compris transfrontalières, les cours d'eau y compris internationaux, dont fleuves, rivières, canaux, ruisseaux, lacs et plans d'eau avec lesquels ils communiquent, ainsi que tous ceux affluant à la mer en amont de la limite de salure des eaux, les masses d'eau artificielles (masses d'eau de surface créées par l'activité humaine), les masses d'eau fortement modifiées (masses d'eau de surface qui, par suite d'altérations physiques dues à l'activité humaine, sont fondamentalement modifiées quant à leur caractère) et les écosystèmes terrestres dépendant directement des écosystèmes aquatiques.

Devant des problématiques d'une telle envergure, il y a urgence de mettre en place des outils d'aide à la décision très efficaces afin de préserver la qualité de la ressource en eau.

Plusieurs recherches ont été menées pour décrire et modéliser le transport de matières dans les écoulements à surface libres. Les matières sont soumises à la convection provoquée par le champ de vitesse et à la diffusion turbulente et moléculaire. La mise en place des modèles capables de décrire finement le champ de vitesse ainsi que la diffusivité turbulente s'impose.

Le problème peut être traité de deux façons différentes : soit en développant des modèles physiques appropriés, soit en développant des modèles mathématiques pouvant prendre en compte tous les paramètres intervenant dans le processus de transport.

Les premiers sont très coûteux et leur extension à des problèmes similaires n'est pas toujours évidente. Par contre, l'utilisation des modèles mathématiques pour prédire le transport est beaucoup plus économique bien qu'elle exige des ordinateurs puissants lorsque que le problème est assez complexe. Leur mise en oeuvre dépend de la précision recherchée et aussi de la complexité de la géométrie du canal.

L'un des bassins versant qui retient notre attention ; le bassin versant de l'oued Mouillah qui appartient au grand bassin de la Tafna (Ouest Algérie). Ce bassin versant draine de divers types de pollution ; en provenance des villes de Maghnia et d'Oujda ; ils trouvent refuge dans la cuvette du barrage de Hammam Boughrara, qui engendre par conséquent de graves problèmes de pollution causant des impacts environnementaux considérables ; ayant de fortes incidences économiques et stratégiques.

Vu les problèmes de pollution que présente le bassin versant de l'oued Mouillah et les conséquences majeures qui se traduisent suite à cette pollution ; nous avons jugé nécessaire de contribuer à l'étude de ce phénomène de pollution hydrique de ce bassin afin de la maîtriser et de réduire les différents impacts y résultant, dans le but de trouver les solutions adéquates pour la protection de la ressource hydrique.

Pour atteindre nos objectifs, notre travail a été divisé en huit chapitres, les trois (03) premiers chapitres seront consacrés à la recherche bibliographique, le premier chapitre détaille le phénomène de la pollution des eaux, causes et conséquences, le deuxième chapitre donne un aperçu sur la méthodologie de diffusion et transport de la matière, tandis que le troisième chapitre présente quelques travaux sur les modèles mathématiques et numériques établis sur la dispersion de la pollution dans les cours d'eau.

Le quatrième chapitre et le cinquième, donnent une description détaillée de notre zone d'étude prenant en considération tout les paramètres pouvons servir par la suite à l'analyse de la pollution. Entre autres (chapitre 05), l'étude des paramètres climatiques et hydrologiques.

Les trois derniers chapitres traitent l'analyse de la pollution et l'étude de la diffusion des polluants, le sixième chapitre sert à l'identification des sources de pollution par l'analyse de la qualité des rejets.

Le septième chapitre donne une analyse spatio-temporelle de la pollution, et enfin le dernier chapitre traite la simulation de la diffusion des polluants dans le bassin versant de Mouillah.

Chapitre /

La pollution des eaux

Chapitre I : La pollution des eaux

I-1 Introduction :

Un milieu aquatique est dit **pollué** lorsque son équilibre a été modifié de façon durable par l'apport en quantités trop importantes soit de substances plus ou moins toxiques, d'origine naturelle ou issues d'activités humaines, soit encore d'eaux trop chaudes. (www.cnrs.fr).

Ces **pollutions** peuvent entraîner divers types de nuisances :

- augmenter la mortalité de certaines espèces animales ou végétales jusqu'à parfois les faire disparaître,
- altérer leurs capacités physiologiques,
- détériorer la qualité de l'eau au point de la rendre impropre à certains usages, comme l'alimentation humaine.

Tous les **polluants** ne présentent pas les mêmes risques pour les écosystèmes. Certains notamment sont biodégradables. Riche en espèces animales et végétales et en micro-organismes, un écosystème est naturellement capable de transformer et d'éliminer, en partie ou en totalité, les substances biodégradables qu'il reçoit et d'assurer ainsi le maintien de son équilibre et de la qualité de ses eaux.

Mais, si l'abondance de ces substances dépasse un seuil critique, ses capacités d'autoépuration ne suffisent plus : l'agent polluant ne peut plus être éliminé assez rapidement ; il s'accumule, rompant progressivement l'équilibre dynamique naturel du milieu aquatique, et peut même devenir toxique. On dit alors qu'il y a **pollution**.

D'autres agents **polluants**, comme les plastiques, les métaux et certains pesticides, ne sont pas ou peu biodégradables : le processus d'autoépuration est alors inopérant et ces substances s'accumulent dans l'écosystème, intoxiquant les espèces vivantes qui les ingèrent. Certaines de ces substances, de surcroît, comme les métaux lourds ou les pesticides, s'accumulent dans les organismes, se concentrant dans certains tissus ou organes à des doses parfois bien supérieures à celles mesurées dans l'eau, un phénomène appelé " bio-accumulation ". Cette accumulation, qui s'amplifie à chacun des maillons de la chaîne alimentaire, peut prendre parfois une ampleur inquiétante.

Il n'est pas toujours facile d'identifier les sources de pollution, ni d'estimer leurs effets respectifs, qui dépendent à la fois de la nature et de la concentration du polluant et de l'écosystème considéré, les phénomènes en jeu étant fort complexes. Il est donc souvent difficile de déterminer, pour chaque substance toxique, une concentration maximale acceptable pour un écosystème. Il n'existe d'ailleurs aucun consensus sur les seuils à ne pas dépasser.

Dans les rares cas où les lois fixent des normes, celles-ci varient selon les pays.

I-2 Les polluants : Un polluant ou contaminant est par conséquent un facteur physique, chimique ou biologique issu le plus souvent de l'activité humaine et provoquant sous une intensité ou une concentration anormale, une altération de la qualité de l'eau naturelle.

Nous citons ci-dessous les principaux polluants en précisant leurs effets :

- Sachant que l'eau est un biotope caractérisée par ses conditions physico-chimique et hydrodynamique, la **température** de l'eau est considérée comme un important facteur biotope. Elle conditionne la teneur en oxygène dissous dans l'eau. Aussi le degré de saturation de l'eau en oxygène dissous est inversement proportionnel à sa température.

Le tableau N°I-1 représente la teneur en oxygène dissous dans l'eau en fonction de la température de l'eau et sous une pression de 1 bar.

Tableau N° I-1 la teneur en oxygène dissous dans l'eau en fonction de la température de l'eau et sous une pression de 1 bar.

(Guide sur le comportement des polluants : B.Lemiere et C.Guern, 1999)

T (°C)	0	5	10	15	20	25	30
Oxygène dissous (mg/l)	14.26	12.37	10.92	9.76	8.84	8.11	7.53

- Le **PH** (indicateur d'acidité), est un important facteur écologique, l'analyse de la FAO «1968 » donne l'influence du PH sur les espèces de poissons aquatiques.

- $PH < 3,5$: toutes les espèces de poissons sont détruites, seul quelque invertébrés et espèces végétales peuvent y survivre ;
- $3,5 < PH < 4,0$: limitatif pour la plupart des espèces (sans croissance normale) ;
- $4,0 < PH < 4,5$: limitatif pour la plupart des espèces, dangereux pour le saumon et les jeunes poissons ;
- $5,0 < PH < 9,0$: toutes les espèces peuvent y survivre et se développer normalement ;
- $9,0 < PH < 10,0$: Dangereux pour toutes les espèces ;
- $PH > 10,0$: Toutes les espèces sont détruites.

- Les polluants **minéraux** comme les composés azotés (nitrates et nitrites) sont les plus fréquents dans l'eau de surface et même souterraine (migration par infiltration). Leur origine est du essentiellement à l'épandage des engrais, d'effluent d'élevage et de rejets d'eau usée domestique. Ces polluants peuvent causer des maladies mortelles chez les tous jeunes enfants méthémoglobinémie, risques de cyanose. La présence du phosphore est un facteur d'eutrophisation des retenues et cours d'eau.

- Les **métaux lourds** sont très toxiques. Le cuivre, le fer et le zinc ne semblent pas avoir d'effets toxiques notables sur l'homme. Mais le chrome (chromates et bichromates), présent dans les eaux usées industrielles est reconnu cancérigène.

Le plomb produit par les tuyauteries et les usées industrielles provoque des intoxications (saturnisme).

Le cadmium issu des industries de céramique, de colorants et de métallurgie admet une toxicité élevée (dose létale humaine : 2 gr).

Le mercure est le plus toxique des métaux lourds par ses sels organiques solubles.

- Les **polluants microbiologiques** (bactéries, virus, et autres agents pathogènes) proviennent des eaux usées domestiques, des décharges, cimetières et autres. Ces polluants peuvent provoquer des maladies à transmission hydrique pouvant être à l'origine d'épidémies.

I-3. Les sources et les origines de pollution :

Les sources de pollution peuvent d'être classées suivant différents critères notamment :

- En fonction de l'origine de pollution ;
- Selon la nature des polluants ;
- Selon la répartition géographique de la pollution ;
- En fonction de la répartition dans le temps.

I-3.1 En fonction de l'origine de pollution :

On distingue :

a) Pollution d'Origine urbaine (domestique)

Cette pollution vient des eaux usées domestiques, eaux pluviales, eaux d'infiltration sous les dépôts d'ordure...etc

Dans le cas d'un assainissement, collectif ou individuel, défectueux, des substances indésirables contenues dans les eaux ménagères peuvent être transférées au milieu aquatique et à la nappe (matières organiques, détergentes, solvants, antibiotiques, micro-organismes...). Le cas se produit avec les puits perdus, l'assainissement individuel avec infiltration dans le sol mal conçue ou mal dimensionnée ainsi que les stations d'épurations urbaines surchargées.

b) Pollution d'Origine industrielle

Les polluants d'origine industrielle sont très variés selon le type d'activité: substances organiques banales, produits organiques de synthèse, hydrocarbures, sels minéraux, métaux lourds...Les pollutions sont exceptionnelles mais encore trop souvent chroniques (fuite de réservoirs, de canalisations...) Un cas particulier est celui des exploitations minières. L'extraction des granulats en plaine alluviale met en contact l'eau avec les polluants éventuels.

c) Pollution d'Origine agricole

L'épandage d'engrais ; produits phyto-sanitaires et l'utilisation des produits chimiques de traitement des plantes détruit la vie dans les rivières et rend impropres à la consommation humaine, et parfois animale, les eaux superficielles et souterraines, alors que les professionnels agricoles ont longtemps nié l'impact de leur activité sur la qualité de l'eau et refusé la moindre contrainte.

I-3.2 Selon la nature des polluants :

- a) **Une pollution physique** : chaleur, matière en suspension, radioactivité ...etc
- b) **Une pollution chimique** : sels minéraux, métaux lourds, pesticides, détergents, hydrocarbures et autres.
- c) **Une pollution microbiologique** : micro-organismes, virus, bactéries.

I-3.3 Selon la répartition géographique :

On distingue :

a) Pollution ponctuelle et pollution diffuse

Le polluant émis sur une faible surface n'affectera qu'un secteur limité de la nappe, qui pourra s'étendre par diffusion. Seuls les captages à proximité de la zone polluée et en aval seront affectés. Selon la densité et la solubilité du polluant, la zone polluée sera circonscrite ou diffuse, à la surface ou à l'intérieur de la nappe.

L'épandage de produits polluants sur une grande surface en revanche affecte l'ensemble de la nappe ; elles sont de plus souvent chroniques et décline l'ensemble de la nappe pour la production d'eau potable, à moins de traitements adaptés (cas ces pollutions agricoles par les pesticides).

b) Pollution linéaire

Elle accompagne le trajet des routes et autoroutes, des canaux, des cours d'eau, et des voies ferrées.

I-3.4 En fonction de la répartition dans le temps :

a) Pollution temporaire (accidentelle) et pollution chronique (permanente) :

L'émission exceptionnelle de matière polluante, peut entraîner un transfert de cette dernière au milieu récepteur ou à la nappe. Le degré de pollution dépend de sa vitesse de percolation ainsi que le pouvoir d'autoépuration du cours d'eau et du sol.

Les pollutions chroniques sont plus insidieuses et dommageables; moins spectaculaires, elles peuvent passer inaperçues (pollution agricole par les nitrates; contaminations par hydrocarbures à partir de sols pollués).

On parle ainsi de la pollution saisonnière comme étant le cas des sels déneigement par exemple.

b) Pollutions historiques

De nombreuses zones polluées l'ont été à une époque où les préoccupations environnementales étaient inconnues ou sommaires : pollution par les terrils de mines, les décharges non contrôlées...

I-4 Caractères des polluants :

I-4.1 Solubilité aqueuse

La solubilité est la quantité maximale dissoute d'un composé dans l'eau à une température donnée. Elle est influencée outre la température, par la pression, la fraction molaire de chaque composé dans le mélange de polluants et la teneur en matières organiques dissoutes. Les composés très solubles sont facilement transportés par l'eau, car ils suivent son écoulement. Ils sont souvent peu adsorbés sur les sols, et plus facilement biodégradables. Cependant, certaines espèces solubles, de métaux par exemple, ne sont pas biodégradables.

I-4.2 Tension de vapeur

Ce paramètre sert à estimer la tendance d'un produit à se volatiliser et donc à passer dans l'atmosphère gazeuse à partir de la phase aqueuse du sol.

Les interactions entre la solubilité en milieu aqueux et la tension de vapeur conditionnent la volatilisation d'un produit donné à partir de la solution aqueuse. Par exemple, un polluant très soluble dans l'eau mais présentant une tension de vapeur élevée se volatilise rapidement. De ce fait, il atteindra rarement l'aquifère lors de la pollution.

I-4.3 Adsorption

Ce paramètre représente le potentiel d'un composé à s'adsorber sur le sol, résultant des actions physico-chimiques eau/roche. L'adsorption va de pair avec la surface spécifique des grains ou des fissures. Elle va se traduire par une diminution de la mobilité et de l'accessibilité du polluant.

I-4.4 Biodégradabilité

La biodégradation des composés organiques se produit en condition aérobie ou anaérobie selon la structure moléculaire et les conditions environnementales. Le potentiel de biodégradation permet de classer les composés en trois catégories :

- les composés dégradables
- les composés persistants : ne changent pas d'état spontanément
- les composés récalcitrants.

En général, plus une molécule est substituée (remplacement d'un groupement fonctionnel par un autre), plus elle est résistante à la biodégradation. Certaines biodégradations nécessitent l'action conjointe de microorganismes et non pas d'une souche unique.

Le comportement du polluant dans l'environnement est décrit par la figure ci-dessous

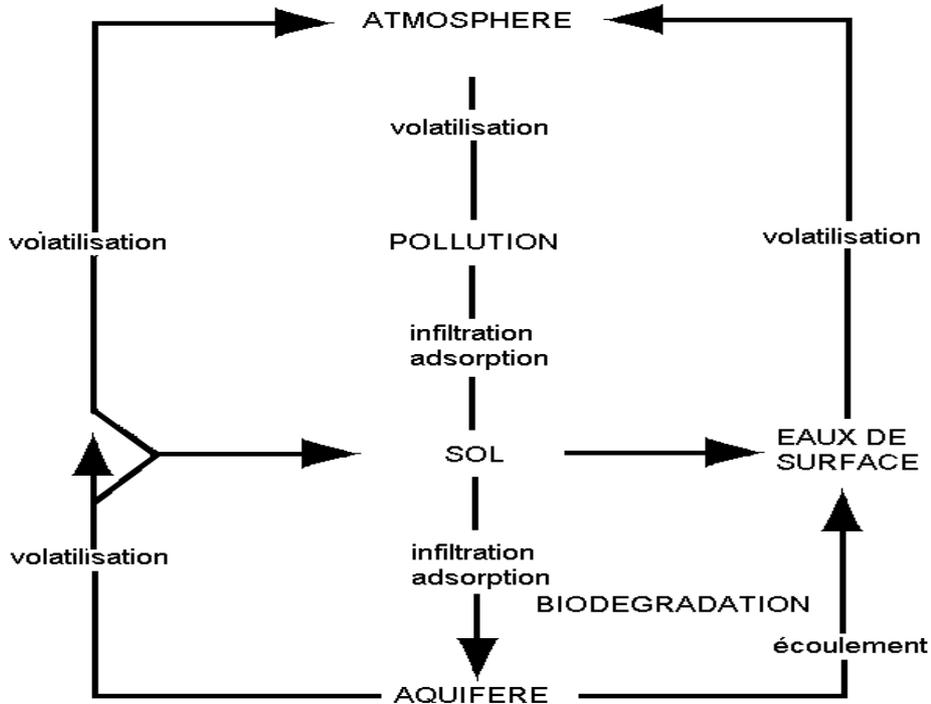


Figure I.1 : Comportement du polluant dans son environnement

(Guide sur le comportement des polluants : B.Lemiere et C.Guern, 1999)

I-5 Principaux types de polluants :

Le nombre de polluants est considérable, des estimations dénombrent 4 millions, dont 70 000 suspects d'action cancérogène. Il est donc impossible de les énumérer. Les polluants peuvent être classés selon la nature en quatre catégories ; physiques, chimiques, organiques et bactériologiques. (Castany, 1998)

I-5.1 Polluants physiques :

Les agents physiques de pollution sont : la chaleur, le transport de la matière et la radioactivité.

La chaleur, par augmentation de la température de l'eau, surtout de sulfates, provoque des effets écologiques sur la vie aquatique (développement des microorganismes telles que les algues). Elle diminue la solubilité de l'oxygène, déficit renforcé par l'accroissement de l'activité biologique qui le consomme.

Les matières solides en suspension sont entraînées par les eaux d'infiltration efficace. Certaines particules de l'ordre du micron, peuvent ainsi transiter et atteindre la nappe.

La radioactivité est proportionnellement la plus dangereuse des polluants physiques. C'est pourquoi tous les rejets sont sévèrement contrôlés.

I-5.2 Polluants chimiques :

I-5.2.1 Les micropolluants métalliques :

Les pollutions engendrées par la présence de métaux dans les eaux souterraines sont dues généralement aux activités industrielles par rejets d'effluents et par lessivage de produits stockés sur le sol.

Certains de ces métaux peuvent être toxiques (cadmium, chrome, mercure, plomb...), D'autres éléments sont considérés comme indésirables et peuvent présenter des inconvénients au consommateur d'ordre organoleptique : goût, saveur, coloration. C'est le cas pour le cuivre, le zinc, le fer, le manganèse, l'aluminium.

I-5.2.2 Les substances minérales :

➤ *Les chlorures, les sulfates, le fluor* : (étant des paramètres de la qualité naturelle des eaux) et des éléments toxiques tels que le cyanure et l'arsenic sont des substances minérales issues de l'activité humaine et susceptibles de polluer les nappes de façon ponctuelle.

➤ *Les nitrates sont très solubles* : Généralement épandus sur sol nu ou gelé, s'infiltrent avec les pluies ou sont lessivés en surface, par contre épandus au printemps et à la bonne dose, elles sont absorbés par les plantes cultivées. Dans les eaux naturelles non polluées, le taux de nitrates est très variable (de 1 à 15 mg/L) suivant la saison et l'origine des eaux.

➤ *Les hydrocarbures* : se rencontrent essentiellement dans le pétrole qui est un mélange complexe de ces composés. On distingue trois grandes catégories d'hydrocarbures : les hydrocarbures aliphatiques, aromatiques et hétérocycliques.

Leur transfert à la nappe dépend en particulier de leur masse molaire, leur tension de vapeur, leur viscosité et leur légère solubilité dans l'eau.

Ces produits faiblement biodégradables peuvent polluer d'importants volumes d'eau par dissolution même à dose infinitésimale. Une teneur diluée de 1/10 000 à 1/100 000 altère les propriétés gustatives de l'eau. A cette dose, l'inconvénient principal est de développer des odeurs et des saveurs désagréables. Un litre d'essence souille entre 1 000 et 5 000 m³ d'eau.

I-5.2.3 Les détergents (tensioactifs) :

Un détergent est un produit complexe contenant un ou plusieurs agents de surface et des composés minéraux (carbonates, phosphates, poly phosphates, perborates), souvent associés à des matières organiques améliorantes, à des enzymes hydrolysant et à des séquestrant. .

La biodégradabilité de ces substances est très variable. Les détergents sont peu toxiques mais ils facilitent par leur pouvoir mouillant la dispersion et le transfert d'autres polluants comme les pesticides.

I-5.3 Les polluants organiques :

De nombreux microorganismes, virus, bactéries et les algues sont présents dans l'eau. Le pouvoir d'autoépuration du sol est très efficace. Pratiquement l'eau souterraine en est dépourvue dans les conditions naturelles. Le problème se pose dans le cas particulier des milieux aquatiques dont les quels l'autoépuration est très faible.

Le tableau ci-après représente les Caractéristiques physico-chimiques de quelques polluants organiques.

Tableau I.2 : les Caractéristiques physico-chimiques de quelques polluants organiques.

(Guide sur le comportement des polluants : B.Lemiere et C.Guern, 1999)

Polluants	Densité	Volatilité (Atm.m ³ /mole)	Hydrophobicité log Kow	1/2 vie dans sol (jours ou ans)	1/2 vie dans nappe (jours ou ans)
Anthracène	1,28	86	4,45	50 jours – 1,3 ans	100 jours – 2,5 ans
Benzène	0,88	5550	2,13	5 – 16 jours	10 jours – 2 ans
Naphtalène	1,02	483	3,37	16 – 48 jours	258 jours
Phénol	1,07	1,36	1,46	1 – 10 jours	5 – 7 jours
Pyrène	1,27	5,1	5,18	210 jours – 5,1 ans	1,15 – 10,4 ans
Toluène	0,87	5920	2,69	0,5 – 1 jour	0,5 – 1 jour
Xylène	0,86	7040	3,26	7 – 28 jours	14 jours – 1 an

Le temps de demi-vie correspond au temps nécessaire pour que la moitié d'une quantité ou d'une concentration d'un polluant disparaisse du milieu ou de l'organisme qu'il contamine.

I-6 L'Autoépuration :

L'autoépuration est un phénomène extrêmement complexe mais très efficace qui mène à la banalisation des polluants toxiques, par des mécanismes et des interactions physiques, chimiques et biologiques. Ces mécanismes ont lieu lors de l'interaction des polluants avec les gaz, l'eau, les sols, les roches, la flore et la faune. La capacité d'autoépuration dépend de 3 phénomènes :

I-6.1 Phénomènes physiques :

- Echange gazeux : décomposition aérobie des polluants organiques, élimination de substances polluantes (N_2 , NH_3 , H_2S).
- Filtration : la filtration combine des forces physiques et chimiques, elle est active en milieu poreux.
- Rétention capillaire : les forces de capillarité fixent l'eau fortement avec les polluants qu'elle contient.
- Désintégration radioactive : les polluants radioactifs se désintègrent selon leur décroissance radioactive très variable.

I-6.2 Phénomènes chimiques :

- Mise en solution et cristallisation : les polluants sont soit dissous, soit cristallisés et fixés selon la loi d'action de masse.
- Réaction acide- base : la mobilité (par solubilité) des substances croît lorsque le pH diminue : pour l'eau il dépend d'abord des équilibres calco-carboniques.
- Réaction d'oxydo-réduction: elles sont souvent induites par les micro-organismes. A chaque couple oxydo -réducteur est associé un potentiel Eh : si Eh est positif, les eaux renferment des composés oxydants O_2 , NO_3^- , SO_4^{2-} ; si Eh est négatif, les oxydants disparaissent et apparaissent NH_4 et H_2S .
- Complexation: le Pb, le Cd et le Zn peuvent devenir très mobiles en milieu réducteur en formant des complexes organiques (aval des décharges). - Adsorption et désorption: l'adsorption peut être physique (forces faibles affectant les grosses molécules organiques et les colloïdes) ou chimiques (échange d'ion). Elle peut être réversible.

I-6.3 Phénomènes biologiques :

- Epuration par les plantes : lorsque les nappes montent, durant une partie de l'année, les racines peuvent directement puiser des substances nutritives qui peuvent être des polluants.
- Transformation et dégradation microbienne : dans les sols, les micro-organismes catalysent les réactions redox. Cela provoque la transformation accélérée des polluants dissous ou en suspension dans l'eau. - D'autres organismes assimilent C, H, O, P, N et S et les oligoéléments nécessaires à la synthèse de leur cellule. Dans des conditions favorables ($30^\circ C$, $pH = 7$) elles peuvent se multiplier. En fait, les mécanismes d'autoépuration ont surtout lieu dans la zone non saturée et la dilution (ou mise en solution) en zone saturée ne fait que compléter ces mécanismes,

I-7 Les indicateurs de pollution les plus importants sont :

- La demande chimique en oxygène (DBO5) : représente la quantité d'oxygène nécessaire pour oxyder des substances organiques contenues dans l'eau pendant cinq jours à $20^\circ C$;

- La demande chimique en oxygène (DCO) : représentant la quantité nécessaire d'oxygène pour la dégradation de toutes les matières oxydables contenues dans l'eau ;
- Les produits azotés : représentant les nitrates, les nitrites et l'ammonium ;
- Les produits phosphatés : sous forme de PO_4^{3-} , P_2O_5 , $\text{H}_2\text{PO}_4^{2-}$

I-8 L'échantillonnage :

Pour que les informations contenues dans un échantillon soient valables, il convient de respecter trois règles fondamentales :

- On doit s'assurer que l'échantillon prélevé représente le flux de matières polluantes ;
- Utiliser des techniques de prélèvement adéquates.
- Protéger l'échantillon jusqu'au le moment d'analyse.

Les échantillons d'eau prélevés pour analyses physico-chimiques doivent être placés dans des flacons en polyéthylène et conservés à une température de basse dans des glacières.

On utilise généralement de l'acide sulfurique pour une meilleure conservation.

Les paramètres physico-chimiques sont mesurés selon des méthodes et techniques d'analyse normalisées et aux moyens d'appareils de mesures appropriés.

Tableau I.3 : Méthodes et techniques de mesures

Paramètre	Appareillage
PH	Ph-mètre
Conductivité	Conductimètre
Sodium, Potassium	Spectrophotomètre à flamme
Nitrates, Nitrites, Ammonium, Sulfate, Phosphates, Silice	Spectrophotomètre d'absorption moléculaire
Métaux lourds	Absorption atomique
Turbidité	Turbidimètre
Carbone Organique total	Analyse du COT
Chlorure, Calcium, Bicarbonates, Oxygène dissous, DCO	Dosage volumétrique

Chapitre II

Analyse de l'évolution spato-temporelle
-Méthodologie-

Chapitre II : Analyse de l'évolution spatio-temporelle -Méthodologie-

II-1 Introduction : (K. Blanckaert, 2008)

Ce chapitre est consacré à l'étude du transport et du mélange d'une entité ou grandeur Physique ; dans la masse liquide par le liquide tel que :

- La matière soluble (substance chimique, polluant, oxygène, etc...),
- La matière solide (sédiments en suspension) micro-organismes, produits biologiques, etc...),
- La chaleur,
- La quantité de mouvement,

On admet que l'écoulement est connu, nous distinguons ici les grandeurs physiques passives (qui sont conservés pendant le transport) des grandeurs physiques actives (qui subissent des modifications dues aux réactions chimiques ou biologiques, au changement de phases, aux transferts à travers le périmètre de l'écoulement, etc...).

Bien que la théorie traitée dans ce chapitre soit généralement valable pour le transport d'une grandeur physique dans tout fluide en mouvement (substance chimique dans l'air, polluant dans l'océan, etc...), nous nous concentrons sur le cas de transport et mélange dans les cours d'eau.

Deux processus de transport sont considérés, celui du à la **diffusion** et celui du à la **convection**

II.2. Les mécanismes de transport et de mélange :

Représentons la grandeur physique qui nous intéresse dans l'écoulement par sa densité volumique locale, $c_f(x, y, z, t)$. Trois types de grandeur physique seront traités :

- ✓ La matière, paramétrée par la concentration volumique de la substance, C [kg/m^3].
- ✓ La chaleur, paramétrée par l'enthalpie, $\rho C_p T$
- ✓ La quantité de mouvement, ρV

II.2.1. La convection :

La convection est le transport de la grandeur physique par la vitesse de l'écoulement. Le flux convectif de la grandeur physique est mathématiquement exprimé par :

$$q_{conv} = C_f V \quad \dots\dots\dots(\text{II.1})$$

II.2.2. La diffusion moléculaire:

La diffusion moléculaire tend à uniformiser la répartition de la grandeur physique. Elle dépend uniquement de la grandeur physique et du fluide, mais non pas de l'écoulement du fluide. Le flux diffusif est exprimé par une loi phénoménologique :

$$\vec{q}_f = -k \vec{\text{grad}} c_f \quad \dots\dots\dots(\text{II.2.a})$$

$$q_{f_i} = -k \frac{\partial c_f}{\partial x_i} \quad \dots\dots\dots(\text{II.2.b})$$

Le flux diffusif est proportionnel au gradient de C_f , qui quantifie la non uniformité de la répartition de C_f . Le facteur de proportionnalité k est appelé la **diffusivité moléculaire**. C'est une grandeur intrinsèque du fluide dépendant de la température et de la pression. Le signe négatif signifie que le flux est dirigé des valeurs élevées vers des valeurs plus faibles.

La figure (I.1) illustre schématiquement l'effet de la diffusion moléculaire superposée à la convection :

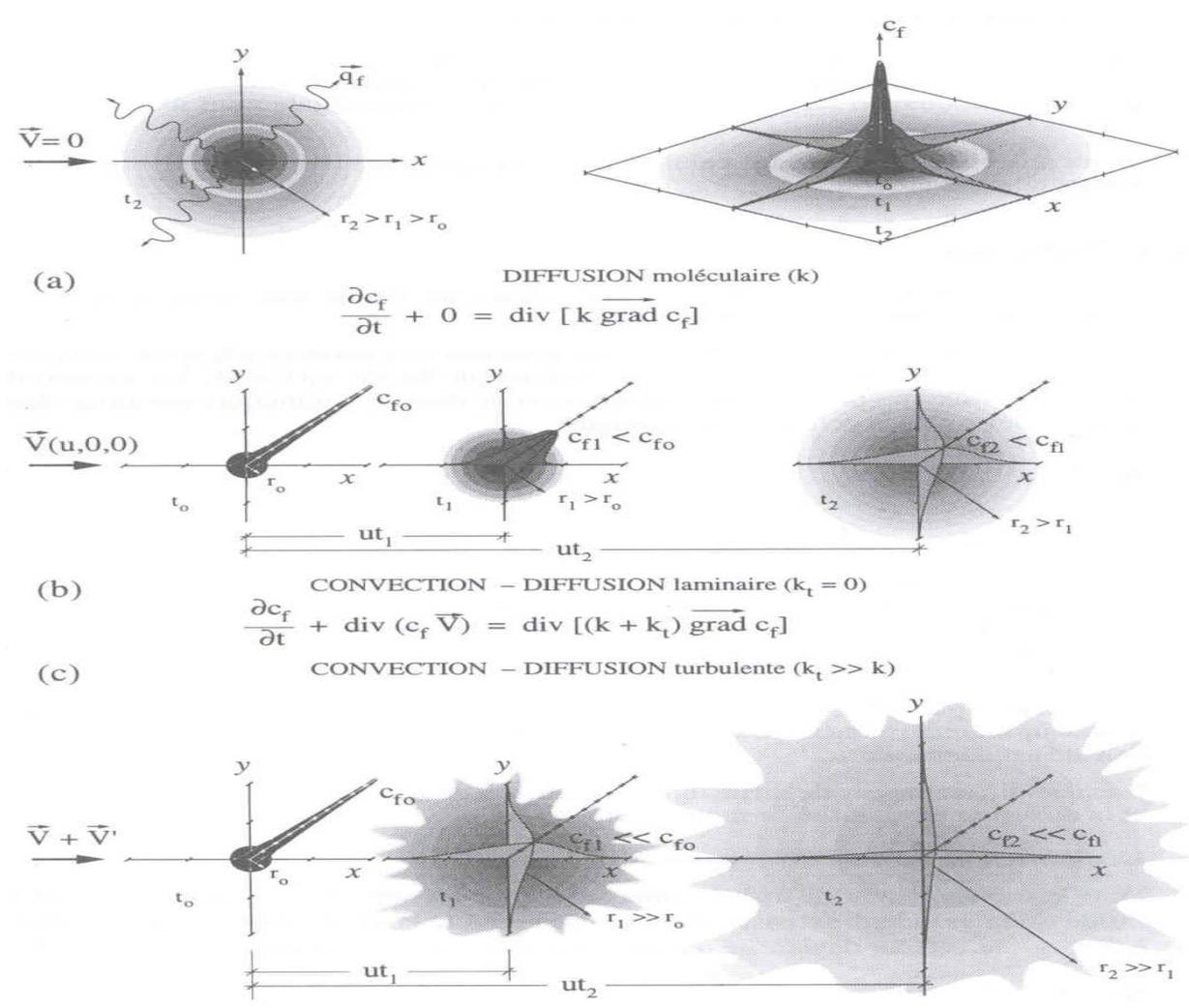


Figure (II.1) : Illustration schématique de la diffusion moléculaire superposée à la convection (K.BLANCKAERT, Hydraulique fluviale et aménagement des cours d'eau – Transport de matière)

Pour les trois cas de grandeurs physiques considérées, on a :

- La loi de Fick pour la diffusion de matière avec ϵ_m [m²/s] la diffusivité massique :

$$\vec{q}_m = -\epsilon_m \overrightarrow{\text{grad}c} \dots\dots\dots(\text{II.3})$$

- La loi de Fourier pour la diffusion de chaleur,

avec

C_p la chaleur massique à pression constante,

a_h la diffusivité thermique du milieu [m²/s]

et λ la conductivité thermique du fluide

$$\vec{q}_h = -a_h \overrightarrow{\text{grad}(\rho c_p T)} = -\rho a_h C_p \overrightarrow{\text{grad}T} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}T}$$

$$q_{h_i} = -\rho a_h c_p \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (\rho C_p = \text{Cte}) \dots\dots\dots (\text{II.4})$$

- La loi de Newton pour la diffusion de quantité de mouvement avec ν [m²/s] la viscosité cinématique :

$$\vec{q}_{mt} = -\nu \overrightarrow{\text{grad}(\rho V)} \dots\dots\dots(\text{II.5.a})$$

$$q_{mt_{ij}} = -\rho \nu \frac{\partial V_i}{\partial x_j} = \tau_{ij} \quad (\rho = \text{Cte}) \dots\dots\dots(\text{II.5.b})$$

Il peut paraître étrange de traiter le transport et le mélange de la quantité de mouvement par l'écoulement, donc par lui même. Cependant, ce cas est essentiel pour la modélisation de la diffusion turbulente.

Des ordres des grandeurs typiques pour les coefficients de diffusivité sont :

$$\epsilon_m \sim 10^{-9} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad a_h \sim 10^{-7} \text{ [m}^2\text{/s]} \quad \nu \sim 10^{-6} \text{ [m}^2\text{/s]}$$

La diffusion moléculaire est très faible et n'explique aucunement le transport et le mélange observés dans les cours d'eau naturels. Dans les écoulements turbulents, elle est négligeable par rapport à la diffusion turbulente et la dispersion.

II.2.3. La diffusion turbulente :

À partir d'un nombre de Reynolds critique, de l'ordre de $Re=UH/\nu=2000$, les écoulements deviennent turbulents. La turbulence se manifeste par un mouvement tourbillonnaire de l'écoulement (figure II.2.a), accompagné de fluctuations aléatoires des variables autour de leur valeur moyenne (figure II.2.b).

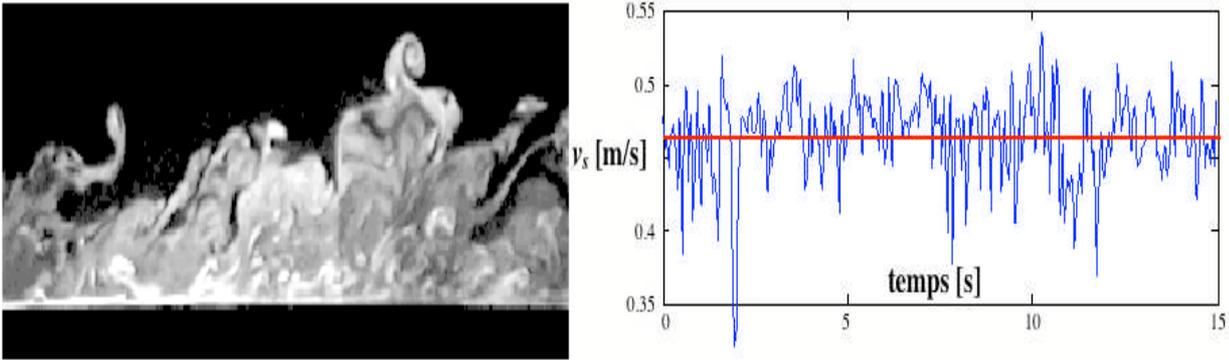


Figure (II.2) : (a) Mouvement tourbillonnaire de l'écoulement turbulent ; (b) Fluctuations turbulentes de la composante longitudinale de vitesse autour d'une valeur moyenne, mesurées dans un point fixe d'un cours d'eau. (K.BLANCKAERT, 2008)

Toutes les variables peuvent donc être décomposées en valeur moyenne (indiquée par une barre) et fluctuations (indiquées par une prime) :

$$\vec{V}(t) = \overline{\vec{V}} + \vec{V}'(t) \dots\dots\dots(II.6.a)$$

$$C_f(t) = \overline{C_f} + C'_f(t) \dots\dots\dots(II.6.b)$$

Avec par définition :

$$\left. \begin{array}{l} \overline{\vec{V}'(t)} = 0 \\ \overline{C'_f(t)} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \text{MAIS } \overline{C'_f(t)\vec{V}'(t)} \neq 0$$

L'ingénieur s'intéresse uniquement à la valeur moyenne des variables, et non pas à leurs fluctuations, qui de plus sont impossibles à calculer à cause des limitations dans les capacités de calcul.

Toutes les variables instantanées seront donc décomposées en **valeur moyenne** et fluctuations temporelles autour de cette valeur moyenne. Ainsi nous trouvons pour le flux convectif de la grandeur physique :

$$\vec{q}_{conv}(t) = C_f(t)\vec{V}(t) = \overline{C_f}\overline{\vec{V}} + C'_f(t)\vec{V}'(t) + C_f(t)\overline{\vec{V}} + \overline{C_f}\vec{V}'(t)$$

La moyenne temporelle du flux convectif est obtenue comme :

$$\begin{aligned} \overline{\vec{q}_{conv}} &= \overline{C_f}\overline{\vec{V}} + \overline{C'_f(t)\vec{V}'(t)} + \overline{C_f(t)\overline{\vec{V}}} + \overline{\overline{C_f}\vec{V}'(t)} \\ \overline{\vec{q}_{conv}} &= \overline{\vec{q}_{conv-moyenne}} + \overline{\vec{q}_{f,turb}} \end{aligned}$$

Bien que $\overline{\vec{V}'(t)} = 0$ et $\overline{C'_f(t)} = 0$, la valeur moyenne de leur corrélation, $\overline{C'_f(t)\vec{V}'(t)} \neq 0$.

Les fluctuations turbulentes contribuent donc au flux convectif de la grandeur physique transportée. Cependant, le flux convectif turbulent ne se manifeste pas par une convection de la grandeur physique, mais par une diffusion importante. Ceci est illustré à l'aide du mélange d'un colorant, injecté ponctuellement au milieu d'un bassin (figure II.3).

- Si l'eau dans le bassin est stagnante (figure II.3.a), la diffusion moléculaire engendrera un mélange très lent du colorant. Les iso surfaces de concentration seront sphériques.

- En faisant osciller verticalement une grille dans le bassin, des fluctuations turbulentes de vitesse peuvent être générées, sans pour autant générer de vitesses moyennes.

Intuitivement, il est clair que le mélange du colorant s'intensifiera. Ceci est l'effet de la diffusion turbulente. L'agent de transport, $\mathbf{V}'(\mathbf{t})$, transporte la grandeur physique selon une trajectoire aléatoire autour de sa position moyenne. Les iso surfaces de concentration sont en moyenne sphériques, mais prennent des formes très irrégulières instantanément, et donc une surface bien supérieure à celle de la sphère moyenne. De plus, leurs formes irrégulières engendrent des augmentations du gradient de c_f .

L'augmentation des gradients et de la surface active augmentent énormément la diffusion moléculaire.

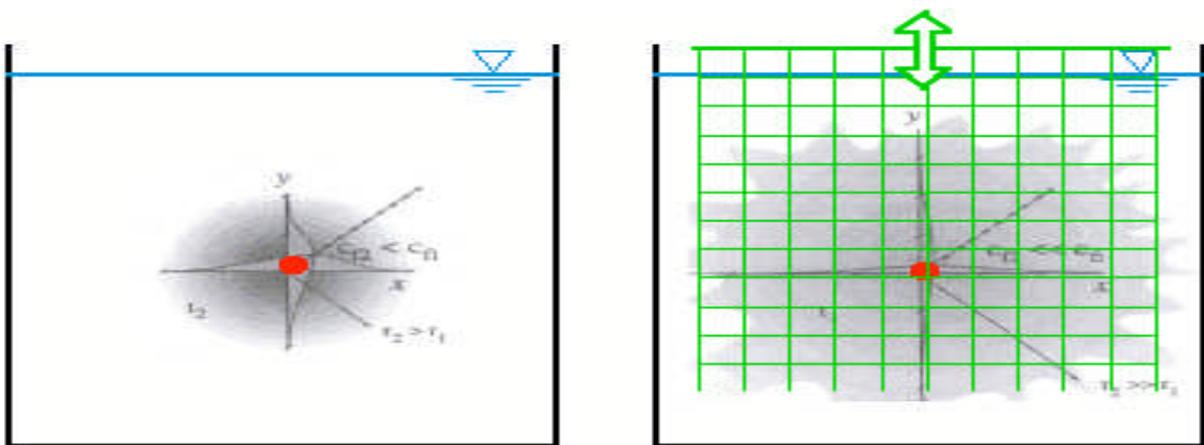


Figure (II.3): Mélanges d'un colorant dans un bassin par diffusion moléculaire (a) et diffusion turbulente (b). (K.BLANCKAERT, 2008)

L'effet de la turbulence est donc d'engendrer des trajectoires aléatoires de la grandeur physique, ce qui augmente énormément la diffusion moléculaire. Comme ces phénomènes se produisent à l'échelle temporelle rapide de la turbulence, ils ne sont pas aperçus une fois que l'on a moyenné la vitesse en fonction du temps, mais se manifestent comme une augmentation apparente de la diffusion. Ceci se résume comme :

Convection turbulente + diffusion moléculaire augmentée → diffusion turbulente

II.2.4. La dispersion :

La dispersion est l'équivalent spatial de la turbulence :

- La diffusion turbulente intervient car les fluctuations temporelles des variables ne peuvent pas être résolues.

- La dispersion intervient car les fluctuations spatiales des variables ne peuvent être résolues.

Comme mentionnés dans l'introduction, le transport et le mélange des grandeurs physiques dans les cours d'eau concernent des problèmes à grande échelle spatiale, nécessitant souvent une description

uni-dimensionnelle des variables. Le cours d'eau est modélisé comme un canal prismatique et la répartition des variables dans une section du cours d'eau est caractérisée par une seule valeur.

Cependant, comme démontrée par l'exemple suivant, la répartition tridimensionnelle des variables contribue au transport et au mélange. Considérons une grandeur physique injectée instantanément sur toute la section d'un cours d'eau (figure II.4).

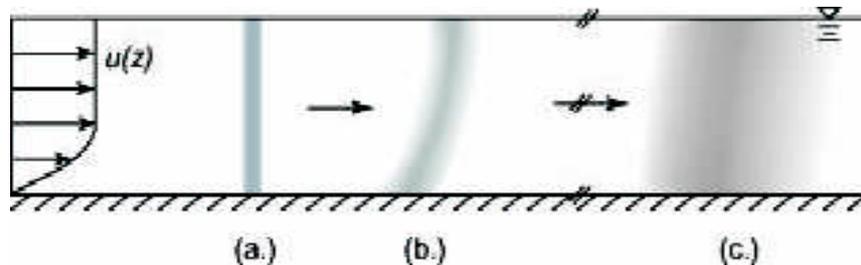


Figure (II.4) : Représentation schématique de la dispersion

(K.BLANCKAERT, Hydraulique fluviale et aménagement des cours d'eau – Transport de matière)

II.3. Modélisation des mécanismes de transport et de mélange :

Maintenant que les différents processus de transport et de mélange sont décrits, il faut les incorporer dans un modèle pour le transport et le mélange des grandeurs physiques. Ce modèle est basé sur le principe de conservation de la masse de la grandeur physique. Il s'élabore en plusieurs étapes:

a) Tout d'abord, un modèle mathématique est élaboré au niveau microscopique : il décrit en détail les répartitions tridimensionnelles des variables instantanées. Ce modèle inclut uniquement les deux vrais mécanismes de transport et de mélange : la convection et la diffusion moléculaire.

b) Comme ce modèle est impossible à résoudre à cause des limitations en capacité de calcul, il est moyenné dans le temps. Ainsi, un modèle est obtenu qui décrit les répartitions tridimensionnelles des variables moyennées temporellement. Moyenner la vitesse par rapport au temps fait apparaître la diffusion turbulente.

c) En traitant des longs tronçons de rivière, on est limité à une approche unidimensionnelle, c'est-à-dire que les variables sont moyennées dans la section. Ainsi un modèle est obtenu qui décrit les répartitions unidimensionnelles des variables moyennées temporellement. Ceci fait apparaître la dispersion.

II.3.1. Modélisation tridimensionnelle instantanée :

Un modèle pour la concentration de la grandeur physique est obtenu en exprimant sa conservation, au moyen d'une équation de bilan. Considérons un domaine matériel fluide, D , délimité par une surface fixe (S) (figure II.5). Exprimons que le changement de la densité volumique c_f de la grandeur physique contenue dans ce domaine matériel pendant un laps de temps δt est dû aux flux convectif et diffusif à travers la surface S , ainsi qu'aux éventuelles sources internes :

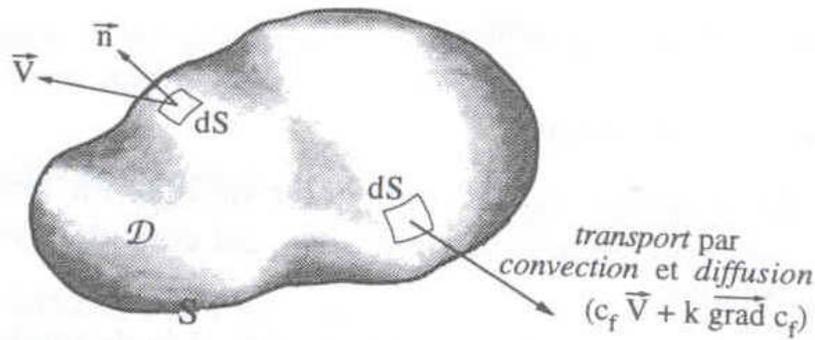


Figure (II.5) : Domaine matériel, D, délimité par une surface fixe, S, soumis à un bilan pour une grandeur physique, C_f. (GRAF W. H., ALTINAKAR M.S., 2008).

$$\int_D \frac{\partial c_f}{\partial t} dD + \int_S c_f \vec{V} dS = - \int_V \vec{q}_f dS + \int_V q_e dD$$

Flux convectif
flux diffusif
source interne

\Downarrow
Théorème de Gauss-Green-Ostogradski

$$\int_D \frac{\partial c_f}{\partial t} dD + \int_D \text{div}(c_f \vec{V}) dD = - \int_D \text{div} \vec{q}_f dD + \int_D q_e dD$$

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} + \text{div}(c_f \vec{V}) = - \text{div} \vec{q}_f + q_e$$

$$\Downarrow \quad \vec{q}_f = -k \overrightarrow{\text{grad} c_f} \quad \text{et} \quad \text{div} \vec{V} = 0 : \text{continuité}$$

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + C_f \cancel{\text{div} \vec{V}} + \vec{V} \overrightarrow{\text{grad} C_f} = \text{div}(-k \overrightarrow{\text{grad} c_f}) + q_e \dots\dots\dots(I.7)$$

Les mécanismes de transport inclus dans cette équation de bilan sont la convection et la diffusion moléculaire.

Les différentes entités physiques, C_f, peuvent désormais être considérées. Le bilan de matière, de chaleur et de quantité de mouvement est ainsi obtenu. Notons que la pression motrice intervient comme source interne dans le bilan de quantité de mouvement, ce qui n'est rien d'autre que l'équation de Navier-Stokes. Ces équations décrivent le champ de vitesse, donc l'agent de transport. Le système d'équations est résumé dans le tableau II.1

Tableau II.1 : Système d'équations pour le champ de vitesse et la grandeur transportée

<p>Conservation de masse $div \vec{V} = 0$</p> <p>Conservation de la quantité de mouvement $\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \overrightarrow{grad}(\vec{V}) = div(v \overrightarrow{grad}(\vec{V})) + \frac{1}{\rho} \overrightarrow{grad} p^*$</p>	\Rightarrow	<p>Champ de vitesses $\begin{cases} P^*(x, y, z, t) \\ \vec{V}(x, y, z, t) \end{cases}$</p>
<p>Equation de bilan de la grandeur transportée $\frac{\partial C_\tau}{\partial t} + \vec{V} \overrightarrow{grad} C_\tau = -div(k \overrightarrow{grad} C_\tau) + q_\tau$</p>	\Rightarrow	<p>Grandeur transportée (masse ou chaleur) $C_\tau(x, y, z, t)$</p>

Mathématiquement, ce système d'équations est bien posé. Il y a quatre équations pour les quatre inconnus p^* et $\vec{V}(u, v, w)$ et une équation pour la grandeur physique transportée, C_f . Ce système d'équations donne une description « microscopique » des phénomènes. Il décrit en détail le champ tridimensionnel des variables instantanées (donc incluant toutes les fluctuations temporelles, figure (I.2))

Ces équations peuvent être résolues pour le cas d'un écoulement laminaire. Cependant, des limitations de capacité de calcul nous empêchent de les résoudre pour des écoulements turbulents et nous obligent à faire une moyenne temporelle, afin d'éliminer les fluctuations turbulentes des variables et d'obtenir un système d'équations qui décrit l'état moyen des variables (figure I.2).

Notons que nous admettons dans ce chapitre que le champ de vitesse est connu. Dans la suite, nous nous concentrerons donc sur l'équation de bilan pour c_f .

II.3.2. Modélisation tridimensionnelle moyennée dans le temps :

L'équation de bilan moyennée dans le temps est obtenue en :

- Décomposant toutes les variables instantanées en valeur moyenne et fluctuations autour de la valeur moyenne.
- Moyennant l'équation résultante dans le temps

$$\frac{\partial c_f(t)}{\partial t} + div(c_f(t)\vec{V}(t)) = -div(-K \overrightarrow{grad} c_f(t)) + q_e(t)$$

⇓ Décomposition en valeur moyenne et fluctuations

$$\frac{\partial [\bar{c}_f + c'_f(t)]}{\partial t} + div(\bar{c}_f \bar{\vec{V}} + c'_f(t) \vec{V}'(t) + c_f(t) \bar{\vec{V}} + \bar{c}_f \vec{V}'(t)) = -div(-k \overrightarrow{grad} [\bar{c}_f + c'_f(t)]) + \bar{q}_e + q'_e(t)$$

⇓ Moyenne temporelle

$$\frac{\partial \bar{c}_f}{\partial t} + div\left(\bar{c}_f \bar{\vec{V}} + \overrightarrow{grad} c_f\right) = -div(-\overrightarrow{grad} c_f) + \bar{q}_e \dots\dots\dots(I.8)$$

Ceci est l'équation de convection-diffusion turbulente. Notons qu'aucune hypothèse ou simplification est faite dans l'élaboration de cette équation. Par rapport à l'équation pour l'état instantané, la moyenne temporelle fait apparaître le terme supplémentaire $\overline{c'_f(t)\vec{V}'(t)}$ qui représente la contribution de la turbulence au transport et mélange. Après moyenne temporelle, aucune information n'est disponible sur les fluctuations temporelles des variables, et le terme $\overline{c'_f\vec{V}'}$ apparaît comme une inconnue dans l'équation. Afin de pouvoir résoudre l'équation, ce terme doit être exprimé en fonction des variables moyennes.

Comme l'effet de la turbulence se manifeste comme une diffusion, ce terme est habituellement représenté comme couplé au terme de la diffusion moléculaire, et formellement modélisé de la même manière que la diffusion moléculaire :

$$\vec{q}_{f,turb} = -\overline{c'_f\vec{V}'} = \vec{k}_t \overrightarrow{grad} c_f \dots\dots\dots (I.9.a)$$

$$\frac{\partial \bar{c}_f}{\partial t} + \text{div}\left(\bar{c}_f \vec{V}\right) = \text{div}\left[\left(k + \vec{k}_t\right) \overrightarrow{grad} c_f\right] + \bar{q}_e \dots\dots\dots (I.9.b)$$

Le problème est maintenant ramené à la détermination de la diffusivité turbulente :

$$\vec{k}_t(k_{tx}, k_{ty}, k_{tz})$$

La diffusion turbulente modélisée au moyen des coefficients de diffusivité connus, l'équation de bilan peut être résolue. Elle s'écrit comme:

$$\frac{\partial c_f}{\partial t} + u \frac{\partial c_f}{\partial x} + v \frac{\partial c_f}{\partial y} + w \frac{\partial c_f}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k + \bar{k}_{tx} \frac{\partial c_f}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k + \bar{k}_{ty} \frac{\partial c_f}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k + \bar{k}_{tz} \frac{\partial c_f}{\partial z} \right) \dots\dots\dots (I.10)$$

Cette équation tient compte du transport et mélange par convection, diffusion moléculaire et diffusion turbulente longitudinale, transversale et verticale.

II.3.3. Modélisation unidimensionnelle moyennée dans le temps :

Une fois le mélange achevé dans toute la section, la grandeur physique se répartit encore longitudinalement. Ce phénomène se produit dans la « *far-field zone of mixing* », s'étalant sur des dizaines de kilomètres à partir d'une distance Lx= (10km) de la source. Le traitement du problème à cette grande échelle spatiale nécessite une approche unidimensionnelle.

Ceci est logique pour la concentration de la grandeur physique, qui est déjà uniformément répartie dans la section. Cependant, nous savons que la répartition de la vitesse dans la section n'est pas uniforme et contribue au transport et mélange, par le mécanisme de dispersion.

Ce mécanisme de dispersion apparaît après avoir moyenné l'équation de bilan sur toute la profondeur de l'écoulement. Partons de l'équation de bilan pour un écoulement unidimensionnel, moyennée dans le temps, $\bar{V}(u(z),0,0)$ en admettant que le mélange transversal est achevé

$$\frac{\partial c_f(z)}{\partial t} + \frac{\partial [u(z)c_f(z)]}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{k}_{tx} \frac{\partial c_f(z)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{k}_{tz} \frac{\partial c_f(z)}{\partial z} \right) \dots\dots\dots(\text{II.11})$$

Nous avons utilisé l'équation de continuité pour exprimer que $u \partial c_f / \partial z = \partial (uc_f) / \partial z$. La diffusion turbulente a été retenue, car la répartition de vitesse $u(z)$ a tendance à provoquer une répartition non-uniforme de la grandeur physique $C_f(z)$, comme illustré par la figure (II.4)

L'équation de bilan moyennée sur la profondeur de l'écoulement est obtenue en :

1. Décomposant toutes les variables instantanées en valeurs moyennées sur la profondeur de l'écoulement et déviation spatiale.
2. Moyennant l'équation résultante sur la profondeur de l'écoulement

$$\frac{\partial c_f(z)}{\partial t} + \frac{\partial [u(z)c_f(z)]}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{k}_{tx} \frac{\partial c_f(z)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{k}_{tz} \frac{\partial c_f(z)}{\partial z} \right)$$

□ \Downarrow Décomposition en valeur moyenne et déviation spatiale

$$\frac{\partial [C_f + C'_f(z)]}{\partial t} + \frac{\partial [C_f U + C'_f(z)U'(z) + C'_f(z)U + C_f U'(z)]}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{k}_{tx} \frac{\partial [C_f + C'_f(z)]}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{k}_{tz} \frac{\partial [C_f + C'_f(z)]}{\partial z} \right)$$

\Downarrow Moyenne sur la profondeur de l'écoulement

$$\frac{\partial C_f}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + \frac{\partial [C_f U + \overline{C'_f(z)U'(z)}]}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\bar{k}_{tx} \frac{\partial C_f}{\partial x} \right) + \cancel{\frac{\partial}{\partial z} \left(\bar{k}_{tz} \frac{\partial C'_f}{\partial z} \right)}$$

Après moyennage sur la profondeur, le terme $\overline{C'_f U'}$ apparaît comme une inconnue dans l'équation. Afin de résoudre l'équation, ce terme doit être exprimé en fonction des variables moyennées sur la profondeur.

Comme l'effet de la répartition de vitesse se manifeste comme une diffusion, ce terme est habituellement représenté comme couplé au terme de la diffusion turbulente longitudinale et formellement modélisé de la même manière :

$$\vec{q}_{disp} = -\overline{C'_f U'} = K_x \overrightarrow{grad} C_f$$

$$\frac{\partial C_f}{\partial t} + \frac{\partial C_f U}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[(k_{tx} + k_x) \frac{\partial C_f}{\partial x} \right]$$

Le mélange dispersif étant complètement déterminé par la répartition de vitesse, une expression théorique peut être obtenue, pour le coefficient de dispersion K_x , selon Taylor comme :

$$K_x = K_x(U', \overline{k_{tz}}) = -\frac{1}{h} \int_0^h \frac{U'(z)}{\overline{k_{tz}}} \int_0^z \int_0^z U'(z) dz dz dz$$

Le profil logarithmique typique pour l'écoulement uniforme unidimensionnel donne lieu à une valeur de :

$$K_x = 5.86 u_* h \quad k_{tx} = 0.23 u_* h$$

Pour des cours d'eau naturels irréguliers, des valeurs ont été mesurées de l'ordre de :

$$140 (K_x / (u_* h)) < 500$$

Nous en déduisons que la diffusion turbulente longitudinale est négligeable par rapport à la dispersion.

Pour quelques cas particuliers, des solutions analytiques du problème de dispersion existent. Elles sont résumées dans le tableau II.2.

Tableau II.2 : Quelques solutions analytiques pour la dispersion longitudinale (GRAF W. H., ALTINAKAR M.S., 2008)

	<p>Injection surfacique instantanée d'une masse M_0</p> $C(x,t) = \frac{M_0}{\sqrt{4\pi k_x t}} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{4k_x t}\right] \quad (12)$
	<p>Injection surfacique à temps fini T d'une masse M_0</p> $C(x,t) = \sum_{i=1}^n \Delta C_i(x,t)$ $\Delta C_i(x,t) = \frac{m_i}{S\sqrt{4\pi k_x (t-\tau_i)}} \exp\left[-\frac{[x-U(t-\tau_i)]^2}{4k_x (t-\tau_i)}\right] \quad (13)$
	<p>Injection surfacique continue d'une concentration C_0</p> $C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left(\frac{Ux}{k_x}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x-Ut}{\sqrt{4k_x t}}\right) \right] \quad (14)$

Pour le cas de l'injection instantanée, la matière M_0 se déplace à la vitesse moyenne U de l'écoulement et, en même temps, s'étale selon une courbe gaussienne-normale. En utilisant la définition de la variance, σ_x^2 , la solution s'écrit alors:

$$C(x,t) = \frac{M_0/S}{\sqrt{4\pi K_x t}} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{4K_x t}\right] = \frac{M_0/S}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left[-\frac{(x-Ut)^2}{2\sigma_x^2}\right] \quad \text{Avec} \quad \sigma_x^2 = 2K_x t$$

Par définition de la courbe gaussienne-normale, 95% de la matière est contenue dans une largeur de nuage de 4σ . La variance $\sigma_x^2 = 2K_x t$ est donc une mesure pour l'étalement de la matière, qui peut être utilisée pour déterminer expérimentalement le coefficient de dispersivité K_x :

$$K_x = \frac{1}{2} \frac{\partial \sigma_x^2}{\partial t} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_x^2(t_2) - \sigma_x^2(t_1)}{t_2 - t_1}$$

$\sigma_x^2(t_1)$ et $\sigma_x^2(t_2)$ sont les variances longitudinales des courbes $C(x)$, à deux temps différents, t_1 et t_2 . La mesure de cette variance nécessiterait des mesures de concentration simultanément dans plusieurs stations le long du cours d'eau, ce qui est difficile dans la pratique. Fisher (1966) a démontré

que $\sigma_x^2 \approx U^2 \sigma_t^2$. $\sigma_t^2(x_1)$ et $\sigma_t^2(x_2)$ sont les variances temporelles des courbes $C(t)$, dans deux stations différentes x_1 et x_2 . Ces variances temporelles $\sigma_t^2(x)$ sont beaucoup plus facile à mesurer que les variances spatiales $\sigma_x^2(t)$ Nous estimons donc le coefficient de dispersivité par :

$$K_x = \frac{1}{2} U^3 \frac{\sigma_t^2(x_2) - \sigma_t^2(x_1)}{x_2 - x_1}$$

a. Application :

L'eau d'une profondeur de $h = 1.0$ m, se trouve immobile, $\vec{V} = 0$ dans un canal rectangulaire dont la largeur est $B = 2.0$ m. Une quantité de sel (NaCl) de $M_0 = 2$ kg ; qui est libérée à la station $x = 0.0$ m, se répartit instantanément sur toute la section du canal.

Déterminer l'évolution temporelle : i) de l'étalement longitudinal de la matière

ii) de la concentration maximale. Dessiner ensuite

iii) la répartition de la concentration après un temps $t_R = 10^7$ s

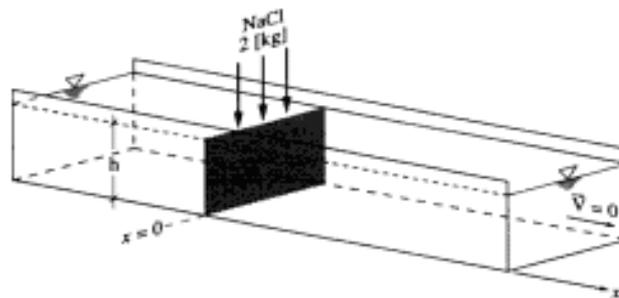


Figure (II.6) : Injection d'une quantité de sel sur une section $x = 0$, d'un canal rectangulaire

b. Solution :

En absence de mouvement et de turbulence, la diffusion est moléculaire. Il s'agit ici d'un problème de diffusion pure, unidimensionnelle selon x , d'une source surfacique instantanée. L'étalement de la concentration moyenne de la section $C(x, t)$, se calcule selon l'équation :

$$C(x, t) = \frac{M_1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

Avec la variance σ_x^2 , donnée par :

$$\sigma_x^2(t) = 2k_x t$$

La diffusivité moléculaire du sel (NaCl) dans l'eau est de

$$k_x = 1.24 \times 10^{-5} \text{ (cm}^2/\text{s)}$$

i) l'étalement longitudinal de cette matière, exprimé par la variance σ_x^2 . se calcule ainsi :

$$\sigma_x^2 = 2(1.24 \times 10^{-5}) t$$

Ensuite, la largeur du nuage est approximativement donnée par :

$$W = 4 \sigma_x$$

Sur le tableau ci-après, on présente l'évolution temporelle de l'écart type, σ_x et $4 \sigma_x$ qui croient avec la racine du temps \sqrt{t} .

On voit que l'évolution temporelle est très lente ; le nuage aura une largeur de $W=0.63\text{m}$ après $t=107\text{s}=115.7\text{j}$.

Tableau II.3 : les valeurs de la variance, la largeur de nuage et la concentration en fonction du temps

T	0(s)	$10^5(\text{s})=27.77$ (h)	10^7 (s)=115.7 (j)	$10^9(\text{s})=32$ ans
σ_x (m)	0	0.016	0.157	1.575
W (m)	0	0.063	0.63	6.300
Cmax (kg/m ³)	∞	25.53	2.53	0.25

ii) La concentration maximale, qui reste toujours à l'origine = 0 se calcul l'équation suivante :

$$C_{\max}(t) = C(0,t) = \frac{M_1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} X1$$

Avec la source surfacique instantanée donnée par l'équation suivante :

Ce qui permet d'écrire :

$$M_1 = \frac{M_0}{S} = \frac{M_0}{hB} = \frac{2}{1 \times 2} = 1 [\text{Kg} / \text{m}^2]$$

$$C_{\max}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} = \frac{0,399}{\sigma_x} [\text{Kg} / \text{m}^3]$$

Sur le tableau ci-dessus, on présente l'évolution temporelle de la concentration maximale, C_{\max} , qui varie avec l'inverse de l'écart type, $1/\sigma_x$, c-à-d avec $1/\sqrt{t}$.

La concentration C est ici la concentration en masse volumique définie par :

$$C = \text{masse de substance/volume de mélange (kg/m}^3\text{)}$$

Un autre type de concentration, la concentration en volume définie par :

$$C = \text{volume de substance/volume de mélange (m}^3\text{/m}^3\text{)}$$

Peut être calculée ensuite on prend la concentration maximale : $C_{\max} = 2.53$ (kg/m³) et la densité du sel : $\rho_s = 2200$ (kg/m³)-comme :

$$C_v = \frac{1}{\rho_s} C = \frac{1}{2200} 2,53 = 1.15 * 10^{-3} [-]$$

La densité du mélange sel/eau utilisant les mêmes valeurs est

$$\rho_m = \rho_{H_2O} + (\rho_s - \rho_{H_2O})C_v = 1000 + (2200 - 1000) 1.15 * 10^{-3} = 1001.4 [kg / m^3]$$

Ou on voit que $\rho_m \approx \rho_{H_2O} = \rho$.

iii) la répartition de la concentration est donnée par l'éq suivante :

$$C(x,t) = \frac{M_1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right)$$

Pour $t_x=107(s)$, quand l'écart type est de $\sigma_x= 0.157(m)$ et pour $M1=1(kg/m^2)$ cette relation s'écrit comme suit :

$$C(x,t_R) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}0.157} \exp\left(-\frac{x^2}{2 \times 0.157^2}\right) = 2.54 \exp\left(-\frac{x^2}{0.049}\right)$$

En attribuant différentes valeurs à x, on peut obtenir le tableau ci-dessous.

X(m)	-0.5	-0.4	-0.3	-0.2	-0.1	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
C(kg/m ³)	0.015	0.096	0.4	1.12	2.07	2.54	2.07	1.12	0.4	0.06	0.015

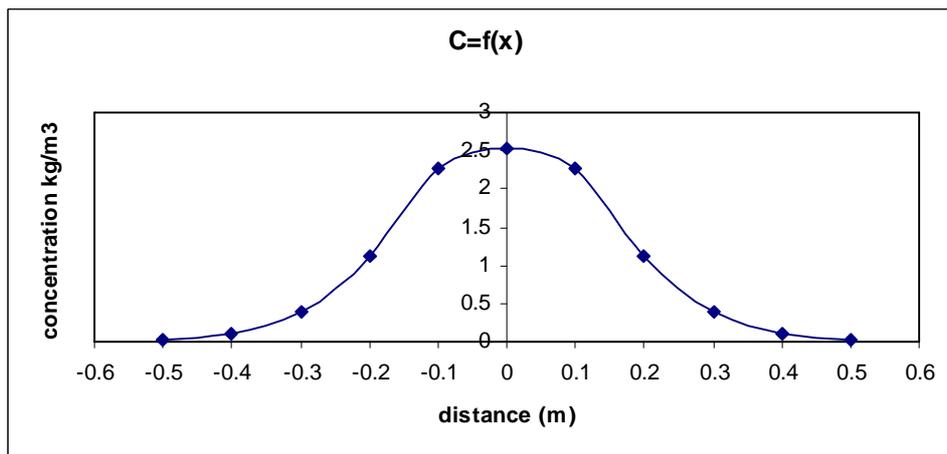


Figure (II.8) : la concentration calculée dans différentes sections du canal rectangulaire

II.4.Transport avec réaction et pouvoir auto-épurateur des cours d'eau :

II.4.1 Transport avec réaction :

Dans ce qui précède, nous avons considéré le transport et le mélange des grandeurs physiques passives. Considérons maintenant le cas de transport et mélange des substances réactives, où le mélange est le siège d'une transformation dans sa composition. Nous définissons le terme q_e , qui représente les sources internes (réaction chimique ou biologique, changement de phase, transfert à travers le périmètre). Nous nous limiterons à la modélisation la plus simple des réactions du premier ordre :

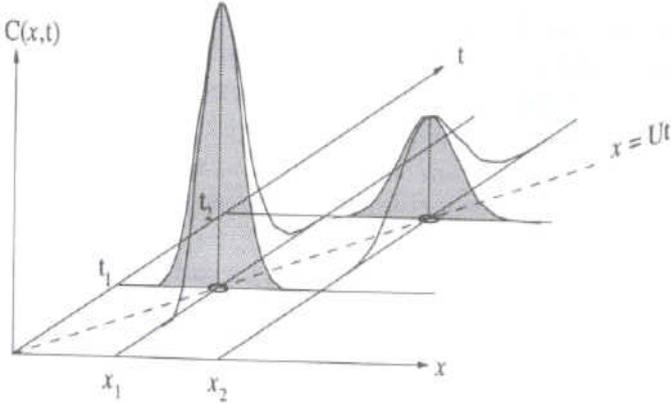
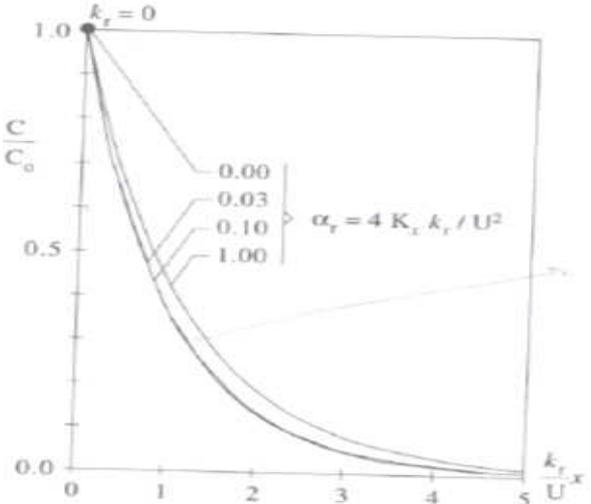
$$q_e = \pm k_r C$$

k_r [1/s] est un coefficient constant de réaction de la substance dans le mélange. Il paramètre le taux avec lequel une substance augmente (+) ou diminue (-) par réaction.

Limitons nous aux cas où la grandeur physique est déjà uniformément répartie sur toute la section, l'équation de convection-dispersion s'écrit alors :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) \pm k_r C$$

Tableau II.4: Solutions analytiques pour deux cas de transport avec réaction (GRAF W. H., ALTINAKAR M.S., 2008)

<p>Injection instantanée d'une substance active M_0 sur toute la section</p> $\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \pm k_r C$  $C(x,t) = \frac{M_0 / S}{\sqrt{4\pi k_x t}} \exp \left[-\frac{(x - Ut)^2}{4k_x t} \pm k_r t \right]$	<p>Etat permanent ($t \rightarrow \infty$) après l'injection continue d'une concentration C_0 d'une substance active dans toute la section.</p> $\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = K_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \pm k_r C$  $\frac{C(x,t)}{C_0} = \exp \left\{ -\frac{k_r x}{U} \frac{2}{\alpha_r} \left[\left(\sqrt{\alpha_r + 1} - 1 \right) \right] \right\}$
---	---

<p>Avec $\int_{-\infty}^{+\infty} C(x,t)dx = \frac{M_0}{S} \exp(\pm k_r t)$</p> <p>ce qui quantifie la variation de la masse totale de la substance due à la section.</p>	<p>Avec $\alpha_r = 4k_x k_r / U^2$</p> <p>Pour $\alpha_r \ll 1$</p> $\frac{C(x, t_\infty)}{C_0} = \exp\left(-\frac{k_r x}{U}\right)$ <p>Ceci est le cas pour des réactions lentes (k_r petit), qui provoquent des gradients faibles, $\partial C / \partial x$, telles que le mélange par dispersion soit négligeable ($\sim \partial^2 C / \partial x^2$)</p> <p>Notons que le coefficient de réaction peut expérimentalement être estimé dans ce cas :</p> $k_r = -\frac{U}{x} \ln \frac{C(x)}{C_0(x=0)}$
--	---

II.4.2. Pouvoir auto-épurateur des cours d'eau :

Considérons maintenant le pouvoir auto-épurateur des cours d'eau en étudiant la qualité des eaux à l'aval d'un rejet continu des eaux usées par une station d'épuration (figure I.9). Notons que nous nous limitons à une théorie simplifiée.

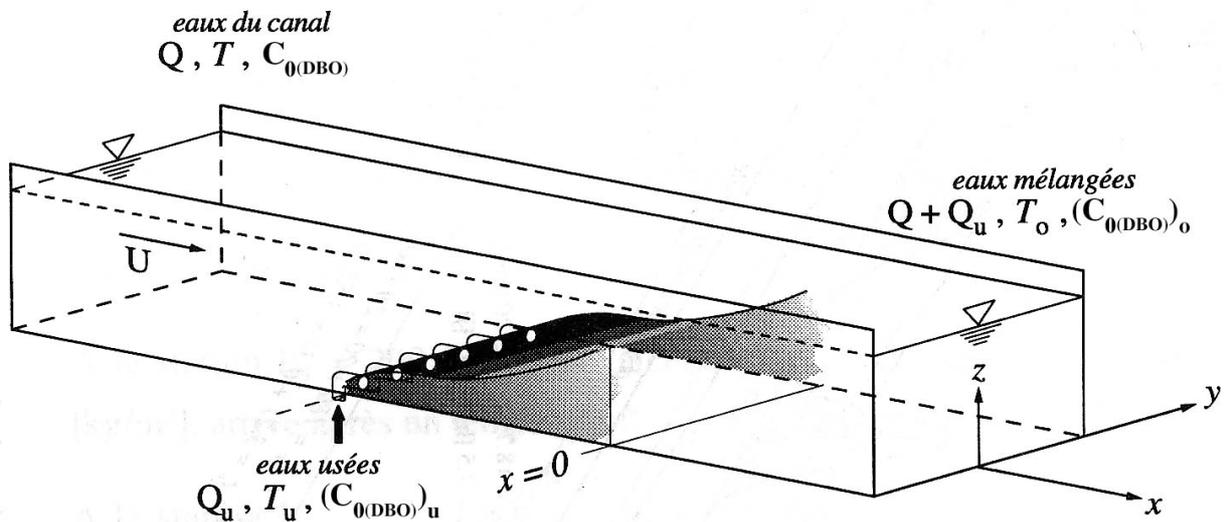


Figure (II.9) : Illustration schématique d'un rejet continu des eaux usées par une station d'épuration

De l'eau propre est saturée en oxygène dissous tandis que de l'eau polluée est caractérisée par un déficit en oxygène dissous. La qualité des eaux est déterminée par le transport réactif d'oxygène dans l'eau, paramétré par le coefficient de réaction $k_r \sim 0.1 [\text{jr}^{-1}] = 10^{-6} [\text{s}^{-1}]$

Deux mécanismes dominent le bilan d'oxygène dissous dans les cours d'eau. L'oxygénation

biochimique de la matière organique est son puits principal et la réoxygénation à travers la surface est sa source principale. Ces deux mécanismes sont décrits dans ce qui suit. .

II.4.2.1. Oxygénation biochimique de la matière organique, $C_{(DBO)}$:

Des micro-organismes épurateurs assurent la dégradation de certains polluants non conservatifs d'origine organique par réaction biochimique dans les cours d'eau. Pour effectuer cette tâche, ces micro-organismes consomment de l'oxygène dissous, qui est leur source principale d'énergie.

La quantité d'oxygène que (les micro-organismes dans) l'eau peut absorber est un critère important de pollution et de qualité des eaux. Elle est appelée la demande biochimique en oxygène, en abrégé DBO ou $C_{(DBO)}$.

Dans le cours d'eau, $C_{(DBO)}$ évolue temporellement de la même manière pendant qu'il est convecté.

$$U \frac{\partial C_{(DBO)}}{\partial x} = -k_r (C_{(DBO)})$$

$$\Rightarrow C_{(DBO)}(x) = C_{0(DBO)} \exp\left(-k_r \frac{x}{U}\right)$$

Connaissant les débits et demandes biochimiques en oxygène du cours d'eau en amont du rejet, Vers l'aval, l'oxygénation biochimique tend à diminuer la concentration en oxygène dissous.

II.4.2.2. Réoxygénation :

La réoxygénation de l'eau dans le cours d'eau se fait essentiellement par transferts gazeux de l'atmosphère vers l'eau qui sont favorisés par le vent, les vagues et le renouvellement constant de l'eau à la surface.

Nous nous limitons à une modélisation basique, qui exprime le taux de réoxygénation comme une réaction du premier ordre proportionnelle au déficit en oxygène de l'eau du cours d'eau :

$$U \frac{\partial C_{(OD)}}{\partial x} = k_a (C_{s(OD)} - C_{(OD)})$$

Où la concentration de saturation, $C_{s(OD)}$ [mg/l] est une fonction qui décroît avec la température :

Le coefficient de réaction dépend du volume de l'eau participant au transfert et de la surface de contact entre l'air et l'eau. Fair et al. (1968) ont proposé la formule empirique :

$$k_a \cong 5U / R_h^{5/3} [j^{-1}]$$

Selon cette modélisation, la réoxygénation augmente la concentration d'oxygène dissous comme :

$$C_{(OD)} - C_{0(OD)} = (C_{s(OD)} - C_{0(OD)}) \left(1 - \exp\left(-k_a \frac{x}{U}\right)\right)$$

La solution pour l'évolution de la teneur en oxygène dissous dépend de deux paramètres, définis à l'endroit du rejet :

- La demande biochimique en oxygène des eaux mélangées, $C_{0(DBO)}$, qui est un critère pour la qualité des eaux mélangées. Elle représente la quantité d'oxygène nécessaire pour épurer les eaux.

- La quantité d'oxygène dissous dans l'eau, paramétrée par le déficit d'oxygène dissous, $C_{S(OD)}$ "

$C_{0(OD)}$.

La solution est représentée par une courbe en sac, appelée aussi courbe de fléchissement de l'oxygène dissous (angl : dissolved-oxygen sac). À l'aval du rejet, l'oxygénation biochimique est le mécanisme dominant et la teneur en oxygène dissous diminue encore, causant une dégradation de la qualité des eaux. Comme le déficit en oxygène dissous croît, la réoxygénation à travers la surface augmente progressivement et finalement devient plus importante que l'oxygénation biochimique.

Notons ainsi que d'autres paramètres entrent en jeu influencent le pouvoir auto épuratoire d'un cours d'eau (voir chapitre I)

Chapitre III

Revue bibliographique

Chapitre III : Revue bibliographique

III-1 Introduction :

Les problèmes de transport des matières dans les cours d'eau qui sont d'actualité ont depuis longtemps constitué l'une des préoccupations majeures des chercheurs. A titre d'exemple, dès l'année 1855, M. Adolphe Fick publiait un premier papier sur le processus de diffusion moléculaire.

Depuis cette période, plusieurs recherches ont été menées afin d'améliorer les modèles déjà mis en place ou bien d'en établir d'autres. Ces recherches ont permis d'approfondir les connaissances sur les phénomènes de dispersion ainsi leurs modélisations. Mais la plus part de ces modèles sont basées sur des hypothèses simplificatrices en ne tenant compte que des phénomènes prépondérant. Ainsi les résultats obtenus sont parfois très loin de la réalité.

Dans ce chapitre, nous allons étudier un certains nombres de travaux effectués afin d'en ressortir les lacunes qui existent encore en terme de simulation numérique de transport de polluant dans les rivières.

III-2 Travaux de M.K. Yoo, S.W. Cho, et K.S. JUN :

Le professeur K.S JUN et ses collaborateurs M. K. Yoo et S.W. Cho ont présenté une méthode numérique sur la dispersion d'un polluant non conservatif dans un ruisseau naturel (Yoo, Cho, Jun, 2000).

Le modèle est basé sur la discrétisation par différences finies de l'équation de dispersion longitudinale de la substance non conservative en monodimensionnel en la subdivisant en trois équations qui sont :

- L'équation de l'advection pure ;
- L'équation du taux de diminution de la concentration due à certaines réactions ;
- L'équation de la diffusion pure.

A chaque pas de temps, les trois équations sont résolues respectivement par le schéma de Houx-Preissmann, par une solution analytique locale, et par le schéma de Crank- Nicholson et c'est en prenant le 1/3 du pas de temps pour chaque équation.

L'équation de la dispersion longitudinale du contaminant non conservative dans un canal est exprimée par:

$$\frac{\partial(AC)}{\partial t} + \frac{\partial(UAC)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left[D_L A \frac{\partial C}{\partial x} \right] - k_r AC \dots\dots\dots(III.1)$$

Dans laquelle C(x, t) : concentration de masse ;

A(x, t) : section transversale du canal ;

U(x, t) : vitesse moyenne d'écoulement suivant la direction x ;

D(x, t) : coefficient longitudinal de dispersion ;

K : coefficient lié à la diminution ou à l'augmentation du polluant ; x : coordonnées suivant la direction longitudinale et t : temps.

En utilisant l'équation de continuité, l'équation (III.1) a été réduite sous la forme suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k_r C \quad \dots\dots\dots(III.2)$$

$$U = u - \left[\frac{\partial D_L}{\partial x} + \frac{D_L}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right] \quad \dots\dots\dots(III.3)$$

La subdivision dans le temps de l'équation (III.2) pour séparer les processus physiques mis en jeu c.-à-d., l'advection du mouvement moyen, le taux de diminution de la concentration due à certaines réactions, et la dispersion dans l'écoulement est donnée comme suite :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + 3u \frac{\partial C}{\partial x} = 0 \quad , \quad n \Delta t \leq t \leq (n + \mathbf{1/3}) \Delta t \quad \dots\dots\dots (III. 4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -3k_r C, \quad \left(n + \frac{1}{3} \right) \Delta t \leq t \leq (n + 1) \Delta t \quad \dots\dots\dots (III. 5)$$

$$\frac{\partial C}{\partial t} = 3D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad \left(n + \frac{2}{3} \right) \Delta t \leq t \leq (n + 1) \Delta t \quad \dots\dots\dots (III. 6)$$

L'Avantage de la méthode de séparation est que les schémas numériques les plus appropriés pour chaque équation peuvent être appliquées pour simuler exactement le processus physique correspondant. Ainsi, le schéma de Houx-Preissmann a été utilisé pour résoudre l'équation (III.4). Une solution analytique locale a été utilisée pour résoudre l'équation (III. 5) ; cette solution analytique est donnée par :

$$C_i^{n+2/3} = C_i^{n+1/3} e^{-k_r t} \quad \dots\dots\dots (III.7)$$

Enfin, l'équation (III.6) est résolue par le schéma de Manivelle- Nicholson

III-2.1 Application du modèle :

Le modèle est appliqué à l'étude de l'accident du déversement de phénol qui s'est produit sur le fleuve Nakdong en Corée du Sud le 14 mars 1991. (Yoo, Cho, Jun, 2000).

Un tronçon de longueur 340 kilomètres du fleuve Nakdong a été modélisé. La limite amont est le barrage d'Andong, et la limite aval est la barrière d'Estuarien de Nakdong où les décharges et le niveau de la surface de l'eau sont connues (figure III.1). Neuf stations de mesure du niveau de l'eau sont installées sur le tronçon principal du fleuve.

Les observations du niveau d'eau relevé au niveau de ces stations sont utilisées pour le calage du modèle d'écoulement. Parmi les treize affluents, les débits affluents de quatre sont connus. Le modèle d'écoulement se compose d'un total de 15 noeuds situés au niveau des frontières amont et aval, et au niveau de la jonction des différents apports.

Un total de 744 points de maillages situés à des intervalles inégaux a été utilisé. La distance moyenne entre les points de maillage est de 420 mètres.

Des mesures du niveau d'élévation de la surface de l'eau pendant l'accident ont été examinées. On a constaté que le niveau du tronçon principal et des différents affluents était sensiblement constant pendant cette période. Puisque les variations de débits du barrage en amont étaient également négligeables pendant l'accident, toutes les conditions d'un écoulement stable étaient alors réunies. Pour estimer les apports des affluents non mesurés, il a été supposé que leurs apports sont proportionnels à la surface de la ligne de partage des eaux. La relation linéaire, $Q_{\text{affluent}} = 0.13A_d$, entre l'apport de l'affluent (QT) et la section (A_d) a été estimée par une analyse de régression en utilisant les données de débits mesurés des affluents.

III-2.2 Application du modèle de dispersion :

L'accident du déversement de phénol s'est produit au bout 10 h. le 14 mars 1991. Pendant les huit premières heures, trente tonnes de phénol ont été déchargées dans le fleuve Nakdong.

Le modèle de la dispersion longitudinale pour un polluant non - conservatif a deux paramètres : le coefficient de la dispersion longitudinale D_L , et le coefficient de réaction k_r .

Beaucoup d'études expérimentales sur des canaux ont été effectuées pour mesurer le coefficient de dispersion longitudinale. Plusieurs formules empiriques de D_L ont été suggérées.

Les auteurs de cette étude ont utilisé quatre formules pour déterminer le coefficient de dispersion longitudinale. Ces formules sont données dans les équations (III. 8) à (III. 11) proposées respectivement par McQuivey et Keefer (1974), Liu (1977), Iwasa et Aya (1991), et Seo et Cheong (1998).

○ Formule de McQuivey et Keefer : $D_L = 0,058 \frac{HU}{S_{ox}}$ (III. 8)

○ Formule de Liu (1977) : $D_L \beta \frac{U^2 b^2}{Hu_*}$ avec, $\beta = 0,18 \left(\frac{U}{u_*}\right)^{1,5}$ (III. 9)

○ Formule de Iwasa et Aya (1977) : $\frac{D_L}{Hu_*} = 2 \left(\frac{b}{H}\right)^{1,5}$ (III.10)

○ Formule de Seo et Cheong (1998) : $\frac{D_L}{Hu_*} = 5,915 \left(\frac{b}{H}\right)^{0,620} \left(\frac{U}{u_*}\right)^{1,428}$ (III.11)

Où, H : profondeur de l'eau, b : largeur du canal, sox : pente du canal, et u* : vitesse de cisaillement.

D'une manière générale, le coefficient de dispersion est modélisé à partir de la géométrie du canal et des caractéristiques de l'écoulement.

La figure III.2 représente les distributions temporelles de la concentration au niveau de la station de Susan, simulées avec le modèle de dispersion en utilisant les trois équations empiriques du coefficient de dispersion.

On voit que la distribution obtenue avec l'équation de McQuivey et de Keefer est bien conforme à celle de Seo et de Cheong. Le coefficient de réaction kr est nul dans les calculs. En outre, il a été observé que le temps d'arrivée est court lorsqu'on utilise l'équation de Liu.

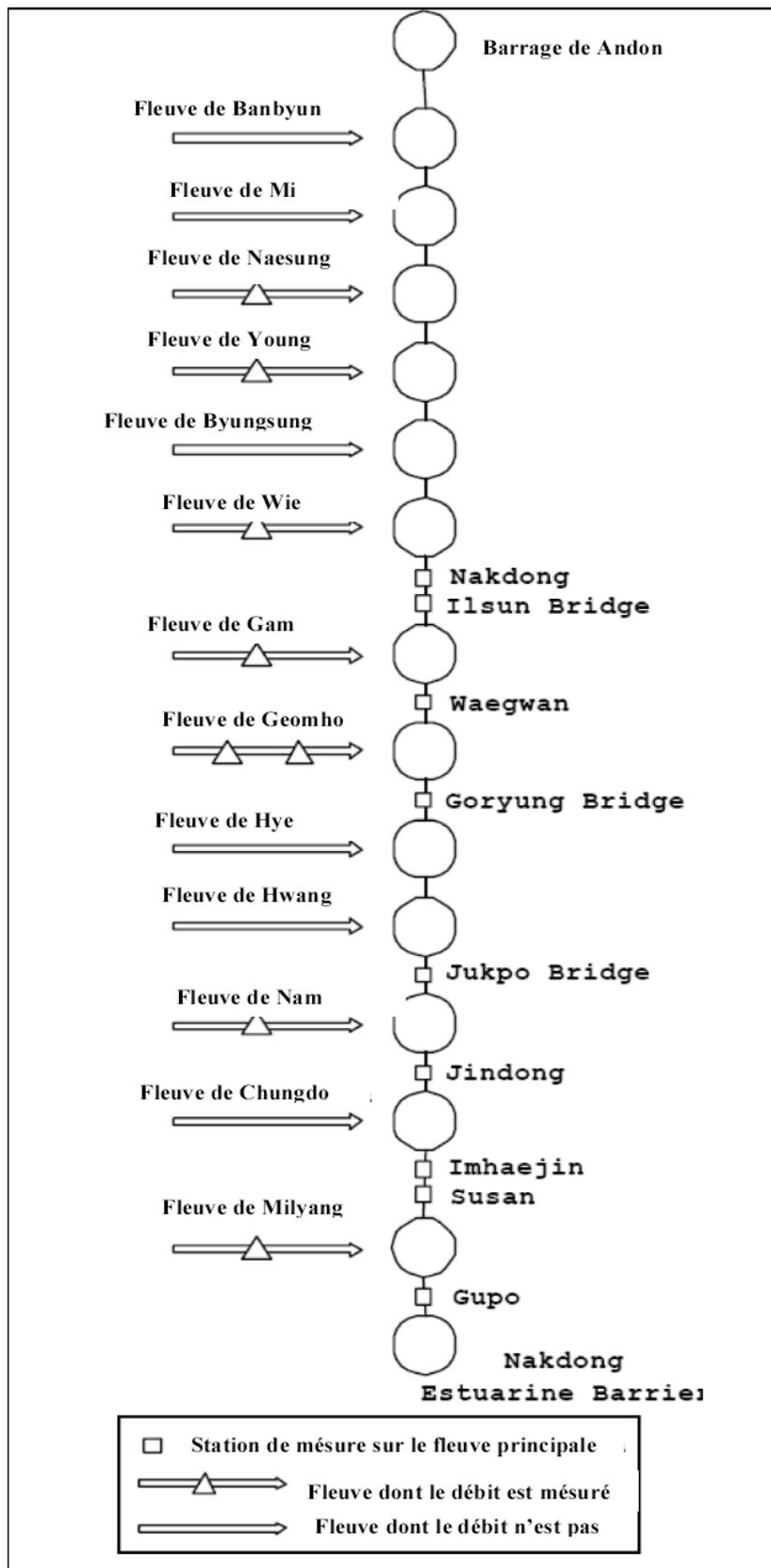


Figure III.1 : Schéma de la zone d'étude

La figure III.1 donne les distributions de concentration simulée pour la même position mais avec un coefficient de réaction $k_r = 0.51$ tonne/jour.

Des observations ont été faites à huit positions différentes le long de la rivière. Cependant, aucune d'elles n'était continue. Comme le montrent la figure III.2 et la figure III.3, si $k_r = 0.51/\text{jour}$, la concentration est réduite pour d'environ 10 %. Bien que k_r n'affecte pas la forme de la distribution de concentration, les valeurs de la concentration dépendent de ce coefficient de manière significative.

Le coefficient k_r a été estimé en utilisant les données issues des observations.

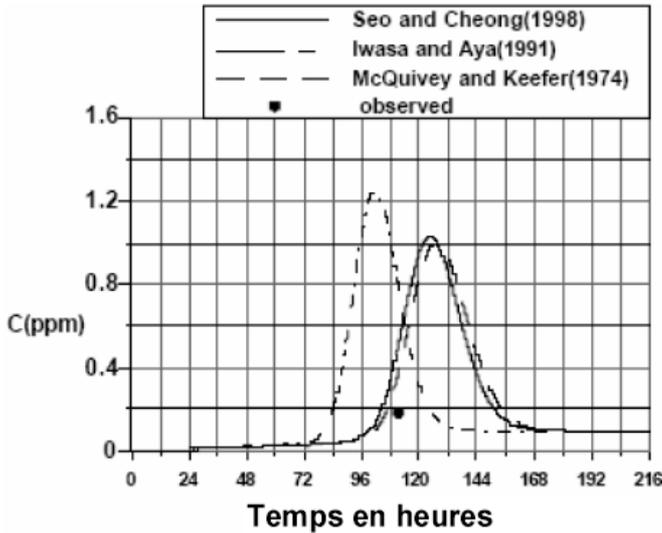


Figure III.2 : Variation temporelle de la Concentration pour $k_r=0$

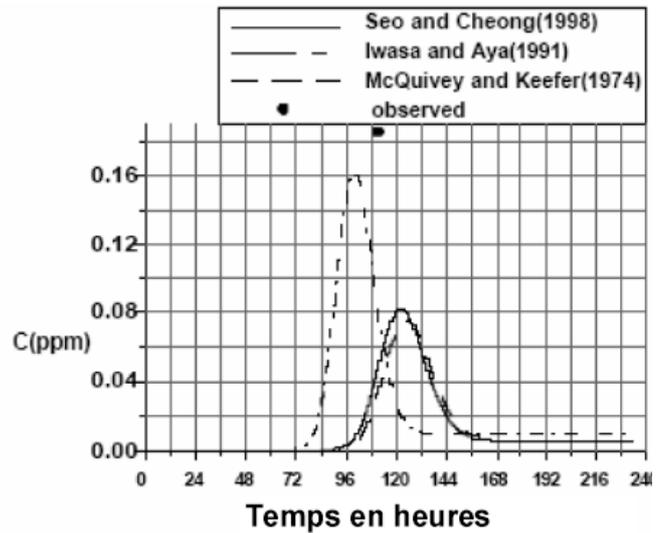


Figure III .3 : Variation temporelle de la concentration pour $k_r=0,5$

III-3. Travaux de R. L.Runkel :

Les travaux de Monsieur R. L. Runkel réalisés en 1997 à l'USGS portent sur le phénomène du transport d'un corps dissout non conservatif (Runkel, 1997).

Il a considéré un système dans lequel le transport physique est principalement unidimensionnel ; le processus de mélange suivant la direction verticale et horizontale a été négligée de sorte que les concentrations changent seulement dans la direction longitudinale. En outre, un champ régulier et uniforme d'écoulement est imposé et les effets de la dispersion sont constants dans l'espace. Enfin, tous les processus biogéochimiques sont décrits en termes de réactions chimiques où le taux de transformation est proportionnel à la concentration en corps dissous. En tenant compte de ces hypothèses, la conservation de la masse donne l'équation d'advection - dispersion à paramètres constants avec réaction.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k_r C \dots\dots\dots(III.12)$$

où, C : concentration [ml^{-3}] ; t : temps [T] ; U : vitesse d'écoulement [LT^{-1}] ; x : distance [L] ;

D_L : coefficient de dispersion [$\text{L}^2 \text{T}^{-1}$] et k_r : coefficient de réaction.

Plusieurs solutions analytiques ont été proposées ; mais ces solutions concernent soit le cas d'une source instantanée, soit le cas d'une source continue mais à durée infinie. Le but principal des travaux de Runkel est de parvenir à proposer une solution analytique pour une source continue à durée limitée.

III-3.1 Source continue :

Pour le cas d'une source continue infinie, les conditions aux limites et les conditions initiales sont données comme suite :

$$C(x, 0) = 0 \quad \text{pour } x \geq 0 \quad \dots\dots\dots \text{(III.13)}$$

$$C(0, t) = C_0 \quad \text{pour } t \geq 0 \quad \dots\dots\dots \text{(III.14)}$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad \text{pour } t \geq 0 \quad \dots\dots\dots \text{(III.15)}$$

Où, C_0 est la concentration initiale [ml^{-3}].

Pour le cas de corps dissous conservateurs ($k_r = 0$).

La solution analytique est donnée par :

$$C(X;t) = \frac{C_0}{2} \left[\operatorname{erfc} \left(\frac{X - Ut}{2\sqrt{D_L t}} \right) + \exp \left(\frac{U \cdot X}{D_L} \right) \operatorname{erf} \left(\frac{X + Ut}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad \dots\dots\dots \text{(III.16)}$$

En utilisant la transformation de Laplace, la solution analytique pour un corps dissous non conservative ($k_r \neq 0$) est donnée comme suite :

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp \left\{ \frac{U \cdot x}{2D} [(1 - \Gamma)] \right\} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - U \cdot t \cdot \Gamma}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) + \exp \left\{ \frac{U \cdot x}{2D} (1 + \Gamma) \right\} \operatorname{erfc} \left(\frac{x + U \cdot t \cdot \Gamma}{2\sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \quad \dots \text{(III.17)}$$

$$\text{Où, } \Gamma = \sqrt{1 + 2B_b} \quad \dots\dots\dots \text{(III.18)}$$

$$B_b = \frac{2k_r D_L}{U^2} \quad \dots\dots\dots \text{(III.19)}$$

En posant les hypothèses selon lesquelles les termes $(x + Ut)$ sont relativement petits par rapport aux autres termes l'équation (III.17) devient :

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp \left\{ \frac{Ux}{2D_L} [(1 - \Gamma)] \right\} \operatorname{erfc} \left(\frac{x - Ut\Gamma}{2\sqrt{D_L t}} \right) \right] \quad \dots\dots\dots \text{(III.20)}$$

L'équation (III.20) peut être encore simplifiée en notant que pour B_b petit (de l'ordre de 0.0025), Γ peut être rapproché comme suite $\Gamma \approx 1 + H$ (O'Loughlin and Bowmer, 1975) :

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left(\frac{-k_r x}{U}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x - Ut\{1 + B_b\}}{2\sqrt{D_L t}}\right) \right] \dots\dots\dots(III.21)$$

Cette dernière expression a été introduite par O'Loughlin et Bowmer (1975) afin de déterminer le coefficient k_r à partir des données de terrain.

III-3.2 Source continue de durée τ :

Bien que les solutions ci-dessus soient utiles, un problème plus important est celui dans lequel une source continue est présente pendant une période finie ; τ représente la durée de la source continue [T], l'état initial et les états aux limites sont donnés par :

$$C(x, 0) = 0 \quad \text{Pour } x \geq 0 \quad \dots\dots\dots (III.22)$$

$$C(0, t) = C_0 \quad \text{Pour } \tau \geq t \geq 0 \quad \dots\dots\dots (III.23)$$

$$C(0, t) = 0 \quad \text{Pour } t > \tau \quad \dots\dots\dots(III.24)$$

$$C(\infty, t) = 0 \quad \text{Pour } t \geq 0 \quad \dots\dots\dots (III.25)$$

Une solution analytique pour les conditions données ci-dessus a été développée par Rose (1977). Rose a correctement appliqué le principe de la superposition à (III.21), en déterminant une solution analytique approximative. Pour $t \leq \tau$, la solution est donnée par (III.21). Pour $t > \tau$, la solution est :

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \exp\left(\frac{-k_r x}{U}\right) \left[\operatorname{erfc}\left\{\frac{x - Ut(1 + B_b)}{2\sqrt{D_L t}}\right\} - \operatorname{erfc}\left\{\frac{x - U(t - \tau)(1 + B_b)}{2\sqrt{D_L (t - \tau)}}\right\} \right] \dots\dots\dots (III.26)$$

A cause des hypothèses précédemment émises, l'équation (III.26) ne représente qu'une solution analytique approximative pour le problème actuel. Une solution analytique exacte peut être obtenue en appliquant le principe de la superposition à la solution analytique originale (III.17) pour une source continue de durée infinie. Ainsi la solution pour $t \leq t$ est donnée par (III.17).

Pour $t > \tau$, le principe de la superposition, nous donne :

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left\{\frac{Ux}{2D_L}(1-\Gamma)\right\} \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{x-U\Gamma}{2\sqrt{D_L t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x-U(t-\tau)\Gamma}{2\sqrt{D_L (t-\tau)}}\right) \right\} + \exp\left\{\frac{Ux}{2D_L}(1+\Gamma)\right\} \left\{ \operatorname{erfc}\left(\frac{x+U\Gamma}{2\sqrt{D_L t}}\right) - \operatorname{erfc}\left(\frac{x+U(t-\tau)\Gamma}{2\sqrt{D_L (t-\tau)}}\right) \right\} \right] \dots(III.27)$$

L'équation (III.27) constitue une solution analytique approchée pour une source continue à durée finie d'un polluant actif.

III-3.3 Résultats – conclusions :

Une source continue avec une durée de deux heures ($\tau = 2$ heures) est appliquée tels que la concentration à la limite amont est de 100 unités de concentration ($C_0 = 100$ unité de concentration). La vitesse d'écoulement et le coefficient de dispersion sont fixes (à 0.1m/s et à 5.0 m²/s) et les paramètres D/U_x et B varient en fonction de la distance (x) et du taux d'affaiblissement k . Une analyse des erreurs commises en faisant la différence entre la solution exacte (III.27) et la solution approchée (III.26) a été effectuée.

Des résultats de l'application précédente présentés graphiquement dans les figures III .4a et III.4b montrent les résultats de la variation de la concentration en fonction du temps d'un corps dissous conservateur ($k_r = 0$) aux positions $x = 100\text{m}$ et $x = 2000$ m.

Les figures III .4.c et III.4d donnent la variation de la concentration d'un corps dissous non conservative ($k_r = 10,4$) à $x = 100\text{m}$ et $x = 2000$ m.

Dans les deux cas, les erreurs sont dues aux hypothèses simplificatrices où certains termes ont été négligés par rapport à d'autres.

D'une manière générale, les erreurs liées à l'utilisation de la solution analytique approximative diminuent avec l'augmentation de la distance pour un corps dissous conservateur (D/U_x diminue) et augmentent avec l'augmentation de k_r pour un corps dissous non conservative.

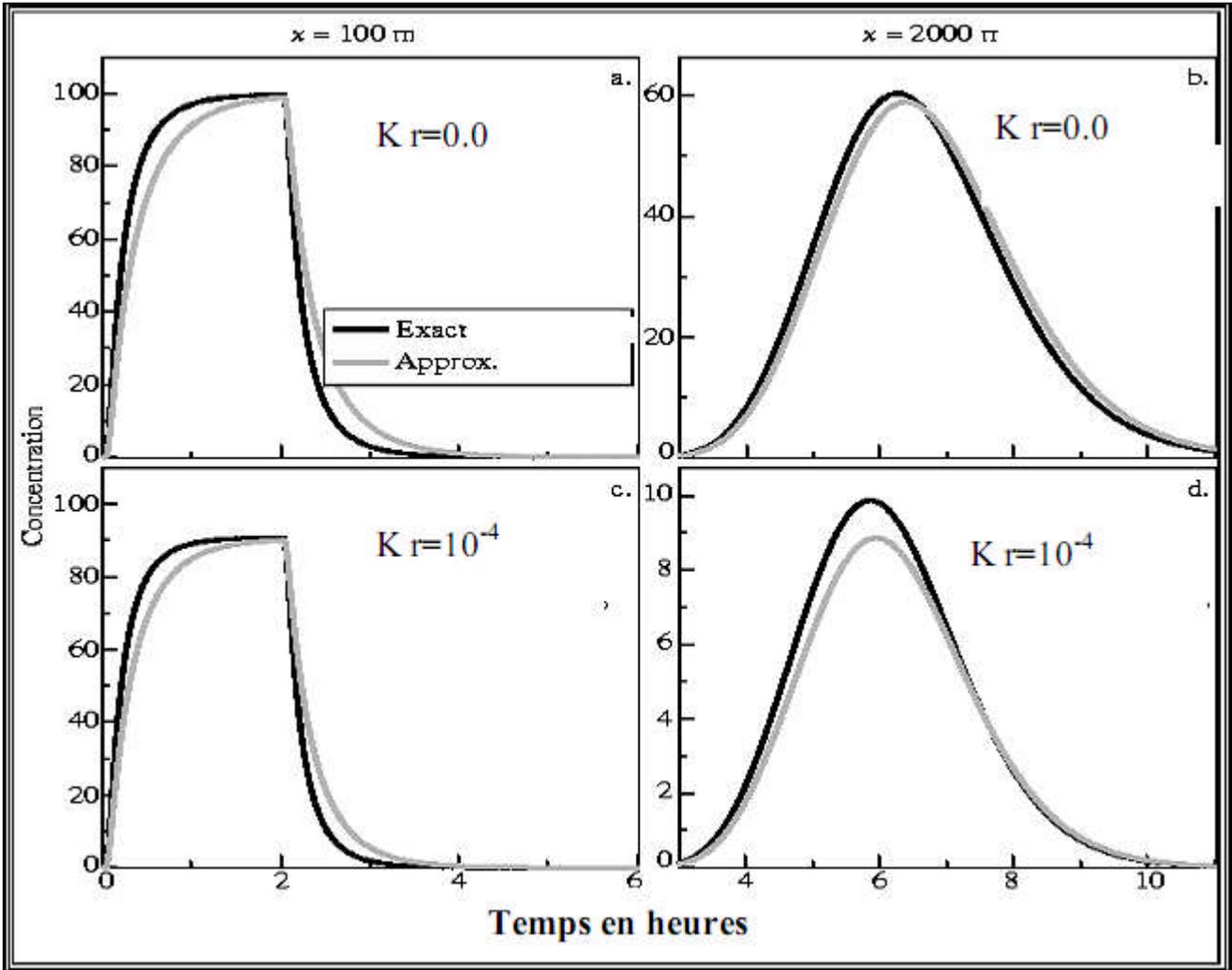


Figure III.4: Solutions analytiques exactes et approximatives.

III-4 Travaux de Y Ramsis Fares :

Les travaux de Y Ramsis Fares portent sur le transport des polluants dans les réservoirs et les fleuves (Fares, 1998).

Dans ce travail, il a d’abord étudié les propriétés de la dispersion dans un réservoir, afin de proposer un modèle de simulation de la dispersion dans un cours d’eau.

Pour le cas du réservoir, il a utilisé l’approche du bilan de matière en utilisant le modèle de la zone morte pour aboutir à une formulation générale lui permettant d’estimer les variations de concentrations d’un corps dissout en fonctions du temps. Cette approche est basée sur l’hypothèse selon laquelle, la dispersion longitudinale est dominée par les effets de la zone morte (nous ne présentons pas les résultats pour le cas du réservoir car notre but dans ce chapitre est d’étudier certains travaux effectués sur la dispersion des polluants dans les rivières ou les canaux).

Pour la modélisation du processus de dispersion, l’équation de transport a été établie comme suite:

$$\frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial t} = -V_e \text{grad}C + \text{div}(D_t \text{grad}C) \dots\dots\dots (III.28)$$

Avec, $V_e = (u, v, w)$: vecteur de champ de vitesse où les composantes (u, v, w) représentent la vitesse dans la direction longitudinale x , dans la direction latérale y et dans la direction verticale z ;

$D_t = (D_x, D_y, D_z)$ = coefficient de dispersion spatiale.

L'équation (III.28) peut être écrite sous la forme suivante:

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} = -U \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C(x, t)}{\partial x^2} + S \dots\dots\dots (III.29)$$

Où, D_L : coefficient de dispersion longitudinale; S :terme source qui peut entraîner une diminution ou une augmentation de la concentration.

Dans l'Equation (III.29), on suppose que $O(v, w) \ll O(u)$, par conséquent leurs contributions dans le phénomène d'advection ont été ignorées. En connaissant les conditions initiales et les conditions aux limites, une solution analytique exacte pour $C(x, t)$ est donnée par:

$$C(x, t) = \frac{1}{K} \frac{\rho_s F U}{Q \sqrt{4 \rho_s D_L t}} \exp \left[-\frac{(x - Ut)^2}{4 D_L t} \right] \left(1 - K_0 \frac{x}{Ut} \right) \dots\dots\dots (III.30)$$

Où, ρ_s : densité du corps dissous ; K : facteur de dispersion; K_0 : coefficient expliquant la diminution du corps dissous dans le fleuve due à la végétation, les zones mortes, ou bien les matières en suspension.

L'équation (III30), ne peut être appliquée que dans des sections où le mélange est entièrement développé.

Notons que la réussite d'un modèle de dispersion est étroitement liée à une bonne modélisation du coefficient de dispersion.

Plusieurs formules ont été développées pour déterminer le coefficient de dispersion.

Une expression pour D_L lié à l'écoulement d'un fleuve est donnée par:

$$D_L = \frac{BQ^2}{UR^3} \quad \text{avec, } B = 0,18 \left(\frac{U_*}{U} \right)^{3/2} \dots\dots\dots(III.31)$$

Où, R : rayon hydraulique et U_* , la vitesse de frottement.

En utilisant une équation modélisant le frottement, par exemple l'équation de Manning, la formule de D_L a été simplifiée comme suite:

$$D_L = \left(S_{ox}^{0,75} n \right) \left[U^{-1,5} R^{-2,92} Q^2 \right] \dots\dots\dots (III.32)$$

Où, n: coefficient de rugosité de Manning et S_{ox} la pente de lit du fleuve.

L'équation (III.32) est en bon accord avec d'autres formules rapportées dans la littérature.

Enfin, la mise en application du modèle ainsi établi a été appliquée pour surveiller la qualité des eaux dans le fleuve de Waikato en Nouvelle Zélande. Un traceur a été utilisé et plusieurs mesures ont été effectuées.

Les résultats sont résumés sur les courbes de la figure III.5 et III.6

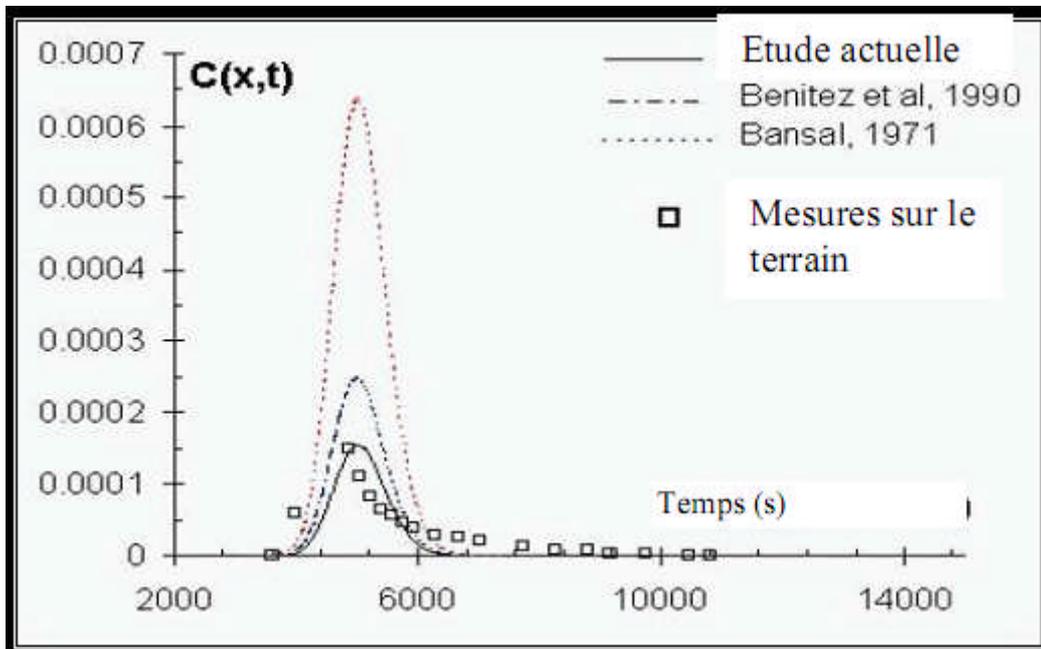


Figure III.5: Profils de Concentration dans le fleuve de Waikato à proximité de la source

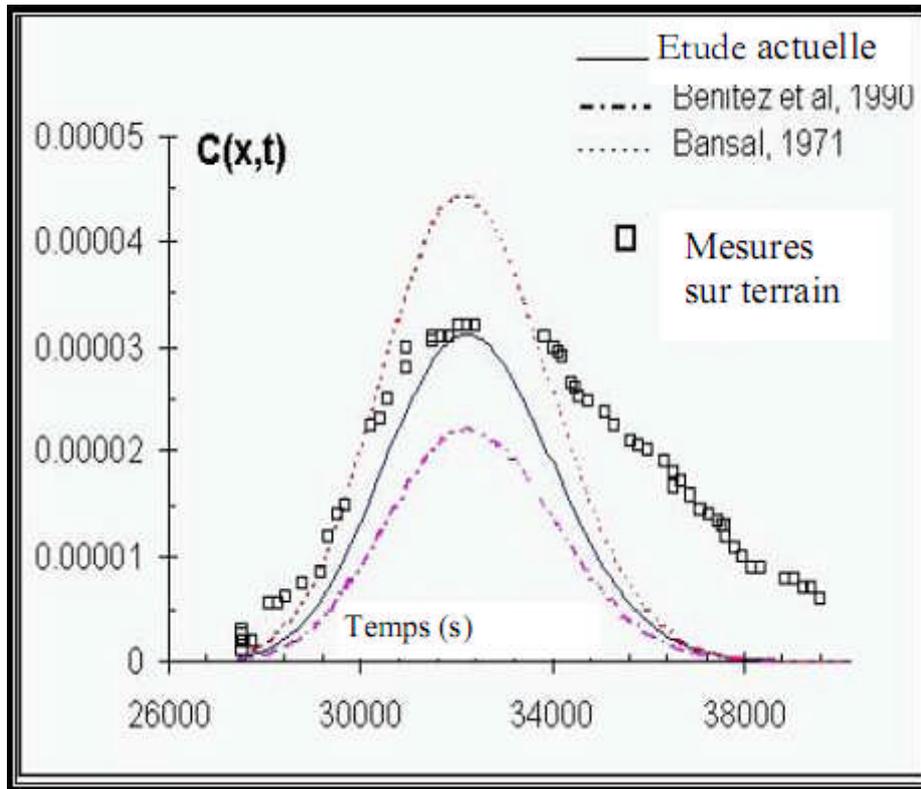


Figure III. 6 : Profils de Concentration dans le fleuve de Waikato dans Une zone éloignée de la source.

De l'analyse des résultats, une concordance raisonnablement bonne a été trouvée entre les profils calculés à partir du modèle proposé, et des mesures sur le terrain pour des situations de champs proches et de champs lointains.

III-5. Travaux de Bernhard H. Schmid, M.ASCE :

Ces travaux réalisés au cours de l'année 2004 portent sur la modélisation du transport d'un polluant dans les rivières (Bernhard, 2004). Deux modèles sont utilisés :

Le modèle de la zone morte qui considère que dans une rivière les substances transportées sont retardées dans une zone appelée zone morte avant de poursuivre leur parcours et la méthode d'advection-diffusion.

Le but principal de ces travaux était de recueillir des données à partir des expériences des traceurs dans une rivière et à partir des caractéristiques géométriques de la rivière et de l'écoulement, de simuler les valeurs mesurées en utilisant le modèle de la zone morte et celui de l'advection-diffusion.

Ensuite une étude comparative des deux méthodes est effectuée afin d'en déterminer des critères d'applications des deux méthodes.

Les critères du terme de l'indice de **Damköhler** (DaI) et le coefficient d'obliquité, G_t , ont été examinés, et une application à un cas réel a été effectuée.

III-5.1 Principes fondamentaux et méthodologies :

Le transport longitudinal de corps dissous dans les rivières avec des zones mortes peut être modélisé au moyen du modèle de la zone morte qui, pour un corps dissous conservateur dans un trajet est montré sur la figure III.7 ci, après.

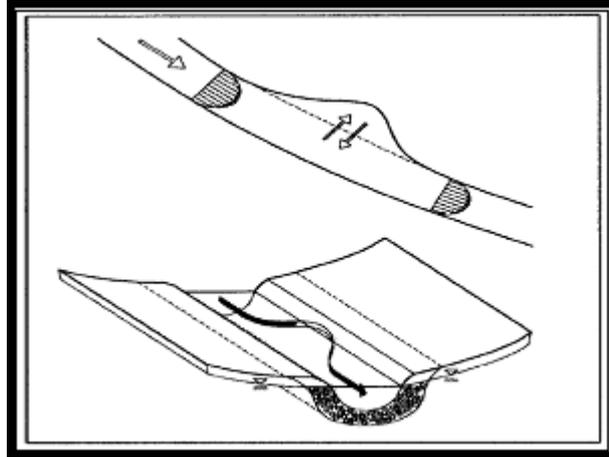


Figure III.7 : Illustration des mécanismes de la zone morte

Les équations du transport de ce modèle sont données comme suite:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \epsilon_e T_e^{-1} \cdot (C_s - C) \quad \dots\dots\dots (III.33)$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = T_e^{-1} \cdot (C - C_s) \quad \dots\dots\dots (III.34)$$

Où, C est la concentration moyenne dans le tronçon principal de la rivière; Cs est la concentration moyenne dans la zone morte; U est la vitesse d'écoulement; DL est le coefficient dispersion longitudinale; x est la coordonnée dans le sens de l'écoulement; t est le temps; ζe est le rapport du volume de la zone de stockage par unité longueur au volume de la rivière par unité de longueur; Te est le paramètre d'échange lié au temps de rétention de la de zone morte.

Physiquement, la zone morte est montrée sur la figure III-7.

Au temps t0, la masse M0 de traceur est injectée instantanément à x0, et la concentration du traceur dans la section principale de la rivière est nulle ainsi que celle dans les zones mortes avant l'injection.

Comme condition limites, nous avons:

$$\frac{\partial C}{\partial x} \rightarrow 0 \quad \text{pour } x \rightarrow +\infty \quad \dots\dots\dots (III.35)$$

A partir d'une approche stochastique, une solution semi analytique peut être obtenue, donnée comme suite:

$$C(x, t) = \frac{M_0}{A_u} \left[f_F(t) e^{-k_1 t} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{k_1^n}{n!} \int_0^t f_F(\mu) \mu^n e^{-k_1 \cdot \mu} \gamma_n(t - \mu) d\mu \right] \dots\dots (III.36)$$

Avec, μ : variable d'intégration;

$$k_1 = \varepsilon_e T_e^{-1}; \dots\dots\dots (III.37)$$

$$k_2 = T_e^{-1}; \dots\dots\dots (III.38)$$

$$f_F(t) = \frac{U}{\sqrt{4\pi D_L t}} \exp \left[-\frac{(x - ut)^2}{4 \cdot D_L t} \right] \dots\dots\dots (III.39)$$

$$\gamma_n(t - \mu) = \frac{k_2^n (t - \mu)^{n-1} e^{-k_2 \cdot (t-\mu)}}{(n - 1)!} \dots\dots\dots (III.40)$$

Le modèle d'advection, dispersion est donnée par:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \dots\dots\dots (III.41)$$

L'équation (III.36) en tenant compte des conditions initiales et des conditions aux limites a pour solution analytique:

$$f_F(t) = \frac{M_0}{A \sqrt{4 \cdot \pi \cdot D_L t}} \exp \left[-\frac{(x - ut)^2}{4 D_L t} \right] \dots\dots\dots(III.42)$$

La procédure adoptée dans cette étude comporte les étapes suivantes :

- Les valeurs des paramètres du transport sont choisies dans une large gamme: vitesse d'écoulement (m/s): $u = 0.10, 0.50,$ et 3.0 ; coefficient de dispersion longitudinale (m^2/s) : $D_L = 0.10$ et 10.0 ; coefficient de rapport du volume de la zone morte par unité de longueur au volume de la rivière par unité de longueur: $\varepsilon_e = 5, 10, 20,$ et 200% ; temps de séjour de la zone mort : $T_e = 100, 2.000.$ et $20.000s$; et, enfin la longueur d'extension : $L = 100m, 1$ kilomètre, et 10 kilomètres.

Cette étude est axée vers les petites rivières ($D_L < 10 m^2/s$), et les paramètres donnés ci, dessus peuvent être appliqués à beaucoup de situations rencontrées sur le terrain.

Les équations du modèle de la zone morte (III.33) et (III.33) sont résolus après évaluation de l'équation (III.33) ou (dans certains cas) par le transformé de la **Laplace** basée sur la technique mentionnée précédemment. La masse injectée est de 10 kilogrammes dans toutes les directions.

- Les courbes obtenues à partir du modèle de la zone morte et du modèle de l'advection–diffusion sont tracées sur le même graphe afin d'en effectuer une étude comparative.

Il est normal d'admettre une certaine dépendance des mesures d'erreur sur l'indice de Damköhler DaI , définie par:

$$Dal = \frac{L(1 + \epsilon_e)}{u.T_e} = \frac{L/[u/(1 + \epsilon_e)]}{T_e} \dots\dots\dots (III.43)$$

Un exemple de comparaison entre les courbes obtenues à partir du modèle de la zone morte et de l'advection, diffusion est montrée sur la figure III.8

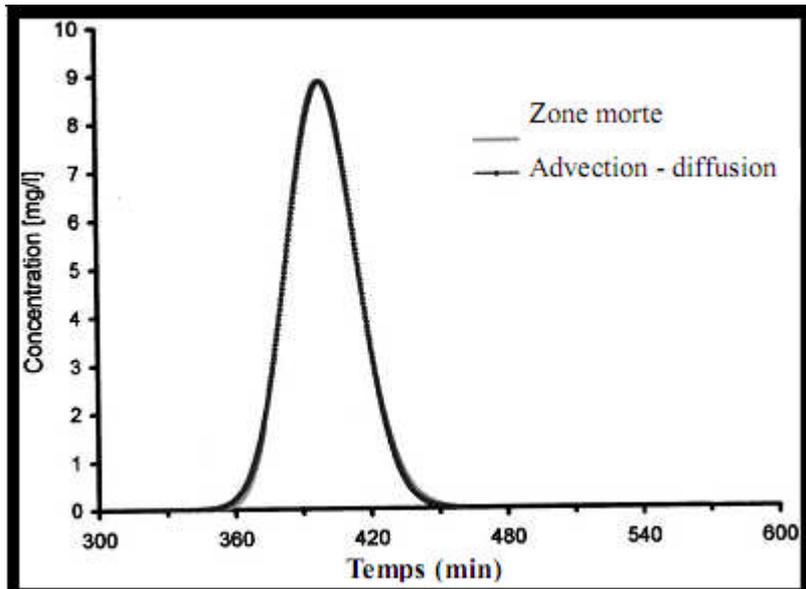


Figure III.8: Courbe du modèle de la zone morte et du modèle d’advection, diffusion (pour $u= 0.50\text{m/s}$; $K= 0.10\text{m}^2/\text{s}$; $\epsilon = 20\%$; $T= 100\text{s}$; $L=10.000\text{m}$; $DaI =240$).

III-5.2 Application:

Les résultats théoriques dérivés précédemment ont été appliqués à des cas réels. Ainsi, une expérience de traceur de sel entreprise par des auteurs sur une distance de 500 m de la rivière de Mödling, qui est une petite rivière de la Basse Autriche, a été réalisée le 1 mars 2002. Le traceur utilisé était NaCl, avec une injection instantanée de 3.377 kilogrammes de Cl ; l’expérience a été effectuée près du site de Mödling, Aquädukt. Des concentrations en chlorure ont été mesurées au moyen des mesures de conductivité qui ont été converties au laboratoire pour estimer les concentrations correspondantes.

La méthode des moments a été utilisée (Seo et Cheong 2001) pour estimer les paramètres de transport, avec le résultat : $U = 0.295 \text{ m/s}$, $DL = 0.0\text{m}^2/\text{s}$, $\epsilon_e = 34.4\%$, et $T = 107\text{s}$;

Par conséquent, l'indice de Damköhler a été calculé comme suite:

$$DaI = \frac{L / [u / (1 + \epsilon_e)]}{T_e} = \frac{500 / [0.295 / 1.344]}{107} = 21.1$$

Pour qu'il ait conformité entre le modèle de la zone morte et le modèle de l'advection-diffusion un second critère peut être utilisé donnée par : $Gt \leq 1.0$

A partir des données expérimentaux, on obtient $Gt = 0.91$.

La figure III.9 montre une comparaison des résultats des différents modèle avec les valeurs suivantes: concentration maximale du modèle Advection, Diffusion est égale à 35.4mg/l à $t = 36 \text{ minutes}$ après l'injection.

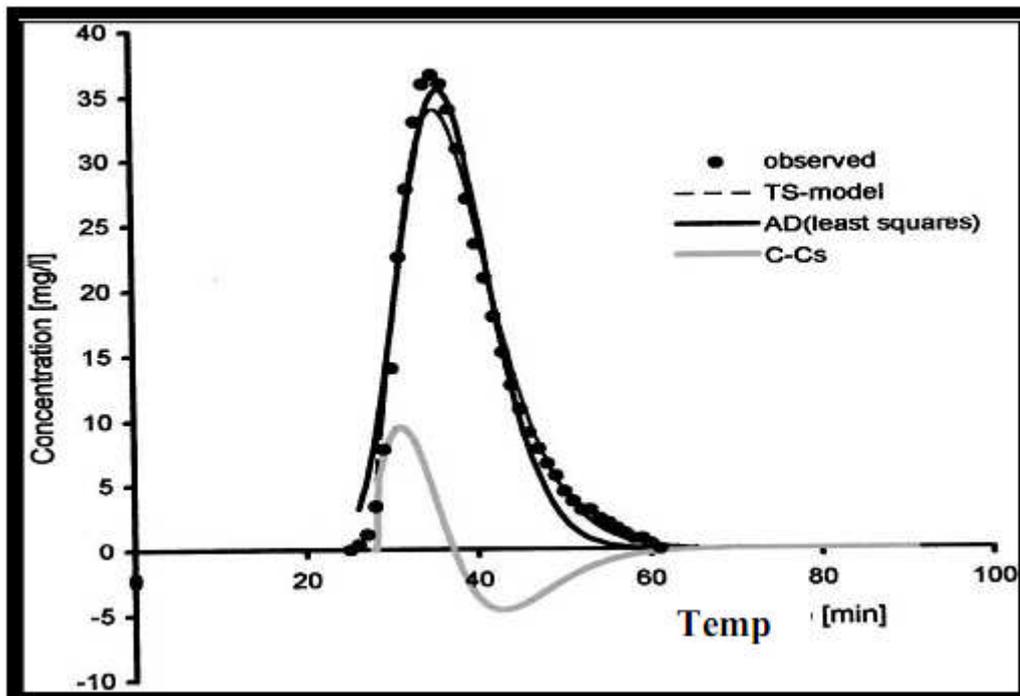


Figure III.9: Modèle d'advection-diffusion et celui de la zone morte représentant les données de la rivière de Mödling pour $DaI = 21.1$.

Enfin, cette étude montre que pour les critères $DaI \leq 0.6$ et $DaI \geq 60$ et $Gt \leq 1.05$ et $Gt \geq 5.5$ on observe une bonne concordance entre le modèle de l'advection-diffusion et le modèle de la zone morte.

III-6. Travaux de FERDI L. HELLWEGER :

Les travaux de **FERDI** portent sur les techniques de mesure et de modélisation de la dispersion des polluants dans les eaux à surfaces libres (FERDI, 2005). Pour cela, des études expérimentales ont été réalisées sur plusieurs rivières.

Dans ces expériences, des injections instantanées des traceurs ou des polluants ont été effectuées et l'étude de certains accidents sur des rivières a été aussi mentionnée dans ces travaux.

Pour chaque cas, une étude comparative entre les résultats obtenus à partir des mesures et les résultats obtenus à partir des simulations a été effectuée.

Dans cette étude, le modèle de la zone morte a été utilisé.

III-6.1 Techniques de mesure de la dispersion à partir des traceurs :

Les traceurs sont employés pour mesurer la dispersion. Un grand nombre de traceurs est disponible et plusieurs facteurs devraient être considérés pour leur choix tels que:

- Détectabilité;
- Niveau de concentration de fond ;
- Toxicité;
- Esthétique;
- Coût;
- Propriétés et devenir du traceur.

III-6.2 Technique de modélisation :

- Modélisation de la dispersion unidimensionnelle

Le devenir et le transport d'une substance dissoute dans une eau à surface libre unidimensionnelle sont régis par l'équation d'advection – dispersion donnée comme suite:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} = D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + k_r C \quad \dots\dots\dots (III.44)$$

Où, C(x,t): concentration de masse ; U(x,t): vitesse moyenne d'écoulement suivant la direction x;
D_L(x, t): coefficient de dispersion longitudinale ; k_r: coefficient lié à la diminution ou à l'augmentation du polluant; x: coordonnées suivant la direction longitudinale et t : temps.

Pour le cas idéalisé (c'est, à, dire le canal uniforme et l'écoulement constant) et une entrée instantanée du polluant, l'équation peut être résolue comme suite :

$$C(x, t) = \frac{M}{2A\sqrt{\pi D_L t}} e^{-\frac{(x-Ut)^2}{4D_L t} - k_r t} \quad \dots\dots\dots (III.45)$$

Où, M [g] est la masse à l'entrée et A [m²] la section droite. L'équation est très intéressante, mais souvent les hypothèses faites sur la section et l'écoulement introduisent des erreurs inacceptables.

Pour cette raison des solutions numériques à l'équation III.44 sont souvent utilisées. En utilisant un schéma aux différences finies, on obtient:

$$C_i^{t+\Delta t} = C_i^t + \left[Q_{i-1} C_{i-1}^t - Q_{i,i+1}^t C_i - \frac{D_{L_{i-1,i}} A_{i-1,i}}{L_{i-1,i}} (C_i^t - C_{i-1}^t) - \frac{D_{L_{i,i+1}} A_{i,i+1}}{L_{i,i+1}} (C_i^t - C_{i+1}^t) - k_r V_{0i} C_i^t \right] \frac{\Delta t}{V_{0i}}$$

.....(III.46)

Où, i: le numéro du point de calcul; Q [m³s⁻¹]: le débit, Lm [m]: la longueur de mélange et Vo [m³] : le volume.

III-6.3 Modélisation de la zone morte en mono-dimensionnelle :

Le stockage passager des traceurs ou des polluants dans des zones appelées zone mortes où les processus sont 2D ou 3D, est fondamental dans le phénomène de transport.

Ainsi en tenant compte de l'influence de la zone morte, l'équation III.44 est modifiée pour aboutir à l'équation suivante :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -U \frac{\partial C}{\partial x} + D_L \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - k_r C + \frac{\epsilon_e}{T_e} (C_s - C) \quad \text{..... (III.46)}$$

$$\frac{\partial C_s}{\partial t} = T_e^{-1} (C - C_s) \quad \text{..... (III.47)}$$

Où, C est la concentration moyenne dans le tronçon principal de la rivière; Cs est la concentration moyenne dans la zone morte; U est la vitesse d'écoulement; DL est le coefficient dispersion longitudinale; x est la coordonnée dans le sens de l'écoulement ; t est le temps; εe est le rapport du volume de la zone de stockage par unité longueur au volume de la rivière par unité de longueur ; Te est le paramètre d'échange lié au temps de rétention de la de zone morte.

Comme pour l'équation de l'Advection –Diffusion, la discrétisation des équations du modèle de la zone morte sont données comme suite:

$$C_i^{t+\Delta t} = C_s^t + \left[\begin{array}{l} Q_{i-1,i} C_{i-1}^t - Q_{i,i+1}^t C_i - \frac{D_{L_{i-1,i}} A_{i-1,i}}{L_{i-1,i}} (C_i^t - C_{i-1}^t) \\ - \frac{D_{L_{i,i+1}} A_{i,i+1}}{L_{i,i+1}} (C_i^t - C_{i+1}^t) - k_r V_{0i} C_i^t + \frac{\epsilon_i}{T_i} V_{0i} (C_{s,i}^t - C_i^t) \end{array} \right] \frac{\Delta t}{V_{0i}} \quad \text{..... (III.48)}$$

$$C_i^{t+\Delta t} = C_{S_i}^t + \left[-k_r V_{S_i} C_{S_i}^t + \frac{1}{T} V_{S_i} (C_i^t - C_{i-1}^t) \right] \frac{\Delta t}{V_{0S_i}} \dots\dots\dots (III.49)$$

III-6.4 Application :

III-6.4.1 Fleuve de Hudson (New York):

Le 25 Juillet 2001 environ 4.3 moles de SF₆ ont été délibérément déversés de manière instantanée dans le fleuve de Hudson par Ho et al (2001) en utilisant le modèle ECOMSED développé par Blumberg et al. (2004).

Les courbes obtenues à partir des données mesurées et des données simulées sont présentées dans la figure III.10.

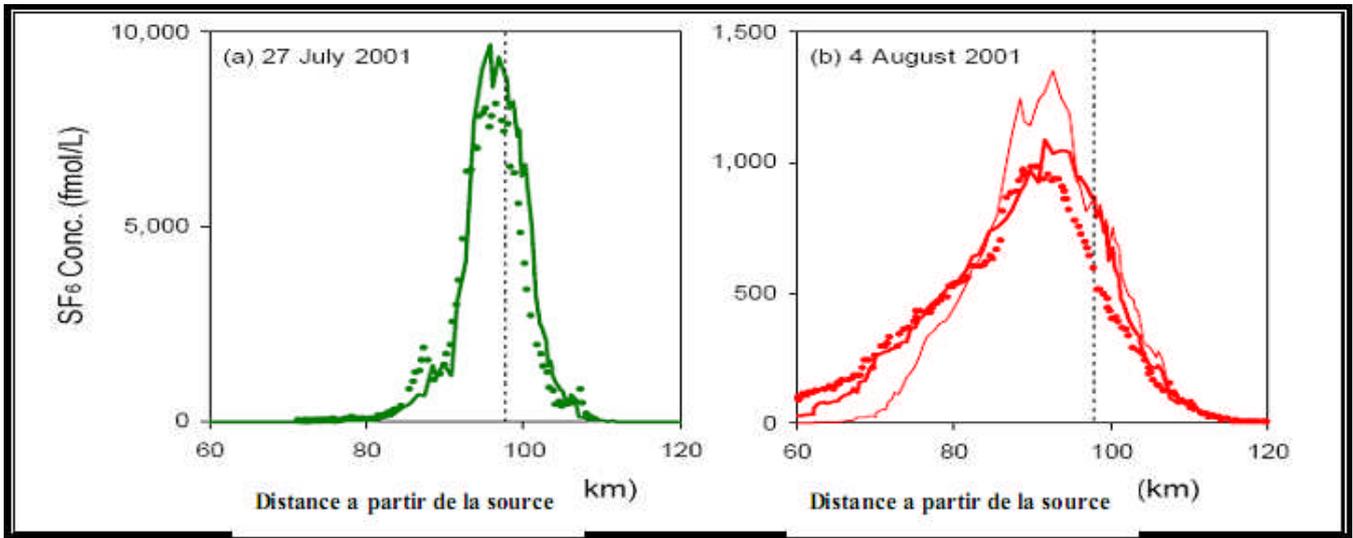


Figure III.10: Variation des concentrations mesurées (représentées par les pointes) et des concentrations simulées (représentées par les lignes) de SF₆ dans le fleuve Hudson.

III-6.4 .2 Fleuve de Vent-Wind-Bighorn (Wyoming):

Le 21 Mars et le 29 juin 1971 environ 3.8 kilogrammes de rhodamine avaient été injecté dans le fleuve de Wind- Bighorn et plusieurs stations de mesures ont été installées en avale.

Les courbes obtenues à partir des données de mesures et des données simulées à différentes localités sont présentées sur la figure III.11.

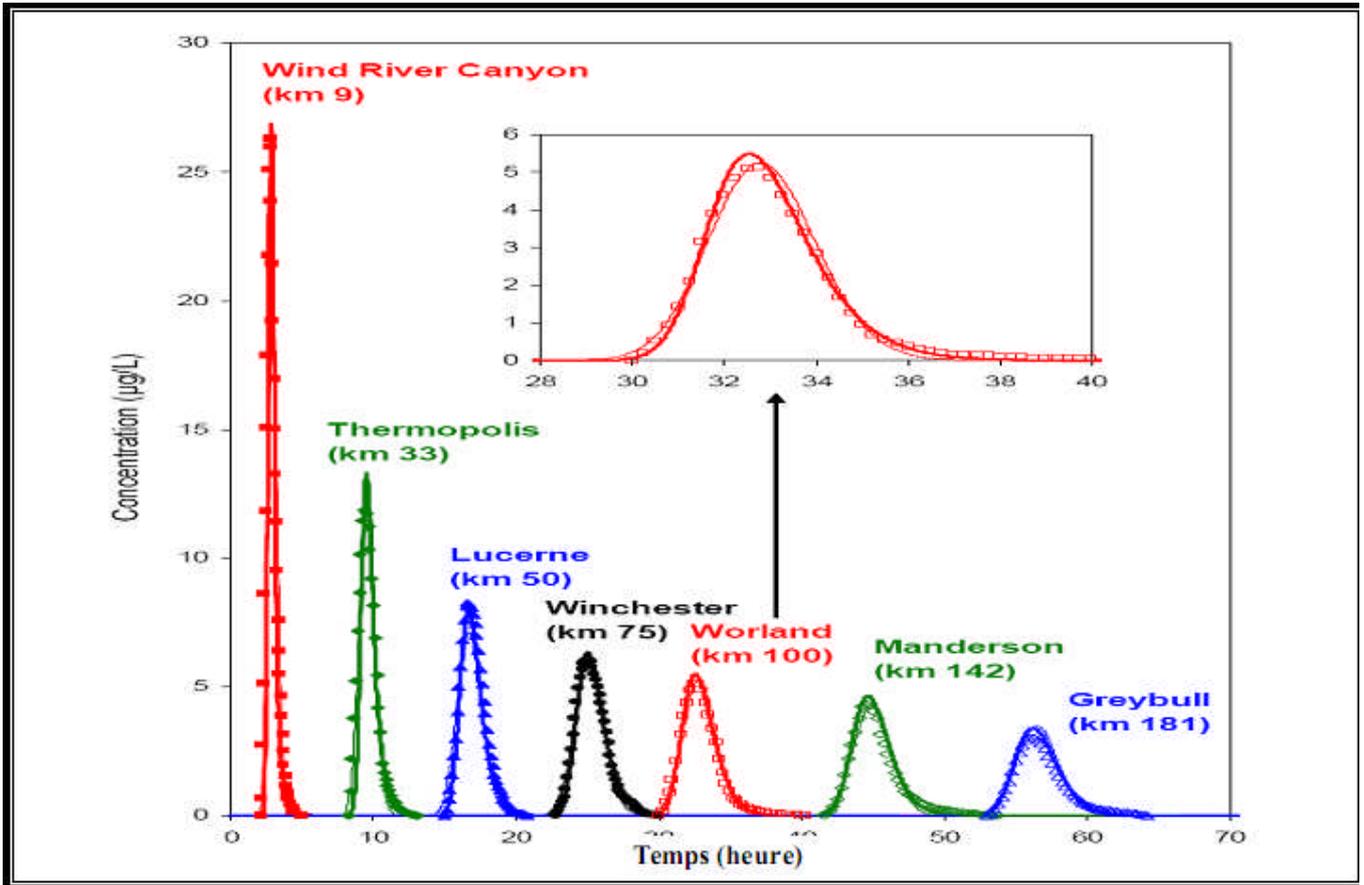


Figure III.11: Variation des concentrations mesurées (représentées par les pointes) et des concentrations simulées (représentées par les lignes) de SF6 en fonction du temps dans le fleuve Vent –Wind-Bighorn.

Les traits fins représentent le profil obtenu à partir du modèle d’advection–diffusion et les traits large représentent le profil obtenu à partir du modèle de la zone morte.

On voit bien qu’il y a une bonne concordance entre les deux modèles.

III-6.4 .3 Fleuve de Missouri (USA) :

Le 13 Novembre 1967, 54 kilogrammes de rhodamine ont été injectés dans le fleuve du Missouri et la concentration a été mesurée à plusieurs endroits tels que Decatur, Blair, Ak-sar-ben et Plattsmouth. Les résultats des mesures et de la simulation sont présentés sur la figure III.12.

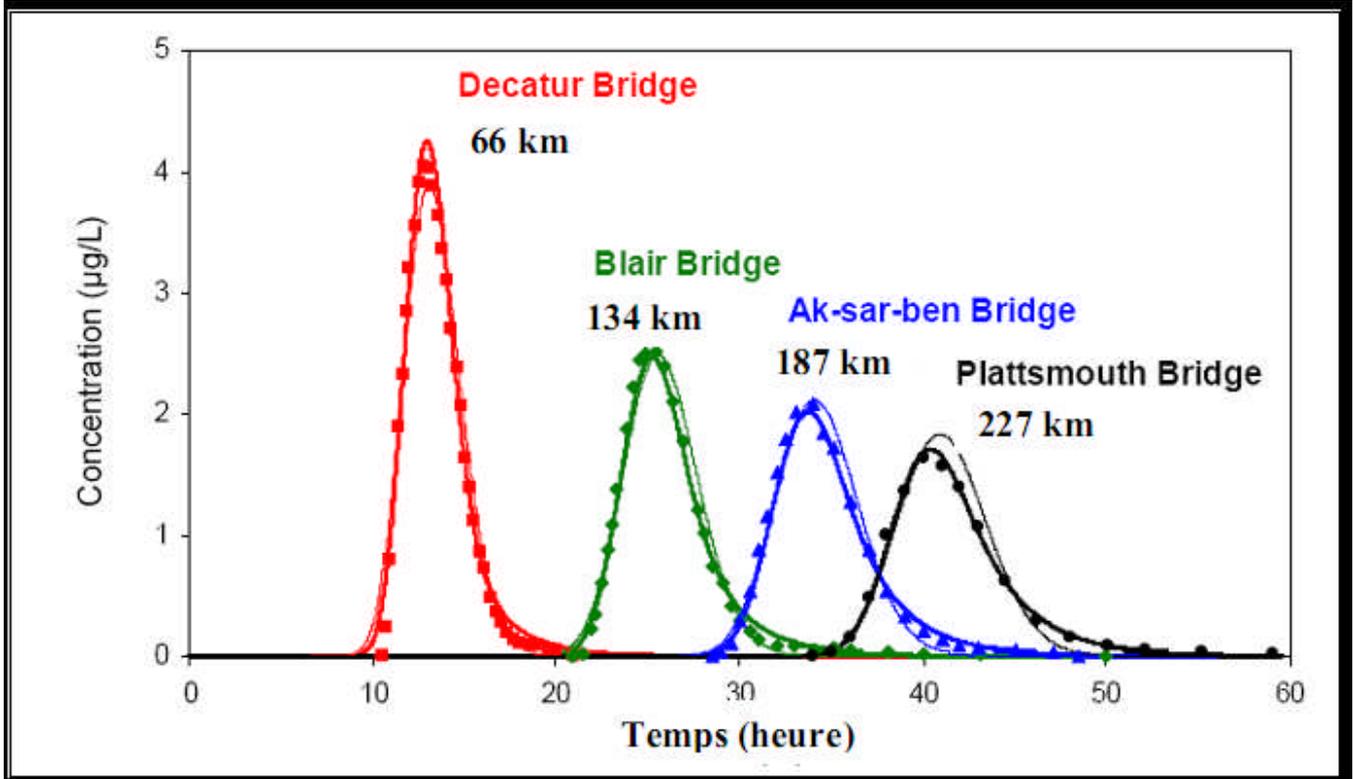


Figure III.12: Variation des concentrations mesurées (représentées par les pointes) et des concentrations simulées (représentées par les lignes) de rhodamine en fonction du temps dans le fleuve de Missouri.

Les traits fins représentent le profil obtenu à partir du modèle d’advection –diffusion et les traits large représentent le profil obtenu à partir du modèle de la zone morte.

On voit bien qu’il y a une bonne concordance entre les deux modèles.

III-6.4 .4 Fleuve de Sacramento (La Californie) :

Le 14 juillet 1994, un train avait déraillé et avait déversé 19 à 27 tonnes de pesticide. Ce pesticide par des phénomènes de photolyse et d’hydrolyse, se transforme en plusieurs produits par lesquels le méthyle iso thiocyanate (MITC) dont son transport est étudié.

Les résultats des mesures et de la simulation sont présentés sur la figure III.13.

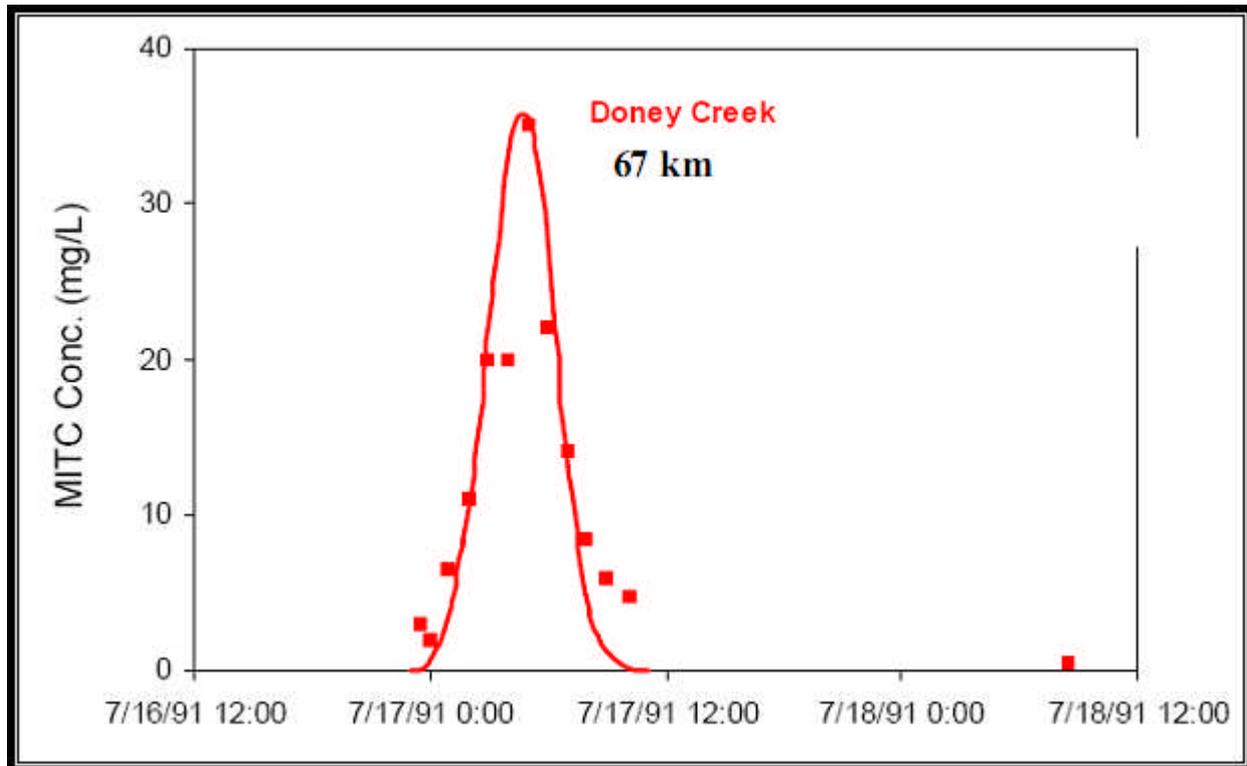


Figure III.13: Variation des concentrations mesurées (représentées par les pointes) et des concentrations simulées (représentées par les lignes) de MITC en fonction du temps dans le fleuve de Sacramento.

III-7. Conclusion :

A travers ce chapitre, nous avons présenté quelques travaux réalisés dans le domaine de la modélisation et la simulation de la dispersion de matière dissoute dans les cours d'eau.

Certains auteurs ont mené des travaux expérimentaux en vue de valider leurs modèles numériques.

La plus part ont réduit le problème en uni-dimensionnel afin de rendre la résolution plus souple. Cependant, la quasi-totalité des méthodes de résolution utilisées consiste à proposer des solutions analytiques.

Chapitre IV

Présentation de la zone d'étude

Chapitre IV : Présentation de la zone d'étude

IV-1 Introduction :

Le bassin versant de l'oued Mouillah représente l'un des composants primordiaux du bassin de l'oued Tafna ; situé dans sa partie amont d'où son nom (la haute Tafna), qui est considéré l'un des bassins les plus importants dans le territoire algérien et appartient à l'ensemble du bassin hydrographique l'Oranie Chott Chergui selon la structuration des unités hydrologiques en Algérie (figure IV.1)

Dans ce chapitre on détaillera la zone d'étude prenant en considération les paramètres qui vont cerner par la suite notre étude notamment la situation du bassin versant, les données socioéconomiques, les infrastructures hydrauliques, la morphométrie et l'hydrographie du bassin versant, aperçu sur la géologie, l'hydrogéologie et la morphologie de la région...etc.

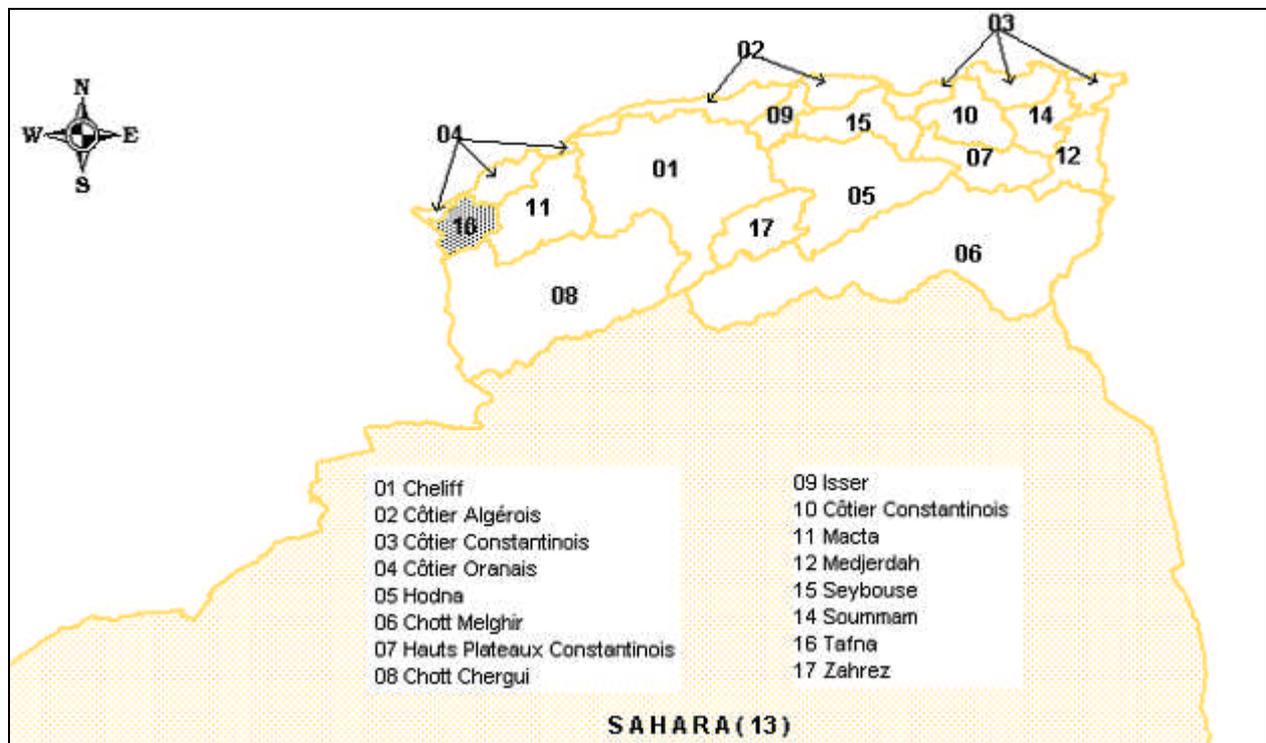


Figure IV.1 : Les bassins versants en Algérie,

(Les chiffres représentent les bassins et leurs noms géographiques) (ABH Oran)

IV-2. Données Générales :

IV-2.1 Situation du bassin versant de l'oued Mouillah :

Le bassin versant de l'oued Mouillah est situé à l'ouest du bassin de la Tafna (sous le code ANRH N°: 16 **Figure IV.2**) .la majeure partie de sa superficie couvre les plaines d'Angad (située à Oujda) dans le territoire marocain et celles de Zrigua (Maghnia) dans le territoire Algérien (**Figure IV.3**). Le

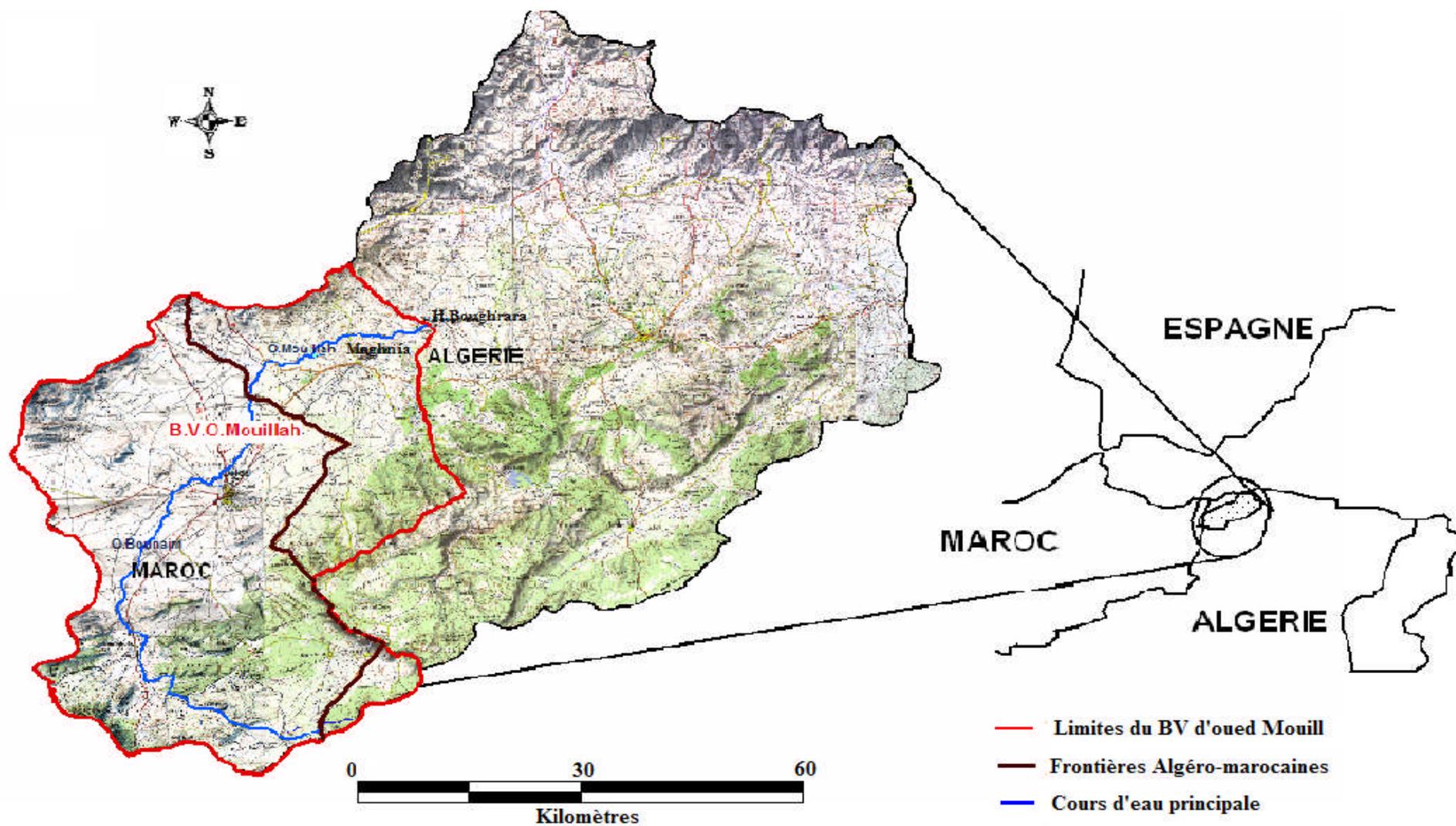


Figure IV.3 : Situation géographique du bassin versant de l'oued Mouillah (HAMLAT 2005)

IV-2.2 Armature urbaine du Bassin versant de l'oued Mouillah :

En plus de la ville marocaine d'Oujda et ses périphéries, le bassin versant de l'oued Mouillah inclus, en Algérie, plusieurs agglomérations, dont les plus importantes Maghnia, Sidi Mejahed, Beni Bahdel et Beni Boussaid. L'armature de l'oued Mouillah se compose de la Daira de Maghnia, en Algérie, et de la région d'Oujda, au Maroc.

La partie du Bassin versant de la Tafna concernée par le barrage Boughrara compte trois communes : Sidi Medjahed, Beni Boussaid et Beni Bahdel.

a) La région de d'Oujda :

Dans la partie marocaine, en plus de la préfecture d'Oujda-Angad (chef lieu de la wilaya), six autres provinces se trouvent situées dans le bassin de Mouillah :

- Au sud d'Oujda, les agglomérations de Touissite, Sidi Boubekour, Oued el Heime et Guenfouda.
- Au nord d'Oujda, les agglomérations d'Aleb et de Benidirar.

b) La commune de Maghnia :

Située à l'extrême nord ouest de l'Algérie, sa position frontalière lui confère un rôle stratégique entre Algérie et Maroc. Elle est limitée géographiquement :

- Au nord, par le massif des Traras qui l'isole de la mer méditerranée ;
- Du sud à l'est, par les monts de Tlemcen ;
- A l'ouest et au sud ouest, par la ligne frontalière avec le Maroc.

La commune de Maghnia s'étend sur une superficie totale de 294 Km² ; elle compte huit agglomérations :

- Le chef lieu de la commune, Maghnia.
- Les agglomérations secondaires : Akid Abbes, Akid Lotfi, M'Samda, Bekhata, Chebikia, Bettaine et Legfef.

c) La commune de Hammam Boughrara :

La commune de Hammam Boughrara est située au nord ouest de la wilaya de Tlemcen, à 50 Km du chef lieu de la wilaya et à 10 Km, à l'est de la commune de Maghnia ; elle est limitée :

- Au Nord, par la commune de Nedrouma et Ain Kebira ;
- Au Nord ouest, par la commune de Djebala ;
- Au Sud-ouest, par la commune de Maghnia ;
- Au Sud, par la commune de Bouhlou ;
- Au l'Est, par la commune de Sabra et ouled Riah ;
- Au Nord-est, par la commune d'Ain Fettah.

La commune de Hammam Boughrara couvre une superficie de 167 Km² et compte huit agglomérations :

- L'agglomération chef lieu : hammam Boughrara ;

- Les agglomérations secondaires : Maaziz, Sidi Mokhtar, Bourakba, Ouled Houari, Ouled Aissa, Ouled Bouhenna et Hajra kahla.

IV-3 Données Socio-économiques :

IV-3.1 Situation Démographique :

a) Oujda :

La population d'Oujda est estimée à 400 000 habitants (statistiques de l'année 2000) avec un taux d'accroissement moyen de 2,1%, représentant le taux moyen du Maroc.

b) La daïra de Maghina :

C'est la daïra la plus peuplée à l'échelle de la wilaya de Tlemcen. Selon le recensement effectué en 2008, la population totale dans les limites de la partie Algérienne du Bassin versant du barrage Hammam Boughrara, était de 127 609 habitants en 1998 (Tableau IV.1) avec un taux d'accroissement moyen de 2,7%

Tableau IV.1 : Populations des agglomérations incluses dans le bassin versant d'oued Mouillah

Commune	Nombre d'habitants
Maghnia	96302
Béni Boussaid	11894
Hammam Boughrara	10322
Sidi Mejahed	6431
Beni Bahdel	2660
Total	127609

Source ONS

IV-3.2 Estimation de la population future du bassin versant :

Nous avons estimé la population future pour différents horizons, dans les limites de l'ensemble du bassin versant de l'Oued Mouillah, comprenant essentiellement la ville d'Oujda et la daïra de Maghnia.

L'estimation de l'évolution de la population de la ville d'Oujda est résumée dans le tableau (IV-2) suivant :

Tableau IV.2 : population de la région d'Oujda à différents horizons.(www.wikipedea.com)

Ville	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Oujda	400 000	443 801	492 399	546 319	606 143	672 517

Nous résumons l'estimation de la population de la partie Algérienne (daïra de Maghnia) dans le tableau IV.3 suivant :

Tableau IV.3 : Population de la daïra de Maghnia à différents horizons.

Commune	1998	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Maghnia	96 302	101 573	116 046	132 581	151 472	173 055	197 714
Béni Boussaid	11 894	12 545	14 332	16 375	18 708	21 374	24 419
Hammam Boughrara	10 322	10 887	12 438	14 210	16 235	18 549	21 192
Sidi Medjahed	6 431	6 783	7 749	8 854	10 115	11 557	13 203
Beni Bahdel	2 660	2 806	3 205	3 662	4 184	4 780	5 461
Total	127 609	134 593	153 771	175 682	200 715	229 314	261 989

Le taux de 1998 à 2008 a dépassé le cap de 2,7% /ans, pour la ville de Maghnia la croissance urbaine est évaluée à l'ordre de 3 %/an. Les perspectives indiquent une population d'environ 173 000 habitants d'ici l'an 2020, selon le taux observé entre 1998 et 2008, soit 3,09 %. L'offre foncière étant très limité, l'urbanisation se poursuit probablement sur les terres agricoles, jouxtant les vergers d'agrumes et d'oliviers.

Les causes de cette croissance démographique galopante de la ville de Maghnia s'expliquent, en partie, par la dynamique économique et commerciale qu'il faut reconnaître à caractère essentiellement informel, dont bénéficient les zones frontalières d'une manière générale et plus particulièrement la ville de Maghnia.

La population totale, à différentes perspectives, dans l'ensemble du bassin versant du barrage de Hammam Boughrara (en considérant la population d'Oujda et celle de Maghnia) est résumée dans le tableau (IV.4) suivant :

Tableau IV.4: population totale du bassin versant à différents horizons.

Région	2000	2005	2010	2015	2020	2025
Oujda	400 000	443 801	492 399	546 319	606 143	672 517
Maghnia	134 593	153 771	175 682	200 715	229 314	261 989
Total	534 593	597 572	668 081	747 033	835 457	934 507

IV-3.3 Activités économiques :

IV-3.3.1 Région d'Oujda :

Les activités agricoles et agro-alimentaires sont prédominantes dans la région, notamment dans la plaine d'Angad. L'industrie minière représente l'activité industrielle la plus importante dans la région (l'oriental, au sud d'Oujda), où les gisements de plomb et de zinc sont exploités à Sidi Boubekeur et

Touissit, avec une production de 16 000 tonnes de concentré de plomb et 41300 tonnes de concentré de zinc.

IV-3.3.2 Région de Maghnia :

a) Agriculture :

La plaine irriguée de Maghnia (tableau IV.5), dont la nappe est surexploitée, représente une source potentielle de pollution due à l'épandage des engrais, le traitement des sols et des végétaux (figure IV.4).

Tableau IV.5: Fiche technique du périmètre irrigué.

- Superficie géographique	- 9 000 ha
- Superficie irriguée	- 5 250 ha
- Type d'irrigation	- Aspersión
- Ressource en eaux :	
• Barrage de Beni Bahdel	26 Hm ³
• La nappe de Maghnia	12 Hm ³

Source : DSA de Tlemcen

D'après les statistiques agricoles de la DSA de Tlemcen les cultures pratiquées sont : les cultures céréalières, fourragères, maraichères ainsi l'arboriculture et la viticulture.

En termes de superficie irriguée, les cultures maraichères prédominent avec une superficie totale de 2 878 Ha.

A défaut de données réelles actualisées, les estimations théoriques des besoins en eau, à titre indicatif, pour les cultures céréalières, maraichères, la viticulture et arboriculture seraient de l'ordre de 2,05 Hm³.

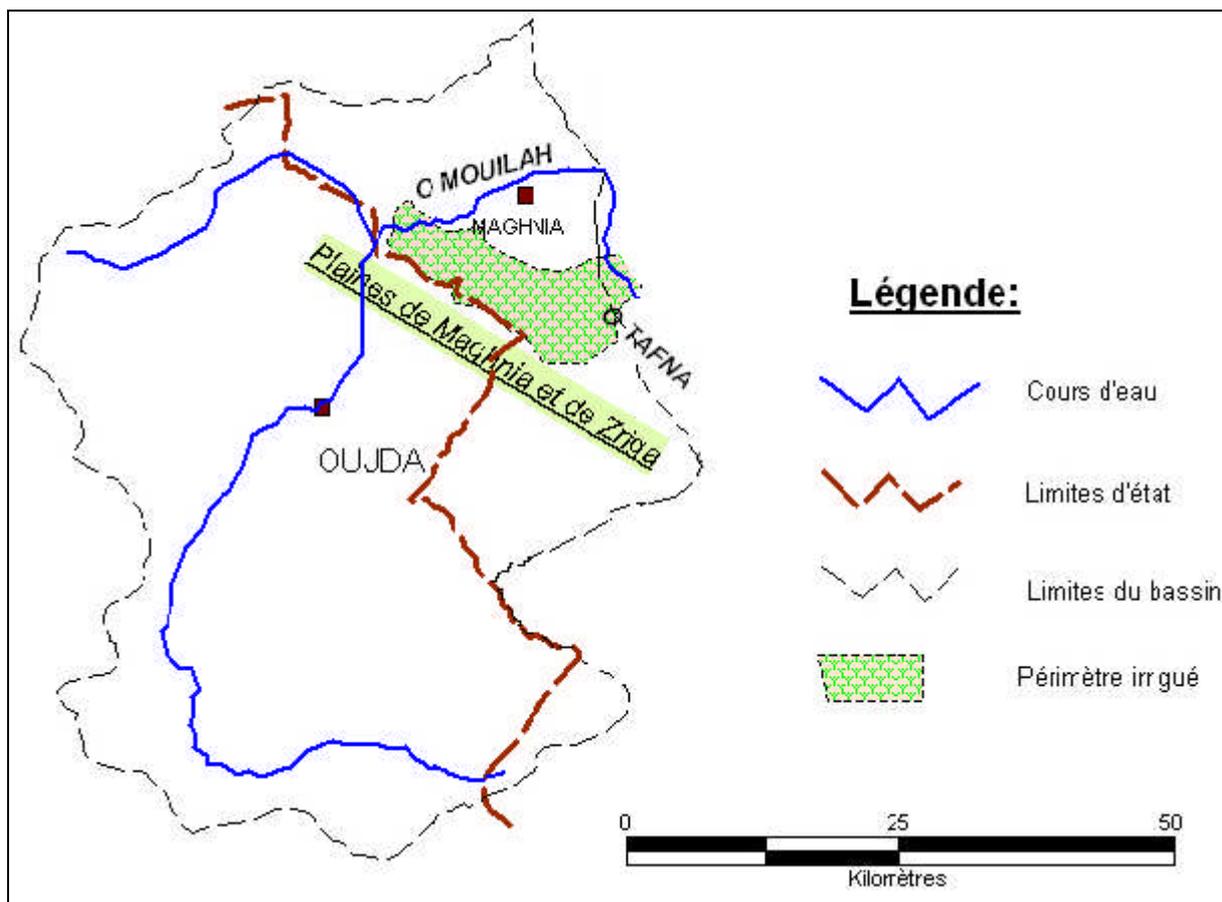


Figure IV.4 : Plaine de Maghnia et Zriga.

b) Production animale :

L'élevage important dans la région, peut être une source de pollution potentielle des eaux superficielles et souterraines, si les déchets générés ne sont pas valorisés ou éliminés dans des conditions d'hygiène et d'environnement adéquats. Les principales espèces élevées sont résumés dans le tableau IV.6.

Tableau IV.6 : Espèces élevés

Espèce	Nombre
Les espèces Bovines	1953 têtes
Les espèces Ovines	44125 têtes
Les caprins	659 têtes
Elevages avicole- poules pondeuses, dindes et de chair	390 140 sujets

Source : DSA de Tlemcen

c) Industrie :

Les différentes unités industrielles constituent la zone industrielle de Maghnia, dont quelques unes sont de caractère industriel, dont essentiellement la MAISERIE , L'ENCG, L'ENOF considérées comme étant des unités polluantes. A signaler aussi la décharge dans le réseau d'assainissement des produits hydrocarbures (fuel et huiles moteur) des stations de lavage et de graissage existantes. Et des eaux

résiduaire de quelques coopératives de conditionnement d'olives. Les grandes unités industrielles sont munies de Station d'Épuration des eaux industrielles.

L'industrie dans la région de Maghnia est prédominée par cinq (05) unités industrielles importantes :

Tableau IV.7 : Principales unités industrielles.

L'unité industrielle	Production
Entreprise nationale des produits miniers non ferreux (E.N.O.F)	Traitement des terres décolorantes
Complexe de la vaisselle et céramique (CERTAF)	Production de céramique et vaisselle
Entreprise nationale des corps gras (E.N.C.G)	Huiles alimentaires et savons
Entreprise des aliments et dérivés de maïs (La maïserie ERIAD)	Production d' amidon
Coopérative oléicole	Production d'huile d'olive

d) Tourisme :

L'activité touristique au niveau de la zone d'étude est axée autour du tourisme thermal. Il existe trois stations thermales, dont deux, d'importance régionale, sont aménagées et équipées (Hammam Boughrara et Hammam Chigueur) et une troisième sans aménagement (Hammam Sidi Belkheir).

➤ Hammam Boughrara :

Le complexe thermal de Hammam Boughrara est situé à l'intérieur du village le long de la RN 35. IL est composé d'un hôtel de 92 lits, 12 Bungalows, une piscine, des douches et un café restaurant. Parmi les caractéristiques principales des eaux thermales de ce Hammam, on cite :

- Débit : 15 l/s ;
- Température de l'eau : 45,5°C ;
- Indications thérapeutiques : Rhumatisme, Neurologie.

➤ Hammam Chigueur :

La station thermale de chigueur est localisée à 5 Km au nord de Maghnia le long du chemin de wilaya CW 46. Ce complexe comprend un hôtel de 24 lits, 12 bungalows et 02 piscines.

Les caractéristiques des eaux de ce Hammam sont :

- Débit : 40 l/s ;
- Température de l'eau : 30°C ;
- Indications thérapeutiques : Rhumatisme, Veineuse, peaux et muqueuses.
- Minéralisation principale : Chlorure sodique (Cl :1633 mg/l, Na : 874 mg/l)
- Minéralisation secondaire : Bicarbonate (HO3 : 488 mg /l, Ca : 81 mg/l) ;
- Résidu sec à 180°C : 2950 mg/l ;
- PH : 8,53.

➤ Hammam Sidi BelKheir :

Cette source chaude est localisée à mi-chemin entre Maghnia et Hammam Boughrara. Son accessibilité est assurée par une piste de 1,5Km à partir de la RN 35. Elle ne dispose que d'un

aménagement rudimentaire. De par sa présence au fond de la vallée, à la confluence des oueds Tafna et Mouillah, son existence est compromise par la réalisation du barrage Hammam Boughrara, car la source se trouve dans la zone inondable.

Les caractéristiques de ces eaux sont :

- Débit : 2 l/s ;
- Température de l'eau : 36°C ;
- Indications thérapeutiques : Rhumatisme, Veineuse ;
- Minéralisation : Bicarbonate (CO₃H).

IV-3.4 Les infrastructures hydrauliques :(DHW Tlemcen)

IV-3.4.1 Ressources en eau :

Les ressources principales en eau potables destinées à l'alimentation de l'armature urbaine du bassin versant de Mouillah (coté Algérien), se résument par :

a) Retenues collinaires :

Cinq (05) retenues collinaires ont été mises en service durant l'année 1983 d'une capacité totale de 0,375 Hm³ avec un taux d'envasement très élevé.

b) Forages, Puits et Sources :

Il existe quatorze (14) forages mis en service durant la période 1974/1999 destinés à l'AEP de Maghnia, dont dix (10) sont opérationnels, trois (03) hors service pour insuffisance de débits et un (01) non exploité pour cause de pollution. A la commune de hammam Boughrara trois (03) forages desservent les agglomérations de Sidi Mechhour et Ouled Aissa. Par ailleurs, le nombre de puits existants au niveau de la daïra de Maghnia, est de l'ordre de quatre mille (4000).

Quant aux sources, il existe plusieurs, dont les six importantes sont captées et utilisées pour la consommation en eau potable et les stations thermales.

c) Alimentation en eau potable (DHW de Tlemcen) :

Sachant que la dotation moyenne de la population de la daïra de Maghnia est de 180 l/j/hab, les besoins actuels en eau sont estimés à 31 622,76 m³/j. les eaux mobilisées pour ces besoins sont assez suffisante pour satisfaire ces besoins (barrage de Hammam Boughrara pour les eaux de surfaces et 2,1511 Hm³/an en eau souterraines, assurer par les forages).

La capacité totale des stockages est de 13 360m³, assurée par 29 ouvrages de stockages d'eau potable, implantés dans la daïra de Maghnia, dont :

- 13 réservoirs au niveau de la commune de Hammam Boughrara ;
- 10 réservoirs et 08 châteaux d'eau au niveau de la commune de Maghnia.

Il est clair que les ressources en eau mobilisées suffisent ; on note un manque d'infrastructures de stockage. Toutefois, la majorité de la population de la daïra de Maghnia est raccordée à un réseau d'alimentation en eau potable.

Signalant ainsi, le transfert Ghazaout-Maghnia qui est en cours de réalisation et servira l'alimentation en eau de la daïra de Maghnia à partir de la station de dessalement de Ghazaout.

d) Assainissement : (DHW de Tlemcen).

Le réseau d'assainissement des tissus urbains du bassin versant de l'Oued Mouillah se présente comme suit :

d.1) L'assainissement de la ville d'OUJDA :

La ville d'Oujda est partiellement assainie. Le taux de raccordement est moyen. Les eaux usées transitent par une station d'épuration au fonctionnement irrégulier et dont le rendement est faible. Le rejet se fait dans l'Oued Bounaim, affluent principal de l'Oued Mouillah.

d.2) Maghnia :

L'agglomération de Maghnia est équipée d'un réseau d'assainissement mixte, parfois unitaire ou séparatif. L'évacuation de ses effluents domestiques ne présente aucune difficulté en raison de la déclivité naturelle suffisante.

Le taux de raccordement au réseau d'assainissement est évalué à 92 %. Le volume des eaux usées rejetées est estimé à 7 452 m³/jour. Les eaux usées sont drainées par des collecteurs principaux de diamètre compris entre Ø800 et Ø1000, en béton précontraint jusqu'à la station d'épuration. Cependant, les rejets non raccordés (estimé environ à 8 % du total) continuent de se déverser dans le lit d'Oued Ouerdefou. Les habitations non raccordées sont celles des nouvelles extensions (Ouled Charef, Gueffaf, ...), dont certaines nécessitent des stations de relevage.

La STEP de Maghnia reçoit presque tout le volume des eaux usées domestiques. Elle est dimensionnée pour recycler 6 Hm³/an. Ce volume supplémentaire devrait soit rejoindre le barrage de Hammam Boughrara et augmenter ainsi son débit régularisé, soit être transféré vers le Périmètre irrigué de Maghnia.

Le réseau d'assainissement du centre de Maghnia est de type urbain unitaire et séparatif ; d'un linéaire total de : 36 944ml

Pour le reste des agglomérations de la commune de Maghnia ; le réseau d'assainissement mis en place est de type semi- urbain séparatif d'un linéaire total de : 422 122 ml et une population raccordée de 14 413 habitants.

d.3) Hammam Boughrara :

La commune de Hammam Boughrara est dotée d'un réseau d'assainissement de type semi- urbain unitaire.

Le rejet de la ville de Hammam Boughrara ; correspondant à une population estimée à 6 488 habitants ; se fait en aval du barrage ; directement dans l'Oued Tafna.

Les villages de Sidi Machour et Maàziz rejettent les eaux usées à l'amont du barrage Hammam Boughrara ; directement dans l'Oued Mouillah.

IV-3.5 Morphométrie et Hydrographie :

IV-3.5.1 Introduction :

L'analyse des caractéristiques géographiques et physiques de la région d'étude constitue un premier diagnostic permettant la mise en évidence des facteurs et paramètres contribuant à la détermination de l'écoulement superficiel ; élément important dans l'étude de la pollution et sa propagation dans le réseau hydrographique.

Ainsi cette partie traite les conditions hydrographiques ; géologiques ; hydrogéologiques et morphologiques du bassin versant de l'oued Mouillah.

IV-3.5.2 Caractéristiques hydrographiques :

Le bassin versant de d'Oued Mouillah est constitué par des zones très hétérogènes où on trouve les plaines de Maghnia et Angad qui représentent des vallées encaissées entre les monts de Tlemcen, au sud, et les monts de Traras, au nord. Le relief est assez varié constitué de zones de montagne, de plaine et vallées.

Ce bassin versant est drainé par le cours d'eau principal oued Mouilah et un ensemble des affluents dont les principaux :

- a) **Oued Isly** : Il draine la région sud d'Oujda et plus particulièrement le gisement minier de plomb et de zinc.
- b) **Oued El Heimer** : Il reçoit les eaux industrielles de la mine de Sidi Boubekeur et les eaux urbaines des agglomérations de la région.
- c) **Oued BouNaim** : Ce dernier draine toutes les eaux usées urbaines et industrielles de la ville d'Oujda et d'autres agglomérations secondaires avoisinantes Beni drar, El Aleb.
- d) **Oued Ourdeffou** : Oued ourdeffou se forme au niveau de Maghnia par les affluents oueds lemhaguene et oued Aouina, traverse la ville de Maghnia en drainant les eaux usées urbaines, les eaux résiduaires industrielles de l'ENOF ainsi que les déchets solides (décharges sauvages dans le lit de l'oued). A l'est de Maghnia il rejoint oued abbés en véhiculant les eaux industrielles.
- e) **Oued Lemhaguene et oued Aouina** : les deux oueds forment l'oued ouerdeffou au sud de la ville de Maghnia. Ils drainent surtout les eaux de lessivage des terres agricoles.
- f) **Oued Abbes** : Cet oued draine les terres agricoles au sud de Maghnia et reçoit les eaux des entreprises ENCG, CERTAF, ERIAD

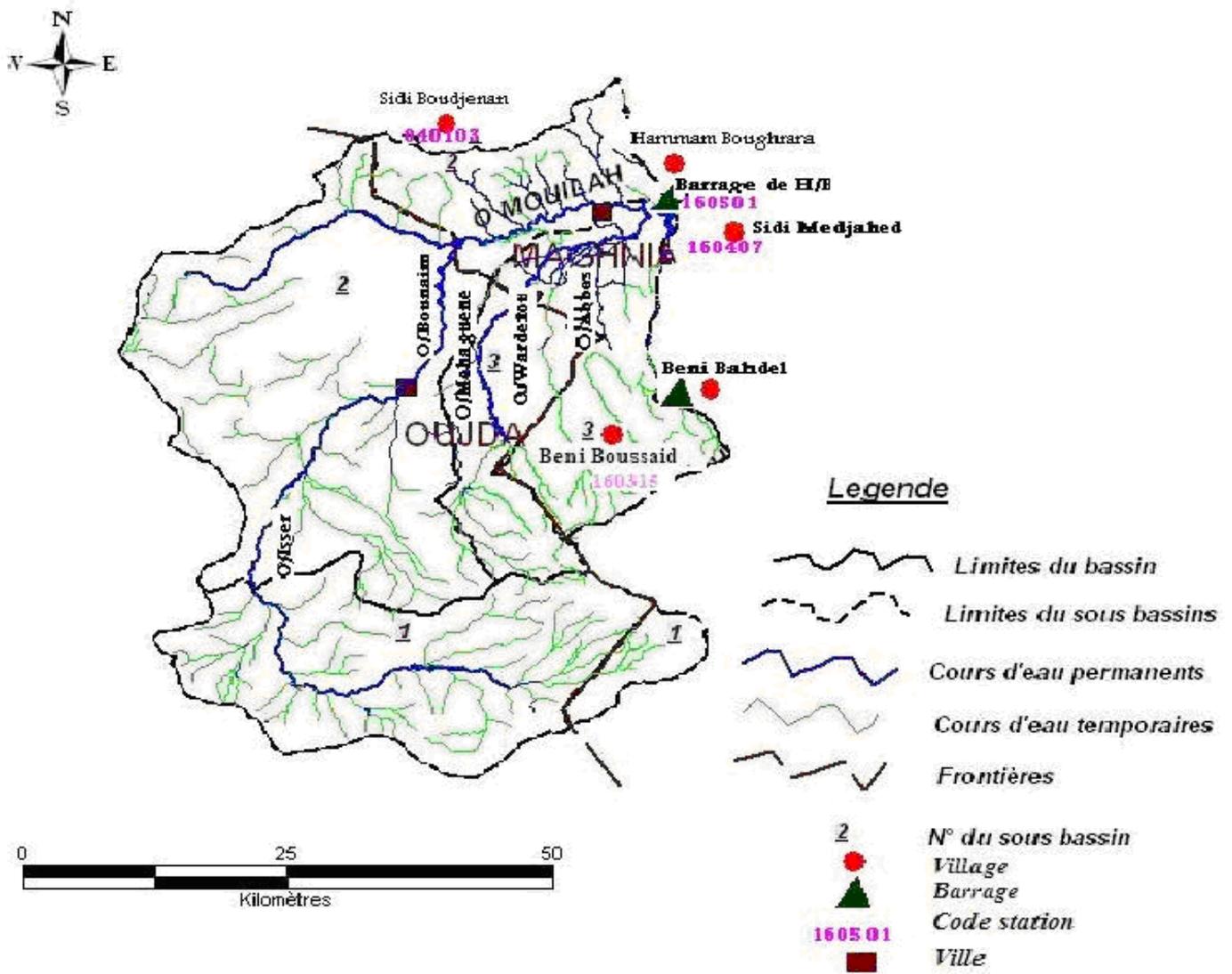


Figure IV.5 : Réseau Hydrographique du Bassin Versant

IV-3.5.3 Relief :

Le relief est un facteur essentiel, il détermine en grande partie l'aptitude au ruissellement des terrains, l'infiltration et l'évaporation. C'est un élément capital dans le comportement hydrologique d'un bassin.

Partant de la répartition par tranches d'altitudes des bassins, nous avons établi les courbes hypsométriques et les diagrammes des fréquences altimétriques.

Tableau IV.8 : Courbe hypsométrique.

Tranches d'altitudes	Ai (Km ²)	Ai cumulées (Km ²)	Ai %	Ai % cumulées	Altitude moyenne partielle (km)	% altitudes cumulées	Produit (2x6) (km ³)
1	2	3	4	5	6	7	8
1450-1400	1.95	1.95	0.09	0.09	1.424	100	2.78
1400-1350	1.56	3.51	0.08	0.17	1.375	95.83	2.15
1350-1300	19.81	23.32	0.96	1.13	1.325	91.66	26.25
1300-1250	23.22	46.54	1.13	2.26	1.275	87.50	29.61
1250-1200	36.69	83.23	1.78	4.04	1.225	83.33	44.95
1200-1150	23.75	106.98	1.15	5.19	1.175	79.16	27.91
1150-1100	23.91	130.89	1.16	6.35	1.25	75.00	29.89
1050-1000	179.76	310.65	8.73	15.08	1.075	70.83	193.24
1000-950	184.58	495.23	8.96	24.04	1.025	66.66	189.19
950-900	81.25	576.48	3.94	27.98	0.975	62.50	79.22
900-850	82.31	658.79	4.00	31.98	0.925	58.33	76.14
850-800	84.50	743.29	4.10	36.08	0.875	54.16	73.94
800-750	103.35	846.64	5.02	41.10	0.825	50.00	85.26
750-700	89.85	936.49	4.36	45.46	0.775	45.83	69.63
700-650	141.23	1077.72	6.86	52.32	0.725	41.16	102.39
650-600	129.66	1207.38	6.29	58.61	0.675	37.50	87.52
600-550	138.85	1346.23	6.74	65.35	0.625	33.33	86.78
550-500	144.57	1490.8	7.02	72.37	0.575	29.16	83.13
500-450	153.71	1644.51	7.46	79.83	0.525	25.00	80.70
450-400	156.27	1800.78	7.59	87.42	0.475	20.83	74.23
400-350	189.03	1989.81	9.18	96.59	0.425	16.66	80.34
350-300	56.49	2046.3	2.74	99.33	0.35	12.50	19.77
300-250	13.70	2060	0.67	100.00	0.275	8.33	3.77
Somme	2060	-	-	-	-	-	1548.77
Altitude moyenne = 1548.77/2060 = 0.751Km							

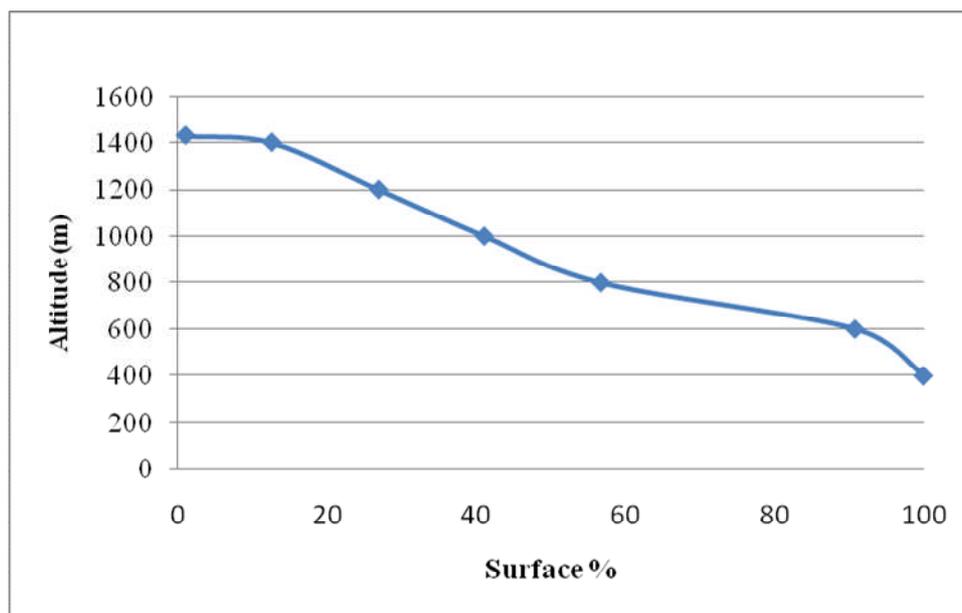


Figure IV.6 : Courbe hypsométrique

Le bassin de l'oued Mouillah occupe une superficie de 2060 km². Dont la majeure partie se trouve sur le territoire marocain couvrant les plaines des Angads et de Maghnia. Le relief assez varié est constitué de zones de montagnes, de plaines et de vallées. La longueur du thalweg principal est de 104.4 km.

La forme de la courbe hypsométrique (tableau IV.8 et figure Figure IV.6.), présente un l'état d'équilibre du bassin et donc un potentiel érosif moyen.

L'accentuation de la pente de la courbe vers les basses altitudes indique que la partie aval du bassin du mouillah est bien occupée par la plaine importante de Maghnia-Angades.

Vers les hautes altitudes, le relief accentué à l'amont du bassin est bien mis en évidence par la forme de la courbe hypsométrique.

Les pentes sont en général très accentuées (fig. IV.7), dépassant les 20% au niveau des zones montagneuses des monts des Traras au Nord-Ouest et les monts de Tlemcen au Sud.

Entre ces zones à relief fort, on retrouve des pentes plus douces (entre 0 et 10%). Cette zone plus ou moins aplatée est localisée de part et d'autre de l'oued Mouillah constitue la plaine de Maghnia.

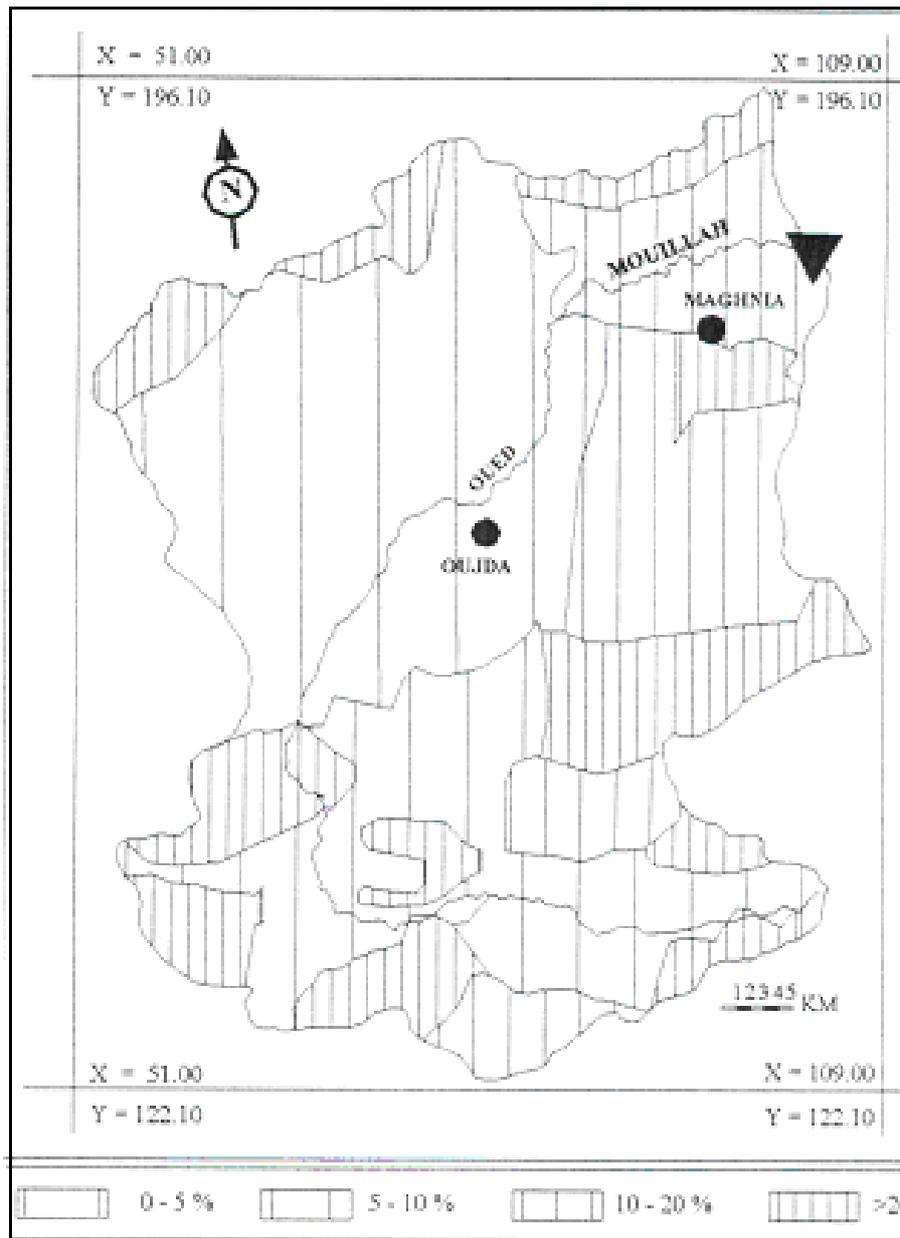


Figure IV.7 : Carte de pente du bassin versant d'O/Mouilah (BOUANNANI, 2006)

Les paramètres géomorphologiques essentiels du bassin versant de l'Oued Mouillah sont donnés au tableau (IV.9), ci-après.

Tableau IV.9 : Caractéristiques géomorphologiques et hydrologiques du bassin versant :

Paramètres	Unité	Valeur
Caractéristiques de forme		
Surface du bassin versant	Km ²	2060
Périmètre du bassin versant	Km	241
Indice de compacité, K _c	/	1.50
Longueur du rectangle équivalent, L	Km	98.70
Largeur du rectangle équivalent, l	Km	20.30
Relief		
Altitude maximale, H _{max} ;	m	1450
Altitude minimale, H _{min} ;	m	250
Altitude moyenne, H _{moy} ;	m	751
Dénivelé (m) (H 95%- H5%) = (1165- 425) ;	m	740
Pente moyenne (m/km) ;	m/km	11.49
Indice de pente globale, Ig.	/	0.017 (relief modéré)
Réseau hydrographique		
Densité de drainage ;	km/km ²	0.69
Fréquence des cours d'eau d'ordre l, (nombre=1378) ;	/	0.94
Longueur du talweg principale ;	Km	104.4
Coefficient de torrentialité ;	/	0.034

IV-3.5.4 Cadre Géologique et hydrogéologique

L'étude des critères géologiques et hydrogéologiques de la région admet un intérêt primordial et non négligeable dans la compréhension des phénomènes qui régissent les relations entre la pollution et la vulnérabilité aux eaux souterraines et superficielles ; via le ruissellement et l'infiltration.

D'une manière générale la Chaîne des Maghrebides est constituée par les segments orogéniques rifains, telliens, Nord siciliens et calabrais (Durant Delga et Auboin 1971), elle est allongée sur plus de 2000 Km entre le détroit de Gibraltar et les Apennins, elle se caractérise par des structures en nappes à vergence Sud dominante. Cette chaîne comprend en Algérie, du Nord vers le Sud : des Zones Internes (Socle Kabyle et Dorsale Kabyle), une Zone Médiane dans laquelle se sont déposés des flyschs (Flysch Maurétanien et Massylien) et des Zones Externes qui correspondent aux Zones Telliennes.

a) Cadre géologique :

1. Quaternaire :

La quaternaire est formée par des alluvions et des colluvions rubéfiés dans la croûte calcaire où ils présentent des taches claires dans le profil. Elles correspondent à des colluvions identiques reposant sur des cailloutis non indurés.

2- Tertiaire :

Le pliocène supérieur est constitué par des calcaires lacustres de la basse vallée de l'oued mouillah ; en relation avec la source de Hammam chigueur. Le Miocène débute par les formations continentales représentées par des bancs d'alluvions assez fins et des conglomérats rubéfiés et passe latéralement dans quelques endroits au miocène marin qui est représenté par une épaisse formation marneuse ; bien développée dans le bassin.

La transgression marine n'atteignant pas la région de la moyenne Tafna il y a continuité de la sédimentation continentale entre le miocène terminal et le pliocène.

3- Secondaire :

3-1 Crétacé :

- a. Coniacien formé de marnes crayeuses à lits marno-calcaires ; gris à ocre pale à patine blanche ; ces marnes glauconieux et phosphatés sont d'une épaisseur de 30 à 50 m ;
- b. Le cénomanien est caractérisé à sa base par des argiles pélitiques de couleur ocre grisâtre ; avec quelques bans de grès glauconieux et phosphatés ;
- c. L'aptien représenté au niveau de deux régions :
 - Région de Ain Kebira : au niveau des dolomies sableuses où on y trouve quelques lentille de calcaires.
 - Région de Dar Nasseur : dans cette région ; l'Aptien est représenté par deux barres de grès rouille ; surmontées par des calcaires sableux.

3-2. Jurassique supérieur :

- Kimméridgien à Barrémien : c'est un ensemble de grès tendres et de passées calcaire-dolomique ; dont l'épaisseur varie de 10 à 100 m ;
- Tithonique à Barrémien : ce sont des bancs de dolomies à intercalations de petits lits marno-calcaires d'une épaisseur de 80 Cm.
- Tithonique à Valanginien : des bancs de dolomies ; de calcaires et de grès ; séparés par des lits marno-sableux ;
- Kimméridgien : le djebel Fillaoucène ; représenté par des dolomies cristallines massives ; le plus souvent bréchiques.
- Oxfordien supérieur à Kimméridgien : c'est une épaisse série de grès fins ; tendre et homogènes ; contenant des petits lits de marnes.
- Callovo- Oxfordien : il s'agit d'argiles ocres ; à petits bancs de grès quartzitique sombre.

- Bajocien à callovien inférieur : ce sont des marnes gris jaunes ; contenant quelques bancs de calcaires à filaments ;
- Toarcien à Bathonien inférieur : dans la région du Djebel Kebir ; les calcaires avec traversées marneuses et à lits de calcaires grossièrement sableux.

3-3 Jurassique moyen et inférieur :

- Lias et Dogger : au centre de la chaîne Fillaoucène ; on trouve au-dessous des pelites et grès des Callovo- Oxfordien ; une série calcaire-dolomitique massive ;
- Lias moyen à l'est de la chaîne Fillaoucène ; une série de calcaires massives forme la partie inférieure de la couverture secondaire ;

Lias moyen et supérieur : à l'ouest de la chaîne Fillaoucène ; le lias devient plus marneux ; il est formé par des calcaires noduleux ; alternant avec des marno-calcaires gris. Il se termine par des marnes jaunâtres.

3-4 Roches Volcaniques :

- Basaltes récent du pliocène supérieur : ce sont des basaltes épanchés sur un glacis antérieur.
- Basaltes moyens du Pliocène : Ce sont des basaltes dans la formation continentale pliocène ou dans les calcaires lacustres.

4- Primaire :

Ce sont des niveaux détritiques ; d'épaisseur variable ; composées de débris de pyélites et grès primaires ; de granites fortement rubéfiés.

En générale, sur la l'ensemble de la plaine de Maghnia- Taref, les alluvions récentes d'âge pléistocène recouvrent, sur une grande partie de Maghnia, les alluvions pliocènes et les terrains argilo-sableux (figure IV.7).

La plaine de Tafna est constituée par un ensemble, de marnes miocènes à gypse et argiles très tendres et d'apports alluvieux quaternaires limoneux, à passées de graviers (vallées des oueds Tafna et Isser).

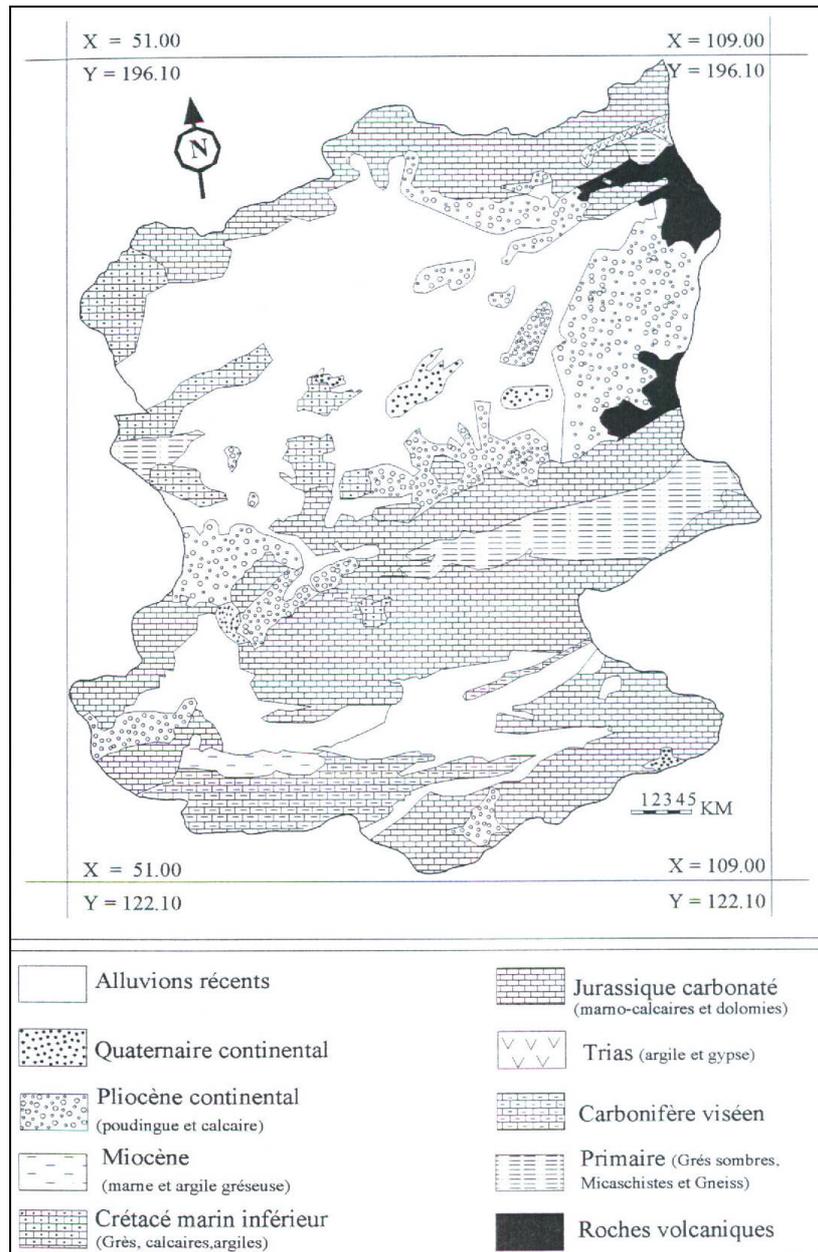


Figure IV.8 : Carte lithologique du bassin versant d'oued Mouillah (Bouannani.2006).

b- Etude Hydrogéologique :

L'étude hydrogéologique permettra de connaître le contexte hydrogéologique du bassin versant étudié (plaine de Zriga et plaine de Maghnia).

Les séquences lithologiques et les conditions techniques déterminées par le contexte géologique de la région de Maghnia permettent d'individualiser plusieurs formations aquifères.

1. Identification des aquifères et leurs caractéristiques :

Dans le bassin versant de l'Oued Mouillah domine la plaine de Maghnia. Le réservoir de la nappe se situe surtout dans les lentilles de galets plus ou moins cimentés, incluses dans les alluvions plio-quaternaires.

Ce réservoir repose sur le miocène et le pliocène inférieur marneux, totalement imperméable.

Sous les alluvions plio-quaernaires, quatre horizons géologiques, datés du secondaire et du tertiaire, sont potentiellement aquifères :

- Le lias carbonaté ;
- Les dolomies de Tlemcen ;
- Les dolomies de Terni ;
- Les grés du miocène ;
- Les formations du plio-quadernaires.

2- Présentation des principales nappes :

La protection des ressources en eaux souterraines impose au préalable une localisation précise des aquifères ainsi que la connaissance du fonctionnement général des nappes. Pour le secteur concerné par l'étude, les eaux souterraines sont réparties en cinq (05) nappes contenues dans la plaine de Maghnia et Zrigua.

2-1 Nappe : « NP01) :

Elle gît dans la plaine de Maghnia, en état libre dans les formations plio-quadernaires, à bonne perméabilité, qui se prolongent jusqu'au territoire marocain. Sa puissance varie de 10 à 75m avec une surface piézométrique de 5 à 30m par rapport au sol.

2-2 Nappe : « NP02) :

Selon son mode de gisement, elle peut être libre à captive, et prend son extension également dans la plaine de Maghnia. Ses limites lithostratigraphiques sont :les marnes plio-quadernaires formant le toit et le mur de nappe constitué dans les marnes du jurassique ou les grés du lusitanien. La puissance de l'aquifère varie entre 20 à 80m ; la profondeur de la nappe y est de 20 à 30 m.

2-3 Nappe : « NP03) :

Elle se developpe dans la partie Ouest des monts de Traras et sous la plaine de Maghnia, avec une épaisseur allant de 20 à 100 m. la profondeur de la surface piézométrique est d'environ de 30 m.

2-4 Nappe : « NP04) :

C'est une nappe captive, constituée des grés de lusitanien qui forme avec NP03 un réservoir unique à même extension. La partie aquifère possède une épaisseur de 30 à 80 m et la surface piézométrique est sub-artésienne.

2-5 Nappe : « NP05) :

Contenue dans les calcaires argileux ou gréseux du lias, elle est libre ou captive. la puissance de la formation calcaire est de 400 m et la surface piézométrique se situe approximativement à 10 m de profondeur.

IV-3.5.5 Sols et Végétation :

D'une manière générale, les sols dans ce bassin sont constitués par :

- les sols calcaires qui longent l'oued Mouilah et se prolongent au Nord-Est des monts des Traras et aux piémonts de Tlemcen. On y trouve généralement une végétation herbacée.
- Les sols calciques : caillouteux et peu profonds, ils se développent surtout le long de la vallée d'oued Mouilah.
- Les sols alluviaux constitués principalement de sols calcaires lourds recouvrant les basses terrasses et les lits des oueds. Ils sont localisés au Nord de la plaine de Maghnia.
- Les sols rouges à encroûtement : ces sols formés de marnes du Miocène, couvrent une grande partie de la plaine de Maghnia où l'on rencontre une culture extensive irriguée.

La distribution du couvert végétal (Tableau IV.9), montre que la moitié de la superficie du bassin de l'oued Mouilah est constitué de terrains nus, localisés dans la partie ouest du bassin (Fig IV.9). Ces terrains susceptibles d'être transpercés par l'effet de pluies violentes, correspondent à une zone plate à pente inférieure à 5%. L'autre partie du bassin se trouve suffisamment couverte pour résister aux menaces érosives.

Tableau IV.10: Distribution du couvert végétal dans le bassin d'oued Mouilah

Occupation des sols	Surface (ha)	% des surfaces
Cultures extensives	57 200	21,58
Couvert forestier dégradé	9 500	3,58
Couvert forestier normal	39 000	14,72
Arboriculture	1 200	0,45
Couvert mort	131 000	49,43
Prairies et terrains de pacage	27 100	10,23

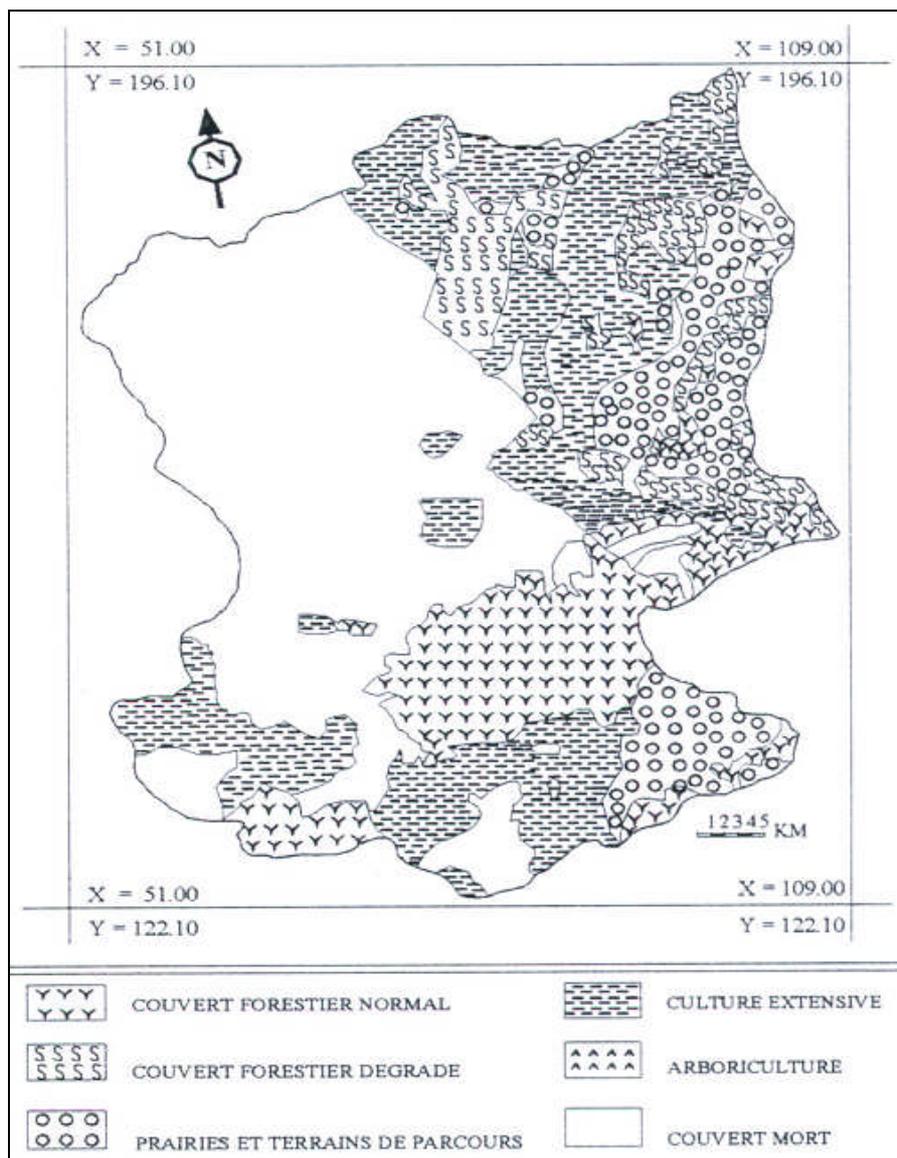


Figure IV.9: Carte d'occupation du sol du bassin versant Mouillah (BOUANNANI, 2006)

Chapitre V

Hydro climatologie

Chapitre V : Hydro climatologie

V-1. Introduction:

L'objectif de la climatologie est de caractériser l'environnement. Pour notre cas, plusieurs stations Météorologiques existent dans l'environnement du bassin versant, entre autre la station de Maghnia, celles de Beni Ouassine, BeniBehdel, Sidi Medjahed, ainsi que celle de Hammam Boughrara, couvrant la partie algérienne du bassin.

Pour étudier ces données, nous nous sommes basés sur une série de mesures s'étalant sur 43 ans (1963-2006). Cette série est la plus récente et ne présente pas de lacunes.

Dans ce qui suit on va étudier les paramètres climatiques ayant une relation avec l'écoulement de surface et la diffusion et propagation des polluants dans les cours d'eau à savoir :

- Les précipitations mensuelles et annuelles ;
- Les précipitations maximales journalières ;
- Les températures moyennes ;
- L'évapotranspiration potentielle annuelle et mensuelle ;
- Le diagramme d'ombrothermique...etc.

V-2. Aspect du climat:

Le climat est de type méditerranéen, il est caractérisé par des hivers doux pluvieux et des étés chauds et secs.

V-3. Les précipitations:

La pluie est un facteur climatique très important qui conditionne l'écoulement saisonnier et influence directement le régime des cours d'eau ainsi que celui des nappes aquifères.

La région d'étude est considérée parmi les régions moyennement pluvieuses avec une moyenne annuelle de l'ordre de 300 mm. Elles sont relativement variables et irrégulières d'une année à une autre.

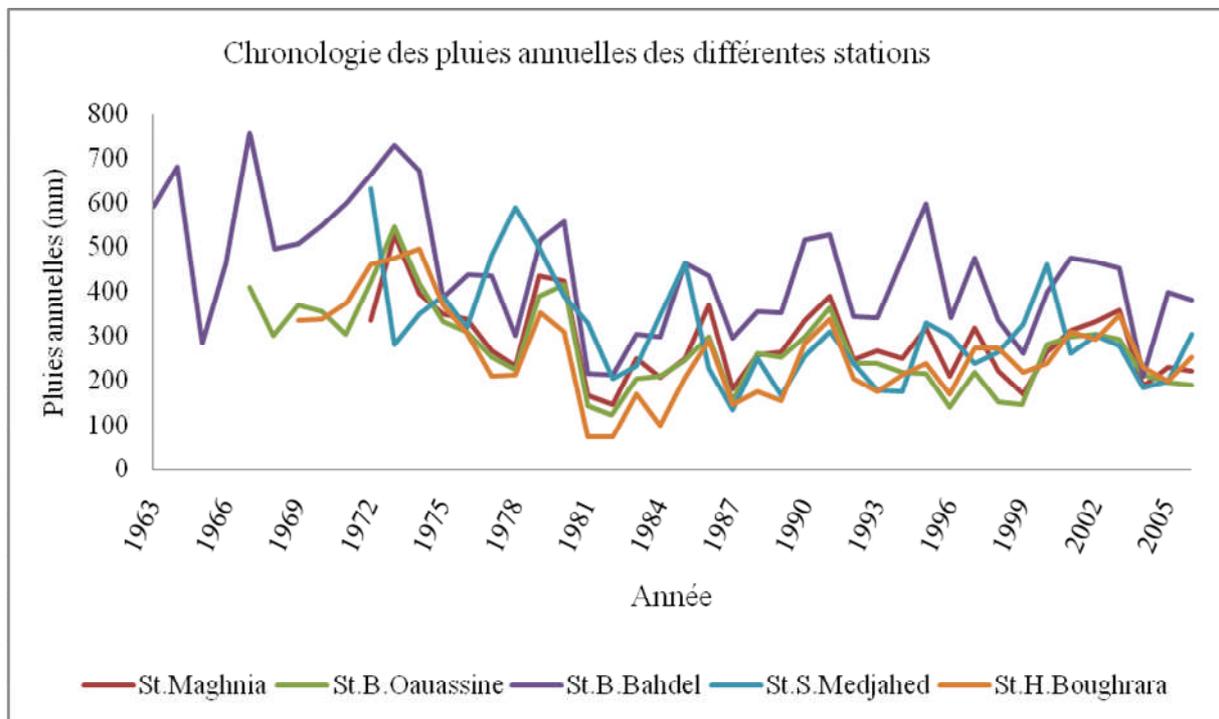
Les stations pluviométriques prises en compte par l'étude sont résumées sur le tableau V.1

Tableau V .1 : présentation des stations pluviométriques prises en charge

Stations	Codes	Coordonnées		Période d'observation
		X	Y	
Maghnia	160302	90,600	174,600	1972-2006
Beni Ouassine	160303	90,800	180,700	1967-2006
Beni Bahdel	160403	115,00	164,6	1963-2006
Sidi Medjahed	160407	102,800	173,100	1967-2006
Hammam Boughrara	160501	103,700	185,800	1967-2006

V-3.1 Analyse des précipitations annuelles :

La variation des précipitations annuelles durant la période d’observation montre l’écart entre les valeurs extrêmes, signe d’une grande irrégularité, nous remarquons sur la figure V.1 que la variation des précipitations entre les stations étudiées est très rapprochée, néanmoins nous remarquons que la station de Beni Bahdel représente les valeurs les plus élevées de la série.



Graph V.1 Chronologie des précipitations annuelles des différentes stations

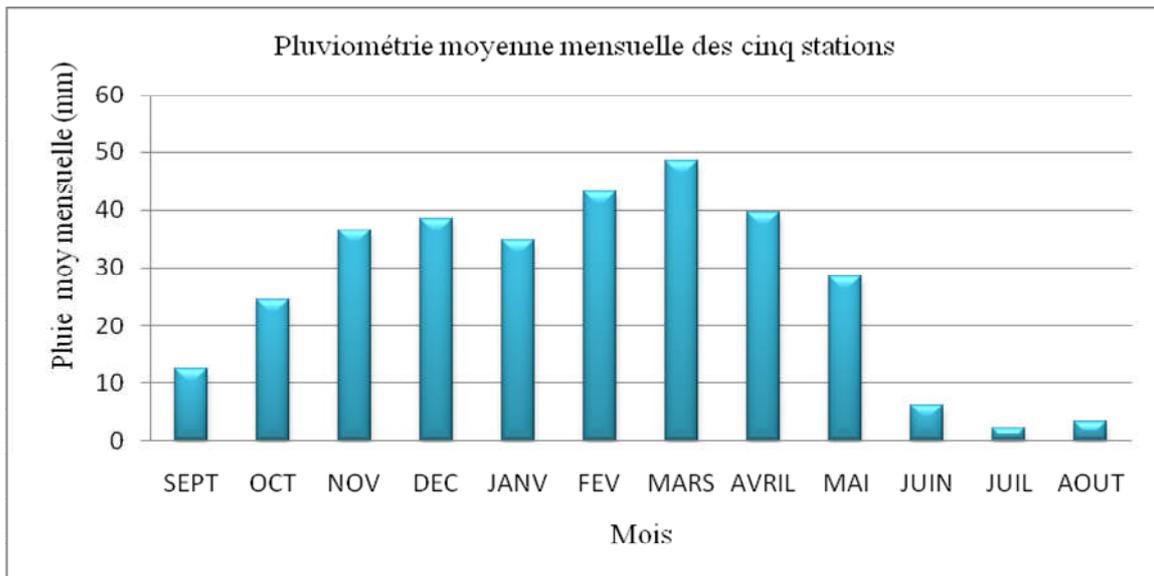
Tableau V.2 : Caractéristiques statistiques des précipitations

Stations	Maghnia	B.Ouassine	B.Bahdel	S.Medjahed	H.Boughrara
Période d'observation	1972-2006	1967-2006	1963-2006	1967-2006	1967-2006
Moyenne	285.45	272.06	444.08	306.82	259.96
Minimale	144.9	121.40	208.70	133.00	74.10
Maximale	528.5	544.80	756.90	631.00	496.90
Ecart-type	87.09	94.86	139.09	112.85	101.65

V-3.2 Analyse des précipitations mensuelles:

Représentant sur la figure V.2 la variation des précipitations moyennes mensuelles des stations, nous remarquons que le mois le plus pluvieux est le mois de **Mars**. Sa pluviométrie moyenne dépasse les 48 mm tandis que le mois le moins pluvieux est celui de **Juillet** avec une pluie moyenne qui ne dépasse pas les 2 mm (période estival).

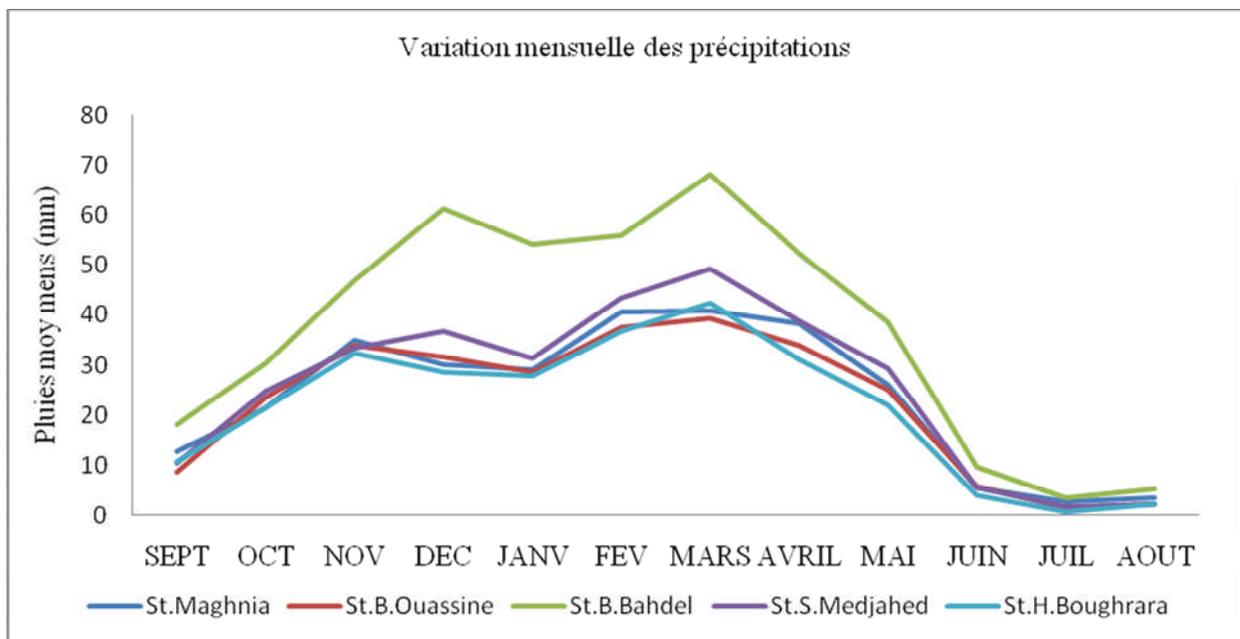
On remarque ainsi que les plus fortes pluies sont enregistrées en printemps.



Graphe V.2 Hystogramme des précipitations moyennes mensuelles

L'analyse comparative de l'évolution des précipitations mensuelles au niveau des stations étudiées (figure V.3), met en évidence pour toutes les stations une période humide allant du mois de d'octobre jusqu'au mois de Mai, alors que la période sèche s'étale du mois de Juin jusqu'au mois d'Octobre.

Un pic de précipitations est enregistré au mois de Mars, et ce pratiquement pour l'ensemble des stations.

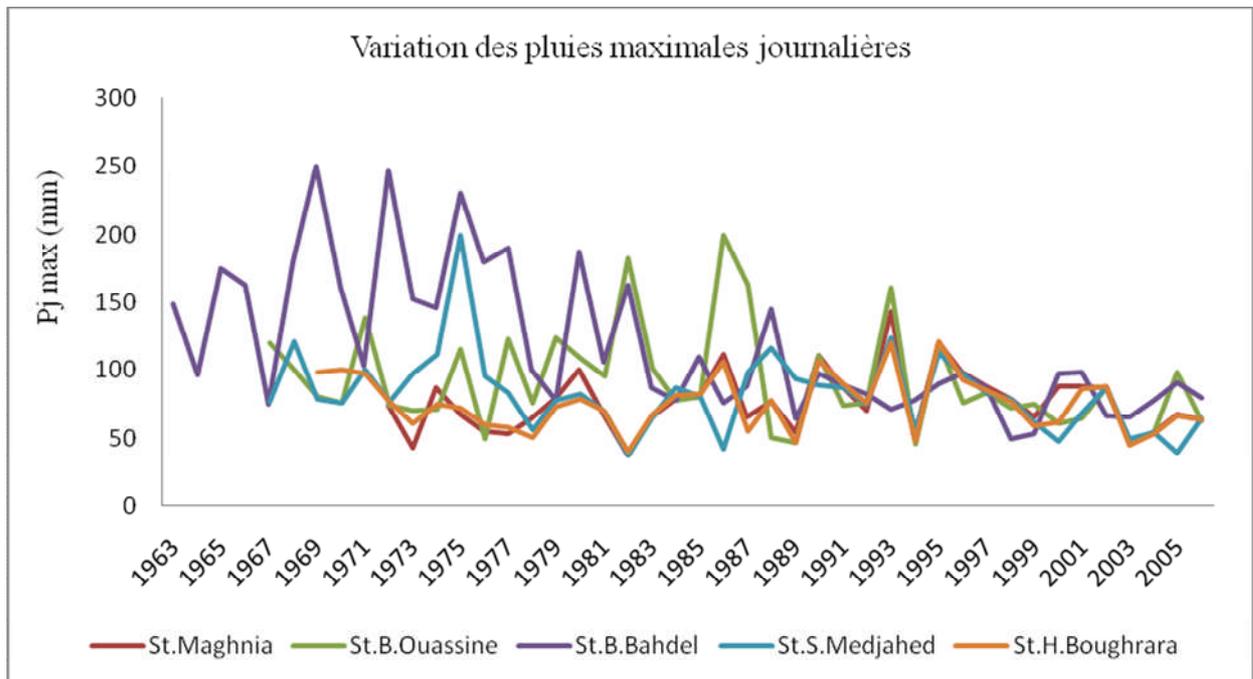


Graphe V.3 Variation des précipitations mensuelles des cinq stations

V-3.3 Précipitations maximales journalières :

Les précipitations maximales journalières permettent de calculer les intensités des pluies les plus fréquentes et d’estimer, par conséquence, des crues.

Utilisant les précipitations maximales journalières des cinq stations considérées, nous illustrons la chronologie des pluies maximales sur la figure V.4



Graph V.4 Chronologie des pluies journalières maximales des cinq stations.

On remarque que les précipitations ont pratiquement les mêmes tendances avec des gausses dès les années 1970 suivi par des minimas durant les dernières années.

Remarquons ainsi que les pluies journalières maximales enregistrées au niveau de la station de Maghnia sont proches de celles enregistrées à la station de Hammam Boughrara, cela peut être justifié par l’emplacement des deux stations (stations proches).

Toujours la station de Beni Bahed enregistre les valeurs les plus élevées.

On note une dissymétrie à gauche signe que les séries suivent une loi gaussienne semi normale (logarithmique) (le coefficient d’asymétrie le confirme).

Tableau V.3 présente les différents paramètres statistiques

	Maghnia	B.Ouassine	B.Bahdel	S.Medjahed	H.Boughrara
Période d’observation	1972-2006	1967-2006	1963-2006	1967-2006	1967-2006
Moyenne	75.92	92.18	117.28	81.95	75.49
Ecart-type	22.84	37.05	52.38	28.98	20.41
Coefficient d’asymétrie (Cs)	0.82	1.18	1.04	1.60	0.36

On détermine par la suite les intensités pluviales, génératrices des crues, pour une durée d'une demi-heure en fonction des précipitations journalières maximales et à fréquences différentes.

Tableau V.4 Calcul des intensités pluviales :

Station	Loi d'ajustement	Fq = 90% (10 ans)		Fq= 99% (100 ans)		Fq = 99.9% (1000 ans)	
		P _{JMax} (mm)	I (mm/h)	P _{JMax} (mm)	I (mm/h)	P _{JMax} (mm)	I (mm/h)
Maghnia	Log (p)=1.923+0.183 μ	8.7	17.3	10.5	21.0	18.8	23.6
B .Ouassine	Log (p)=1.893+0.191 μ	8.5	17.0	10.4	20.8	11.8	23.6
B.Bahdel	Log (p)=2.143+0.670 μ	20.2	40.5	40.6	81.2	63.2	126.4
S.Medjahed	Log (p)=1.953+0.199 μ	9.1	18.2	11.2	22.4	12.8	25.6
H.Boughrara	Log (p)=1.859+0.244 μ	8.8	17.6	11.3	22.7	13.3	26.6
Moyenne		11.1	22.1	16.8	33.6	22.6	45.2

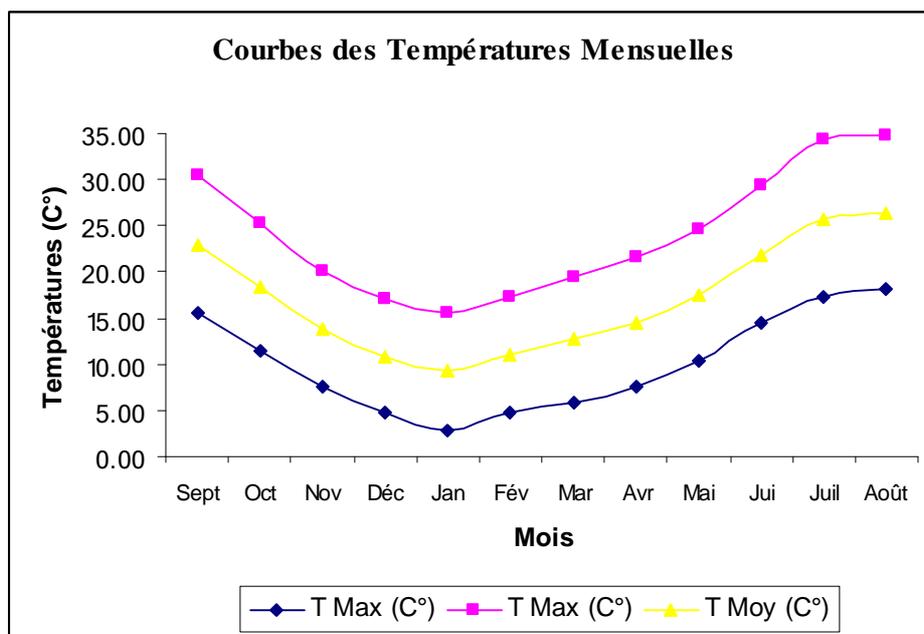
μ : variable de Gauss.

V-4 Température:

La température moyenne saisonnière varie entre 10.33 °C en hiver et 24.70 °C en été, par contre la moyenne annuelle et de l'ordre de 17.09 °C Tableau N°: V.5.

Tableau V.5 : Température moyennes mensuelles de 20 ans.

Stations	T°C	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	An
Maghnia	Min	15.6	11.5	7.6	4.7	2.8	4.7	5.9	7.5	10.4	14.4	17.3	18.1	10.04
	Max	30.4	25.3	20.2	17.1	15.6	17.3	19.5	21.5	24.6	29.4	34.3	34.7	24.15
	Amp	14.8	13.8	12.6	12.4	12.8	12.6	13.6	14	14.2	15	17	16.6	14.21
	Moy	23	18.4	13.9	10.9	9.2	11	12.7	14.5	17.5	21.9	25.8	26.4	17.09



Graph V.5: Courbes des Températures mensuelles

V-4.1 Diagramme Ombro-thermique de Gausсен:

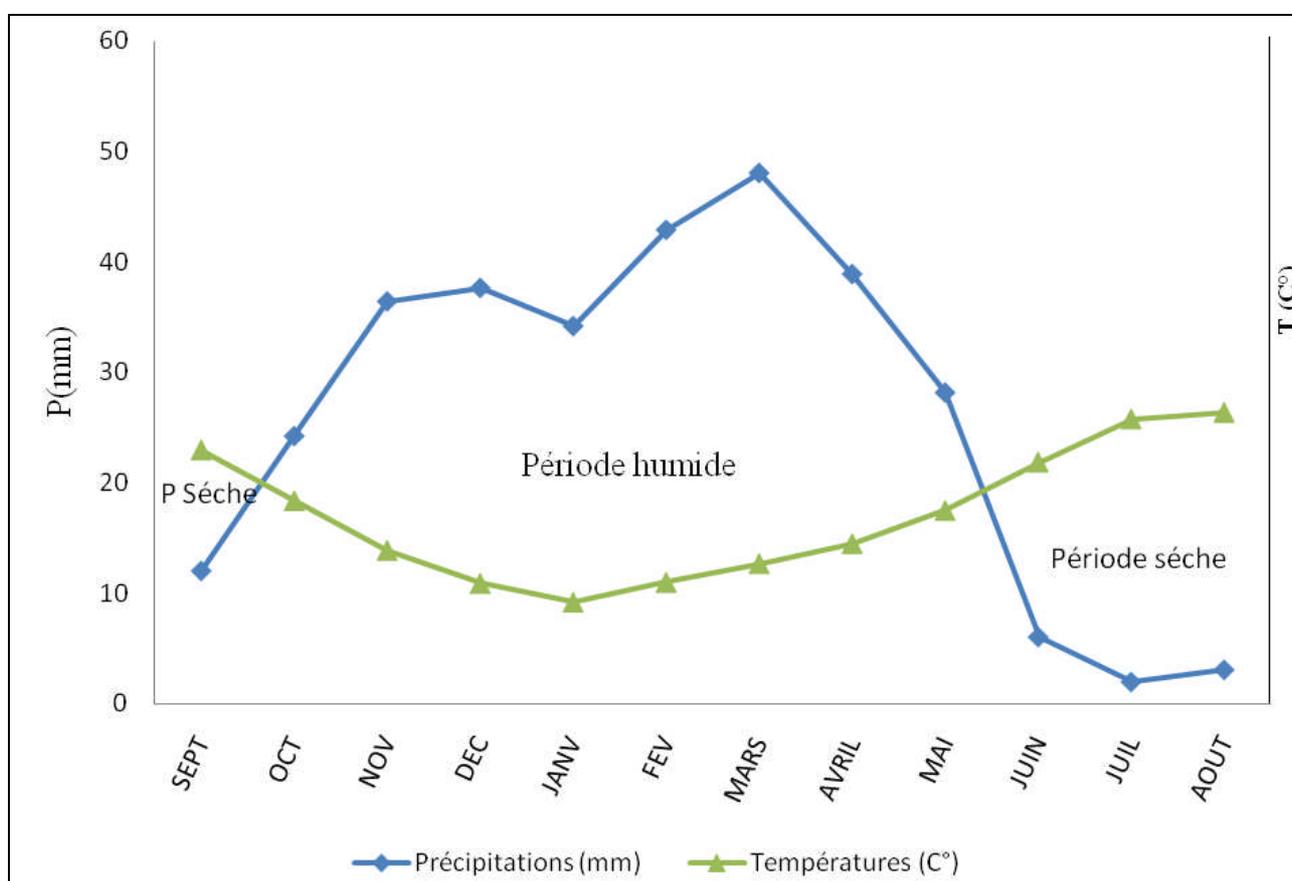
L'analyse de deux paramètres climatiques (température et précipitation) permet de tracer la courbe ombro-thermique (Fig N° I-02) qui met en évidence deux périodes :

- L'une de sécheresse : s'étalant entre le mois de Mai et le mois de Septembre.
- L'autre humide : s'étalant du mois d'Octobre au mois de Mai.

L'évolution de l'humidité de sol est définie par le rapport Pluie/Température P/T établi mensuellement (tableau V.4).

Tableau V.6 valeurs mensuelle du rapport P/T.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août
P/T	0.54	1.33	2.63	3.53	3.77	3.93	3.83	2.73	1.63	0.28	0.08	0.12



Graphe V.6: Diagramme Ombre Thermique De GAUSSEN

V-5 L'humidité :

L'humidité est plus élevée en hiver qu'en été, le taux d'humidité moyen au cours de l'année est de 60 à 70%.

V-6 Les vents :

Le vent est un facteur important du climat, il influe sur la température, l'humidité et l'évaporation.

La direction, la fréquence et la vitesse des vents sont variables au cours de l'année.

En générale, la connaissance de la vitesse et de la direction des vents est primordiale pour la mise en place d'un ouvrage quelconque. Les vents dominants dans la région sont de direction Ouest- Est Ouest avec une vitesse assez constante au cours de l'année, entre 2.4 et 3.6m/s, avec un maximum en hiver et un minimum en été.

Tableau V.7 : Moyennes mensuelles des vitesses de vent à Maghnia durant la période 1976 à 1984.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	An
Vitesse (m/s)	2.4	2.5	2.9	3.3	2.8	3.6	3.1	3.0	2.9	2.4	2.4	2.7	2.8

V-7 L'insolation :

La durée d'insolation est donnée au tableau V.5 en heure par mois. La moyenne journalière mensuelle d'insolation la plus faible est enregistrée en janvier (5.7 h), et la plus grande en juin (10 h) ; la moyenne de durée d'insolation journalière annuelle est de 7.6 h.

La radiation solaire (KWh/m²/jour) est donnée pour la région d'étude, en moyenne, au tableau ci-dessous.

Tableau V.8 : La durée d'insolation et La radiation solaire

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	An
Heures	252	229	191	183	178	175	205	251	247	300	299	281	2791
KWh/m ² /j	5.52	4.16	3.03	2.54	2.77	3.63	4.73	6.04	6.64	7.19	7.44	6.66	5.03

1.8 Phénomènes secondaires :**1.8.1. La grêle :**

Le plus grand nombre de jours de grêle est observé, surtout au début du printemps, avec environ trois à quatre jours de chute par an sous forme des averses.

V-8.2. Le Sirocco :

Il est moins fréquent qu'a l'intérieur du pays, cependant, il peut se manifester sur toute la région surtout en été. Il constitue un des facteurs qui influent sur la diminution des récoltes. Ces vents sont généralement chauds et ils font baisser le degré hygrométrique (humidité relative) qui peut descendre jusqu'à quelque %.

On trouve sur le tableau N°II-06 : le nombre moyen de jours de sirocco, ces résultats sont les moyennes de 30 ans.

Tableau V.9 : Moyennes mensuelles de 30 ans d'observation de sirocco.

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	An
Vitesse (m/s)	3.3	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.3	1.5	1.9	3.8	5.1	17.1

V-8.3. Le brouillard :

Le brouillard est surtout fréquent dans la partie nord, où il est observé durant toute l'année, il est dû à la présence de gouttelettes d'eaux dans l'atmosphère qui diminuent la visibilité horizontale à moins de 1 km.

V-9. L'évapotranspiration (ET) :**V-9.1. Introduction :**

Le retour de l'eau à l'atmosphère peut se faire de différentes manières, soit directement par évaporation à partir d'une surface d'eau libre (mer, lac, cours d'eau, etc.), soit le plus souvent à partir d'un sol ou par l'intermédiaire des végétaux. On parle dans ce deuxième cas d'évapotranspiration.

Pour l'évaporation, la quantité d'eau qui repart dans l'atmosphère dépend uniquement des paramètres physiques tels que la température de l'air, de l'eau, de la vitesse du vent, du degré hygrométrique, de l'ensoleillement, etc. L'évapotranspiration, elle, dépend en plus du couvert végétal et de son stade de développement ; Sa mesure en est rendue d'autant plus difficile.

Il existe des méthodes vont permettre le calcul de l'évapotranspiration réelle (ETR) et l'évapotranspiration potentielle (ETP), telle que la méthode de Turc pour l'ETR et celle de Thornthwaite pour l'ETP.

V-9.2. L'évapotranspiration potentielle (ETP) :

C'est l'évapotranspiration qui correspond à la double hypothèse du maintien du taux d'humidité du sol à une valeur très voisine de la capacité de rétention et d'un développement de la culture en pleine croissance.

Pour estimer l'évapotranspiration potentielle, on utilise différentes méthodes basées sur des variables climatiques, cependant le choix dépend principalement du type de données climatiques disponibles et le type de climat de la région d'études. Les quelques formules empiriques qu'on utilise sont celles de :

- 1- Formule de BLANEY et CRIDDLE (U.S.A 1945) modifiée par la FAO en zones arides et Sub-arides
- 2- La Méthode de THORNTHWAIT (1944–1948) pour les zones semi arides et semi pluvieuses ;
- 3- La formule de TURC (1953) en France pour les zones humides et sub-humides.

Les trois méthodes donnent des valeurs inégales du fait que chaque formule a été élaborée dans une région différente.

Pour notre cas nous trouvons dans un climat semi aride, donc la méthode de THORNTHWAIT est la plus appropriée :

Les valeurs de l'évapotranspiration relatives aux différents mois de l'année sont consignées dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.10 Calcul de l'ETP par la méthode de Thornthwaite.

	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jui	Juil	Août	Année
T °C	23	18.4	13.9	10.9	9.2	11	12.7	14.5	17.5	21.9	25.8	26.4	17.09
I*	10,12	7,17	4,68	3,26	2,53	3,31	4,07	4,99	6,64	9,34	12,00	12,41	80,52
ETP (mm)	108,1	67,80	36,33	23,40	17,80	23,87	36,90	49,60	77,24	115,63	157,92	154,97	869,58

I* Indices thermique de Thornthwaite

V-9.3. L'évapotranspiration réelle (ETR):

L'évapotranspiration réelle dépend des disponibilités en eau dans le sol et est inférieure ou égale à l'ETP. Le fonctionnement hydrique et photosynthétique et la croissance des plantes est d'autant plus favorable que le rapport ETP/ETR est proche de 1. Dans le contexte climatique actuel ce rapport est toujours inférieur à 1. aussi, si les températures augmentent et si la pluviométrie est déficitaire en été, ce rapport sera plus faible et la croissance des plantes en sera affectée.

Pour le calcul de l'ETR on utilise la formule de TURC est applicable à tous les climats, elle est fonction des précipitations et de température moyenne annuelle.

$$ETR = P [(0,9 + P^2/L^2)]^{1/2}$$

Avec :

$$L = 300 + 25 T + 0,05 T^3$$

T = Température moyenne annuelle °C

ETR = 314,68 mm une valeur qui dépasse la valeur de précipitation annuelle moyenne

V-10 Déficit d'écoulement :

V-10 .1 Méthode de WUNDT :

La méthode de Wundt, permet de combiner entre les valeurs de la température moyenne annuelles et les précipitations en donnant une valeur de déficit d'écoulement de l'ordre de D= 317 mm/an soit 101% des précipitations.

V-10 .2 Méthode de VERDEIL :

La méthode de Verdeil permet de déduire un déficit de l'ordre de D= 273 mm soit 87 % des précipitations.

V-11 Le Ruissèlement :

La lame d'eau ruisselée sera calculée par la formule empirique de TIXERONT-BERKALOFF, ce qui permet le calcul de la lame d'eau infiltrée.

$$E = P^3/3 \quad \text{si } P > 600 \text{ mm}$$

$$E = P^3/3 \text{ ETP} \quad \text{si } P < 600 \text{ mm}$$

Avec : E, P et ETP (en m).

Soit $E = 8,89$ mm correspondant à une évapotranspiration de l'ordre de : $\text{ETP} = 869,6$ mm selon Thornthwaite, soit 3% des précipitations moyennes annuelles.

V-12 Les apports moyens :

V-12.1 Estimation du temps de concentration (T_c) :

C'est la durée nécessaire à l'eau pour s'écouler depuis l'élément hydrologique le plus éloigné en amont du bassin versant jusqu'au l'exutoire.

Utilisant plusieurs formules pour le calcul de T_c .

a) Formule de GIANDOTI :
$$T_c = \frac{4S^{0.5} + 1.5L}{0.8(H_{moy})^{1.2}} \quad ; \quad T_c = 12.59 \text{ heures}$$

b) Formule de SKOLOVOSKY :
$$T_c = \left[\frac{\sqrt[3]{S.L}}{\sqrt{I}} \right]^{0.75} \quad ; \quad T_c = 8,48 \text{ heures.}$$

c) Formule de KIRPICH :
$$T_c = 0.6615 \left(\frac{L}{\sqrt{I}} \right)^{0.77} \quad ; \quad T_c = 9.10 \text{ heures.}$$

Telle que :

- S : surface du bassin versant ;
- L : longueur du thalweg principale ;
- I : pente du bassin versant ;
- H_{moy} : altitude moyenne du bassin versant.

Devant la superficie importante du bassin versant et la longueur du thalweg principal, les valeurs calculées ne sont pas très importantes vue la distance parcourue par une goutte d'eau pour arriver à la cuvette du barrage.

V-12.2 Apport liquide :

L'apport et la lame d'eau écoulée à l'échelle annuelle, sont exprimés par les formules suivantes :

$$A_L = (E * S).10^{-3}$$

Où :

- A_L : Apport liquide annuel, (Hm^3) ;
- E : lame écoulée ou ruissèlement (mm).
- S : surface du bassin versant (km^3).

Il existe plusieurs formules empiriques permettant la détermination de la lame d'eau écoulée annuellement (DERI, SAMIE, PADON, TIXERONT-BERKALOFF...etc

a) Formule de DERI : $E = M_0.T$; $M_0 = 11.8(P)^{2.82} [L/S.km^2]$

M_0 : module spécifique moyen

$T = 31.54 \cdot 10^6$ second

$$E = 14.06mm$$

b) Formule de SAMIE : $E = [293 - 2.2\sqrt{S_{bv}}] [P]^2$

$$E = 18.92mm$$

c) Formule de PADON : $E = M_0.T$; $M_0 = k(0.0019.P)^{3.57}$

K : coefficient tenant compte de l'augmentation du module spécifique en fonction de l'altitude, il est déterminé en fonction de l'altitude moyenne.

$$E = 6.04mm$$

d) Formule de TIXERONT-BERKALOFF : $E = P^3/3$ ETP

$$E = 8,89 \text{ mm}$$

La valeur moyenne est de : **11,79 mm**

Donc l'apport annuel moyen est de : $A_L = 24.28Hm^3$

V-12. 3 Apport solide :

C'est le volume de sédiments transportés en suspension et par charriage qui proviennent essentiellement de l'érosion du bassin versant.

La grandeur des apports solides dépend de l'étendue, du relief du bassin, de la couverture végétale, de la notion géologique du sol, au régime des pluies et de la température.

Pour les bassins versants, en Algérie, la formule de SOGREAH est applicable.

$$A_s = \alpha.R^{0.15}$$

Où :

A_s : dégradation spécifique (t/km².an)

R : le ruissèlement moyen

α : paramètre de perméabilité fixé par le tableau suivant :

Tableau V.11 paramètre de perméabilité du sol (α)

Perméabilité du bassin versant	α
- Perméabilité élevée	8.5
- Perméabilité moyenne à élevée	75
- Perméabilité faible à moyenne	350
- Perméabilité faible	1400
- imperméable	3200

Prenant $\alpha = 75$

$$A_S = 75 \cdot (11.79)^{0.15} = 56,42 \text{ t/km}^2 \cdot \text{an}$$

Donc l'apport solide annuel A_{Solide} est : $A_S \cdot S$ (Où : S, superficie du bassin versant).

$$\underline{A_{\text{Solide}} = 0,116 \text{ M tonne/an}}$$

Malgré la quantité importante de l'apport solide, influera sur le volume stocké par le barrage de hammam Bouhrara, néanmoins nous pouvons dire que la dégradation spécifique reste modeste.

Chapitre VI

**Analyse de la pollution
-Qualité des rejets-**

Chapitre VI Analyse de la pollution- Qualité des rejets

VI-1. Introduction :

Le bassin versant de l'Oued Mouillah connaît de fortes pollutions sollicitées par les divers rejets liquides et solides de part et d'autre de la frontière Algéro-marocaine.

Les sources de ces rejets sont d'ordre domestique, agricole et industriel. Leur impact varie selon la composition des matières rejetées, d'une part, et selon la réaction entre les éléments et leur propagation dans le milieu urbain, d'autre part.

Ces rejets ont un impact néfaste sur beaucoup de régions stratégiques de l'ensemble du bassin versant de l'Oued Mouillah, comme le milieu urbain de la ville de Maghnia et, notamment, sur le barrage de Boughrara situé à l'exutoire principal de l'Oued Mouillah, au point de confluence avec l'Oued Tafna.

Ce chapitre traite des différents rejets urbains, agricoles et industriels, pour chacune des deux parties du bassin versant, en l'occurrence les rejets de la partie algérienne et ceux de la partie marocaine

VI-2. Les sources de pollution :

VI.2.1. Côté Algérien :

VI.2.1.1. Sources de pollution domestiques :

a)- Les eaux usées :

Les eaux usées domestiques et d'eaux pluviales entraînent des substances minérales et organiques en suspension et en solution ainsi que des matières ou produits de charriage plus ou moins volumineux. Elles contiennent des micro-organismes (bactéries, virus, champignons, insectes, parasites...etc.) qui constituent un danger souvent porteur des maladies à transmission hydrique.

Pour notre zone d'étude, la pollution est due aux rejets d'eaux usées d'usage domestique des villes et agglomérations se trouvant dans le bassin versant, à savoir les communes de Maghnia, Hammam Boughrara, Sidi Medjahed et Bouhlou.

Maghnia, la plus importante agglomération de la côté Algérienne, est équipée d'un réseau d'assainissement mixte. Les eaux usées sont collectées et drainées par des collecteurs principaux de diamètre 800 et 1000 en béton armé longeant l'oued wardefou. lors des orages les eaux sont également drainées par des déversoirs d'orage où les oueds devenus les principaux milieux récepteurs des eaux usées et pluviales.

La structure du réseau hydrographique est importante, constituée de l'oued Ouerdefou et de ses affluents, situés tous en rive droite.. L'extension de la ville de Maghnia étant limitée au Nord, des extensions Ouest et Est avec celle au Sud , entre les oueds Ouerdeffou et Abbès, induisant ainsi une

discontinuité urbaine entre le centre-ville et les quartiers se développant sur la partie Sud de la ville (Cité Chouhada, Ouled Charef, Gueffaf,...).

Ces oueds reçoivent les rejets des unités industrielles, dont les plus importantes : La Maïserie, l'ENCG ...

Dans le cadre de la réduction de l'agressivité de cette pollution, une station d'épuration a été réalisée pour traiter les eaux usées de la ville de Maghnia.



Figure VI.1 : Représentation de la ville de Maghnia

La STEP de Maghnia ne prend pas en charge les effluents industriels. Sa situation géographique, à 5 km au Nord Est de la ville permet de supporter toute l'urbanisation existante et projetée, conformément à l'ancien PDAU. Cependant, les constructions sur certains axes, notamment Ouled Charef et Gueffaf, échappent à cette infrastructure hydraulique et les travaux de leur raccordement seront relativement plus onéreux.

Donnant ci-après une fiche technique de cette STEP.

Tableau VI.1 : Fiche technique de l'Unité

Date de démarrage des essais	Le 05/06/99
Capacité de traitement	155 000 équivalents – habitants.
Coût du projet	630.10 ⁶ DA (réévalué 30/05/2006)
Filière épuration	Boues activées
Entreprise de réalisation	Hydro-Traitement
Gestion et exploitation	O.N.A.
Délai de réalisation	26 mois (date inscription 16/02/89)
Milieu récepteur	Oued Ouerdeffou.

Nature des rejets :

Les rejets sont principalement constitués des eaux usées domestiques, parfois des eaux pluviales, lorsque les réseaux d'évacuation sont unitaires. Ces eaux entraînent des substances minérales et organiques en suspension et en solution ainsi que des matières volumineuses. Elles comportent tous les microorganismes (bactéries, virus, champignons, insectes, parasites,...etc.), constituant un danger permanent pour la santé publique.



Figure VI.2 : STEP de Maghnia

Rendement épuratoire théorique (données théoriques dimensionnement):

✓ DBO ₅	: 95.30 %
✓ DCO	: 93.00 %
✓ MES	: 98.10 %

Rendement épuratoire réel (données EXPLOITATION)

✓ DBO ₅	: 86.81 %
✓ DCO	: 79.70 %
✓ MES	: 86.85 %

Les eaux usées à l'entrée de la station passent par plusieurs étapes, à savoir :

- Le prétraitement ;
- Le traitement de dénitrification ;
- Le traitement biologique ;
- La décantation finale ;
- La désinfection.

D'après ces résultats, nous pouvons dire que le problème des rejets liquides domestique est résolu, il suffit que les services d'hydraulique assurent le raccordement de toutes les eaux usées urbaines à la station d'épuration.

b. les déchets solides :

La décharge actuelle des déchets solides urbains est située en amont de Hammam Chigueur, à environ **2.5Km** de la ville de Maghnia. Cette décharge ne répond pas aux normes techniques appropriées et peut être considérée comme une décharge sauvage, non contrôlé. Nous y trouvons, mélangé avec les déchets ménagers, les déchets hospitaliers, ainsi que les rejets industriel et agricole.

La quantité des déchets à évacuer varie d'une région à une autre, selon les saisons de l'année, les habitudes, le niveau de vie et d'éducation des habitants. Aucune formule ne permet d'en calculer la valeur, sauf des études et des observations effectuées sur place. Actuellement, les déchets ménagers sont estimés à **40.3 tonnes/jour**, soit environ **14710 tonne/an**, dont une partie importante de ces déchets se trouvera d'une façon ou d'une autre dans le bassin versant de l'Oued Mouillah, et par conséquent dans le barrage de Hammam Bouhrara.

Ainsi, il est suggéré de mener des études de gestion des décharges solide afin de régler le problème de pollution solide au niveau du bassin versant de l'Oued Mouillah, notamment la réalisation d'un centre d'enfouissement technique.

VI-2.1.2. Sources de pollution industrielle :

Les unités industrielles ont des productions très diverses et rejettent plusieurs types de contaminants dans les eaux résiduaires, dont le volume et le degré de contamination sont très variables. En règle générale, on distingue les eaux de procédé, qui sont le plus souvent contaminées puisqu'elles

entrent dans le processus même de fabrication, les eaux de refroidissement, plus ou moins contaminées, les eaux sanitaires et, dans certains cas, les eaux pluviales. Dans le secteur d'étude, la pollution est causée par quatre (04) principales unités industrielles situées à Maghnia, à savoir l'ENOF (entreprise de bentonite et de la terre décolorante), l'ENCG (entreprise des corps gras), Maïserie (ERIAD : Entreprise des aliments et dérivés) et CERTAF (complexe de la vaisselle et céramique). A signaler que les eaux de l'oued Mouillah contaminées par les rejets côté marocain, véhiculent non seulement une pollution d'origine domestique (eaux usées de la ville de Oujda) mais aussi des effluents d'origine industrielle (rejets de tanneries surtout) et agricole (engrais, pesticides et autres).

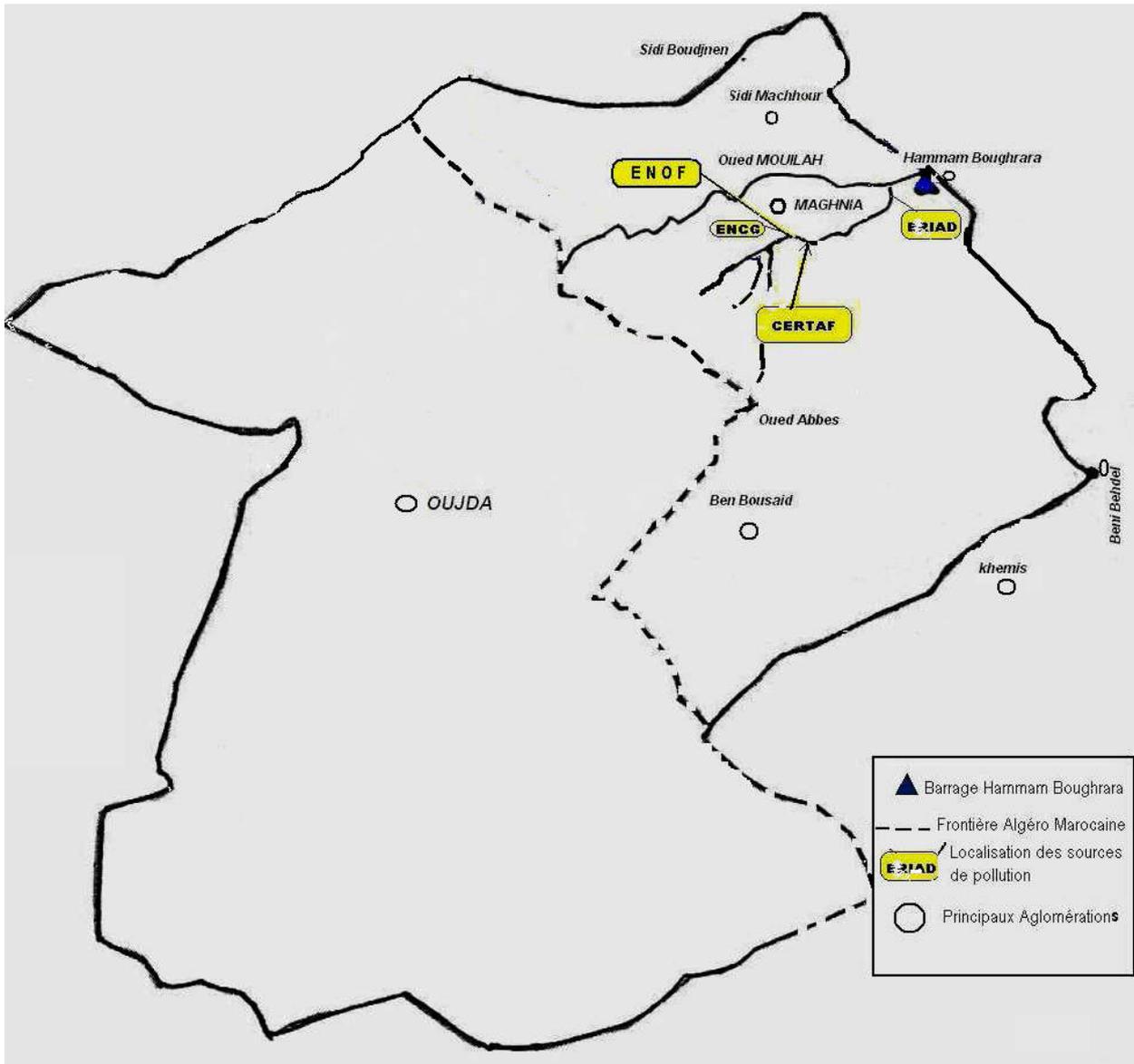


Figure VI.3 : Localisation des unités industrielles productives de la pollution (coté Algérien)

Nous donnons dans ce qui suit l’audit de chaque unité industrielle tout en présentant le processus de fabrication et le mode de traitement utilisé ainsi l’efficacité de ce mode afin de réduire la pollution.

a) AUDIT A L’ENCG :

Cette unité industrielle produit l’huile, le savon et la glycérine. L’usine utilise comme matières premières : l’huile brute (de tournesol et le colza), les graisses animales et végétales et les sous produits de savonnerie.

Comme matières secondaires, l’usine utilise : l’eau, la soude (NaOH), l’acide phosphorique (H₃PO₄), le sel (NaCl) et le chlorure ferrique (FeCl₃).

Elle occupe une superficie de 10 Ha. Les rejets se font dans l’Oued Abbès.



Figure VI.4 : Vue générale de l’unité ENCG (remarquons le rejet dans l’oued Abbès)

a-1) Fiche technique de l’Unité :

Tableau VI.2 : Fiche technique de l’Unité

Activité	Huilerie – Savonnerie- Glycérine
Production	Huile- savon
Capacité de production	Huile 100t/j - Savon 150t/j - Glycérine 7t/j.
Production réelle	Huile 56 t/j - Savons 38 t/j - Glycérine 1.3t/j
Consommation en eau	700 m ³ /j
Utilisation de l’eau	Production vapeur, Lavage d’huile, Rinçage résines.
Débit des effluents	200m ³ /j
Qualité des effluents	Tableau (VI.3)
Epuration des effluents	✓ Procédé d’épuration : Physico chimique + biologique ✓ Capacité : 200 m ³ /h ✓ Rendement : Biologique 0%, Physico chimique 75%
Milieu récepteur	Oued Abbés.

a-2) Actions d'amélioration entreprises par l'unité :

Plusieurs actions sont entreprises par l'unité dans le but d'améliorer la qualité de ses rejets à savoir :

- Récupération de l'eau glycinée ;
- Récupération du Soap stock ;
- Réhabilitation de la STEP et la mise en service ;
- Conditionnement de l'huile ;

Tableau VI.3: Qualité des rejets à la sortie de la STEP de l'unité

Paramètre	Dates de prélèvement								
	30/10/00	21/11/00	17/12/00	06/02/05	22/03/05	02/05/05	20/03/06	25/11/07	25/02/08
Couleur	Marron								
Ph	9	7.3	6.4	2.4	6.17	5.82	7.5	7.85	7.39
T°C	15.2	20.5	21	9.0	18.0	16.0	21	15	-
Oxygène dissout mg/l	0	0	3.8	0	0	0	0	2.7	0
DCO mg/l	28800	8000	5300	22000	8700	6048	1940	826	958
DBO5 mg/l	14404	3361	3818	15400	3394	4477	854	693	231
MES 105°C mg/l	2584	984	152	-	-	-	5093	683	42
Orthophosphates	-	30	45.49	32.1	6.3	10.9	0.35	8.7	1.2
Phosphore total	13.5	-	8.70	40.3	10.7	12.7	0.49	11.6	1.5

En considérant la charge la plus forte enregistrée le 30/10/00 et le 06/02/05, l'huilerie génère une charge de pollution de 80000 équivalents habitants. Si des efforts mesurables et chiffrés ont été consentis par l'entreprise, il ne reste pas moins de la charge de pollution des effluents, à la sortie de la STEP, est très élevée par rapport aux normes nationales en vigueur.

Les fluctuations trop importantes de la qualité des rejets nécessitent une bonne maîtrise de la filière physico-chimique pour augmenter le rabattement des charges, obtenir une qualité de rejets stable et éviter les pointes.

Ainsi ces actions ont permis à l'entreprise d'avoir un gain économique du, principalement, à la récupération et la valorisation des eaux glycinées et du soap stock avec une production de la glycérine industrielle et d'huile acides.

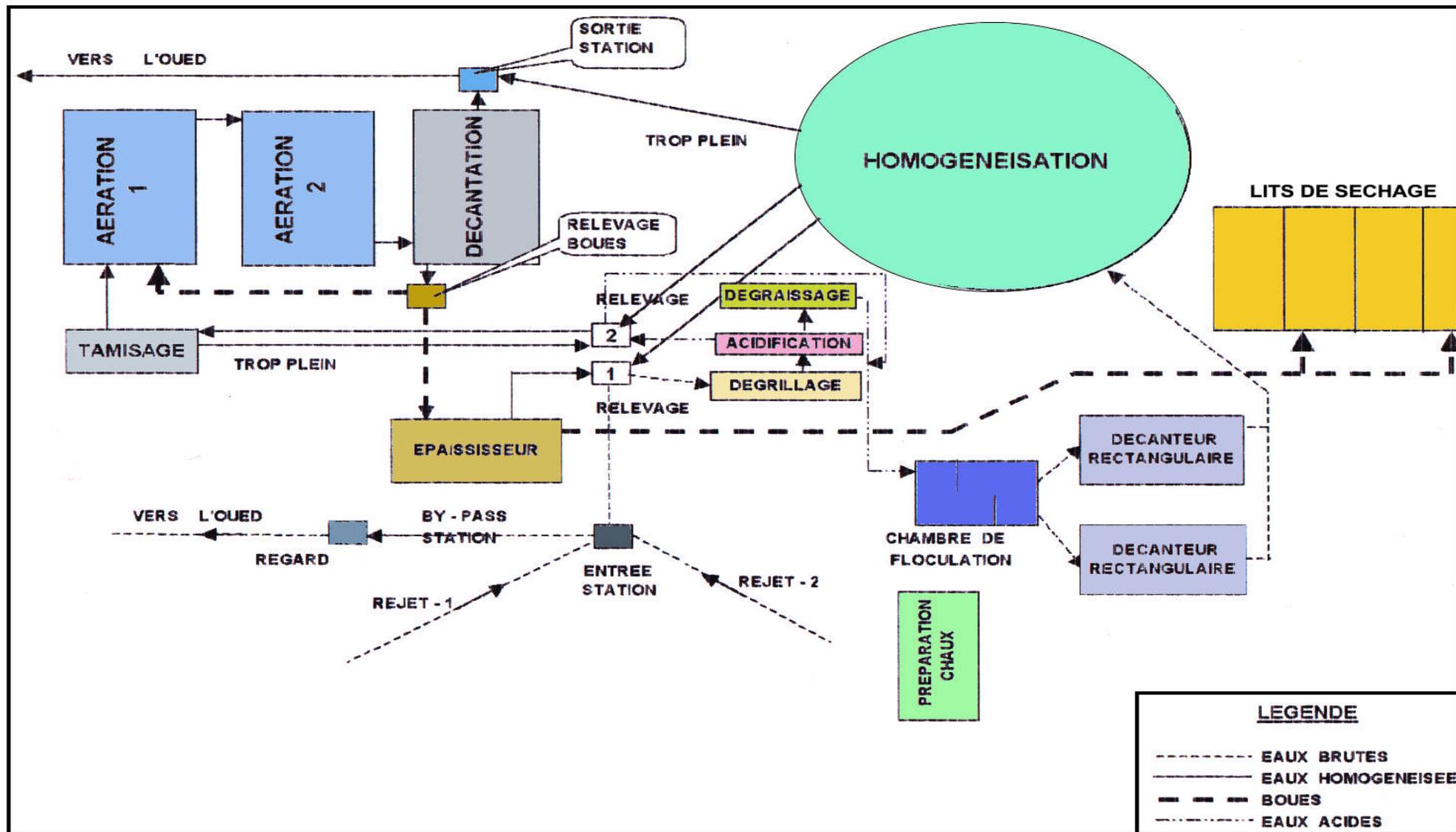


Figure VI.5 : Schéma de la filière de traitement des effluents de l'ENCG

b) AUDIT A L'ERAD (La Maïserie de la Tafna):

Cette unité fabrique des produits dérivés de Maïs. Elle a démarré en 1980 ; les eaux usées à la sortie de la chaîne de production témoignent d'une pollution très importante. Les eaux usées rejetées renferment une pollution en DBO₅ de l'ordre de 8000 mg/l, et en DCO d'environ 10200 mg/l.

Ces valeurs changeant d'un jour à l'autre. L'entreprise rejette dans l'oued Abbes 1600 M³/j d'eau chargée en gluten engendrant des mauvaises odeurs.

b-1) Fiche technique de l'Unité :

Tableau VI.4 : Fiche technique de l'Unité

Activité	Maïserie Amidonnerie
Production	Amidon, glucose, dextrine, gluten
Matière première	Maïs 25 000 t/an.
Capacité de production	200 t/j de maïs
Production réelle	100 t/j de maïs
Consommation en eau	600 à 800 m ³ /j
Source de pollution	Trempage du maïs, Lavage de l'amidon
Débit des effluents	25 m ³ /h
Qualité des effluents	Tableau (VI.5)
Procédé d'épuration	bassins de neutralisation-décantation
Milieu récepteur	Oued Abbés
Autocontrôle	NON



Figure VI.6: MAISERIE a) Vue intérieure



b) Vue extérieure

b-2) Actions d'amélioration entreprises par l'unité :

Les actions entreprises par la maïserie pour l'amélioration de la qualité de ces rejets sont présentées par :

- Réalisation de la station de neutralisation ;
- Augmentation du taux de récupération de gluten de 2,5% à 7% par un meilleur suivi de l'exploitation

Tableau VI.5 : Qualité des rejets à la sortie de la STEP de l'unité

Paramètre	Dates de prélèvement								
	30/10/00	21/11/00	17/12/00	06/02/05	22/03/05	02/05/05	23/04/06	25/11/07	20/12/08
Ph	7.10	6.8	4.6	4.5	3.74	7.62	4.07	6.8	6.78
T°C	24	28	21	30	29	28	20	16	14
Oxygène dissout mg/l	0	0	0	0	0	0	0	2.2	0
DCO mg/l	7400	10800	11100	15200	29200	32640	10200	520	470
DBO5 mg/l	5329	7129	8659	10033	19272	18274	1835	166.8	329.7
MES 105 °C	1509	2016	1136	-	-	-	3227	183	790
Orthophosphates	4.0	214	208.7	218.5	454.5	351	573	7.25	1.2
Phosphore total	10.5	225	238.5	275.4	656.4	278	-	8.75	1.75

On remarque qu'après mise en service de la STEP (après réhabilitation) les teneurs en DCO, DBO et phosphore total ont diminuées considérablement comparativement aux résultats des analyses avant 2008

La charge de pollution globale de l'unité calculée à partir des résultats des analyses du 17/12/00 est de 130000 habitants équivalents, soit supérieure à celle de la ville de Maghnia.

Après 2008 la charge de pollution a été nettement réduite. Ainsi, comme recommandations il convient à l'usine de continuer à fournir de gros efforts essentiellement sur la réduction de la pollution à sa source par une meilleure maîtrise du circuit de l'eau et des produits.

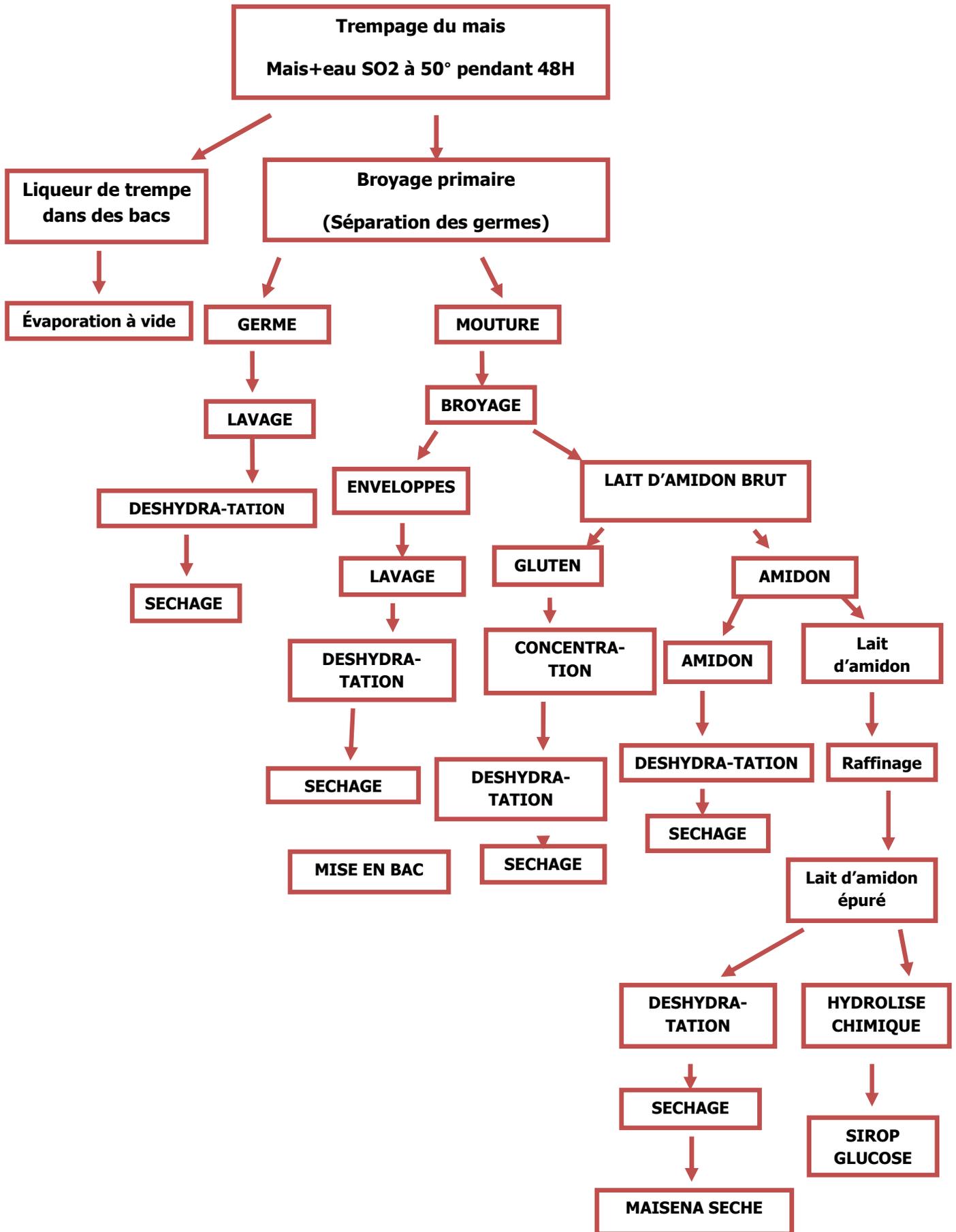


Figure VI.7: Processus de fabrication de la Mäiserie.

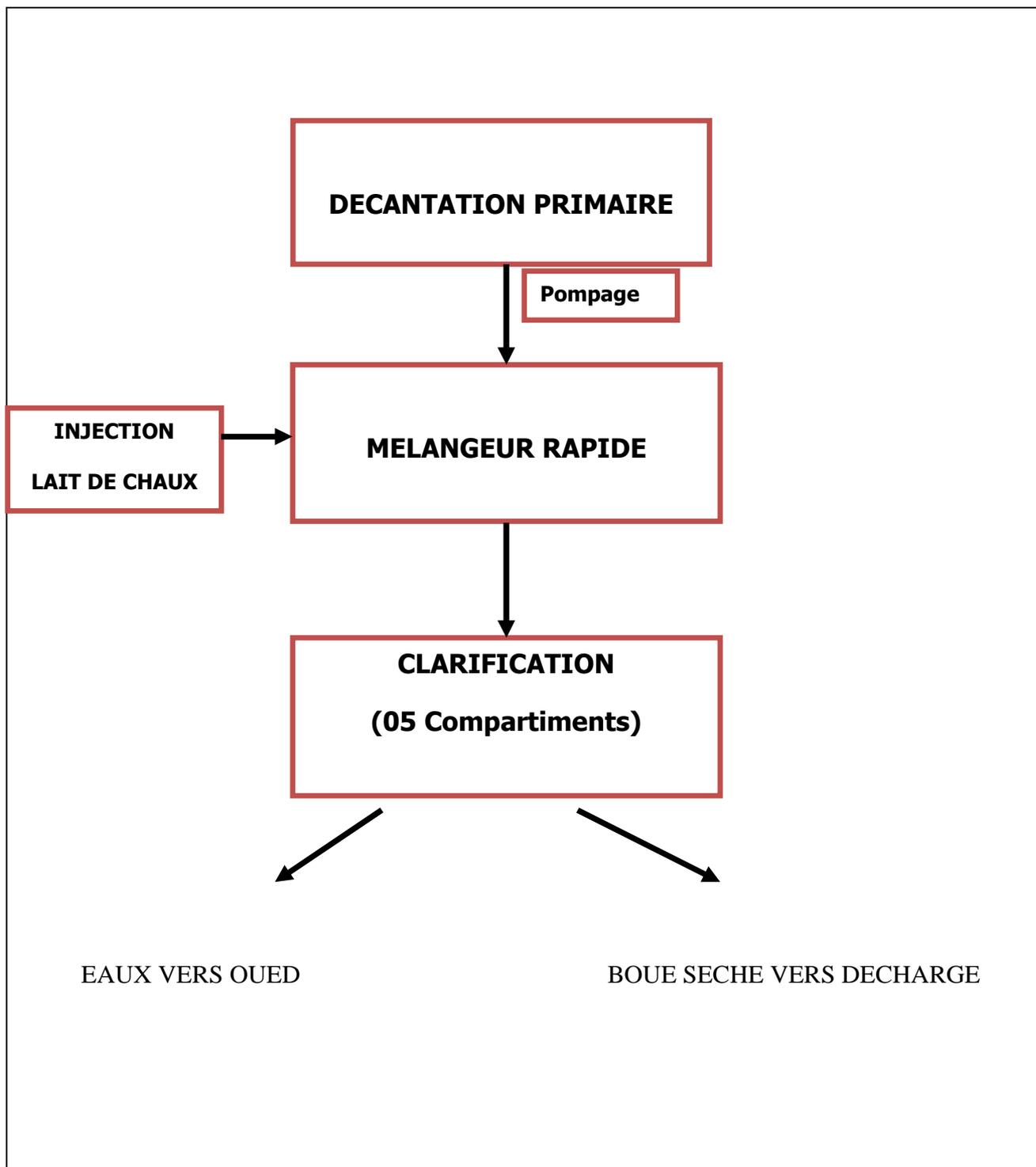


Figure VI.8: Mode de traitement de la Maïserie.

c) AUDIT à l'ENOF :

C'est l'entreprise nationale des produits miniers non ferreux et des substances utiles, le débit rejeté d'eaux usées est estimé à 600 m³/j, alors qu'il était de 2000 m³/j. Ceci est dû au recyclage pour la reproduction.

Ces eaux sont très acides et chargées en métaux lourds. Les essais de réduction de la charge polluante par l'Unité pendant la période allant du 24 au 30 octobre 1998 ont permis de donner de bons résultats.

C-1) Fiche technique de l'Unité :**Tableau VI.6 :** Fiche technique de l'Unité

Activité	Traitement des terres décolorantes
Production	<ul style="list-style-type: none"> • Terre décolorante : 4000 t/an • Carbonate de calcium : 12000t/an • Bentonite : 800 t/an
Matière première	Argile- calcaire- bentonite
Consommation en eau	400 m ³ /j
Source de pollution	Traitement de l'argile
Débit des effluents	350 m ³ /j
Épuration des effluents	<ul style="list-style-type: none"> • Procédé d'épuration : physico-chimique • Capacité : 600 m³/j
Milieu récepteur	Oued Ouerdeffou
Autocontrôle	NON

c-2) Actions d'amélioration entreprises par l'unité :

L'action entreprise par l'unité dont le but d'amélioration de la qualité de ses rejets est la réalisation d'une station de traitement physico-chimique et l'acquisition d'équipements de transports des boues.

Tableau VI.7 : Résultats des analyses du 30/10/2000

Paramètre	Date 30/10/00
PH	7.2
T°C	19.4
Oxygène dissout mg/l	0
DCO mg/l	2000
DBO5 mg/l	1041
MES 105 C°	6340
Orthophosphates mg/l	47
Phosphore total mg/l	82.50
Cu mg/l	0.054
Cr mg/l	0.126
Fe mg/l	3.470
Mn mg/l	2.40
Pb mg/l	0.41
Zn mg/l	0.36

Tableau N° VI-8 : Résultats d'analyses des lixiviations du dépôt de boues

Paramètre	Rejets finaux / Lixiviations /							
	Source LABO ALZINC					Source LABO ANRH		
	19/04/00	19/8/00	31/10/00	27/01/01	14/01/01	20/02/05	06/03/05	02/05/05
PH	7.9	7.3	7.15	7.85	7.4	7.8	8.04	7.30
Pb (mg/l)	0.20	0.22	Traces	0.08	0.01	-	-	-
Fe (mg/l)	1.71	0.035	0.25	Traces	0.01	0.402	1.203	4.372
Mn (mg/l)	0.67	0.24	0.37	0.020	0.01	0.017	0.082	0.069

Tableau VI.9 : Caractéristiques du rejet brut

Paramètre	Valeur
Température °C	50
PH	1.2
Matières en suspension g/l	6
Al (mg/l)	567
Fe (mg/l)	153
SO ₄ (mg/l)	7200

Les métaux lourds ont des concentrations acceptables. Par contre les concentrations en Aluminium, polluant prédominant dans les rejets de l'unité, n'ont pas été éliminées.

Les charges en DBO₅ et DCO sont très élevées. Ces valeurs nous semblent excessives puisque les rejets bruts avant traitement sont très acides ; leur pH est de l'ordre de 1.2 et ne permet donc aucune activité bactérienne pour une épuration biologique éventuelle.

Les recommandations que nous suggérons pour l'Unité de l'ENOF nous les résumons comme suit :

- ✓ Installation de filtre pour la réduction des émissions atmosphériques de poussière à l'atelier carbonate de calcium ;
- ✓ Améliorer la gestion de la décharge des boues issues de la station de traitement déposées actuellement en carrière d'argile ;
- ✓ Acquisition d'équipements d'auto surveillance ;
- ✓ Mise en place d'un plan 'Environnement' de l'Entreprise.

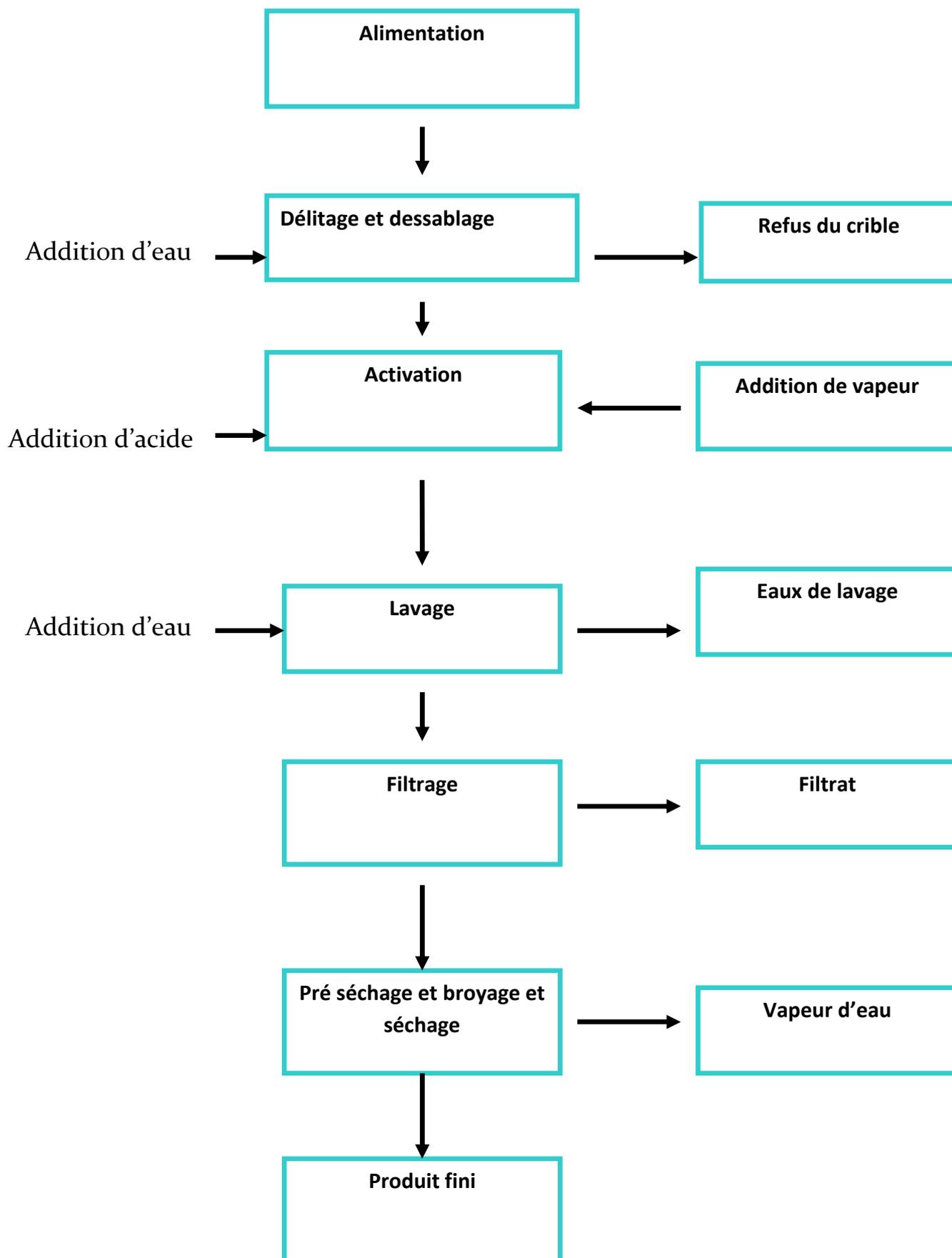


Figure VI.9 : Bilan du circuit des terres décolorantes de l'ENOF.

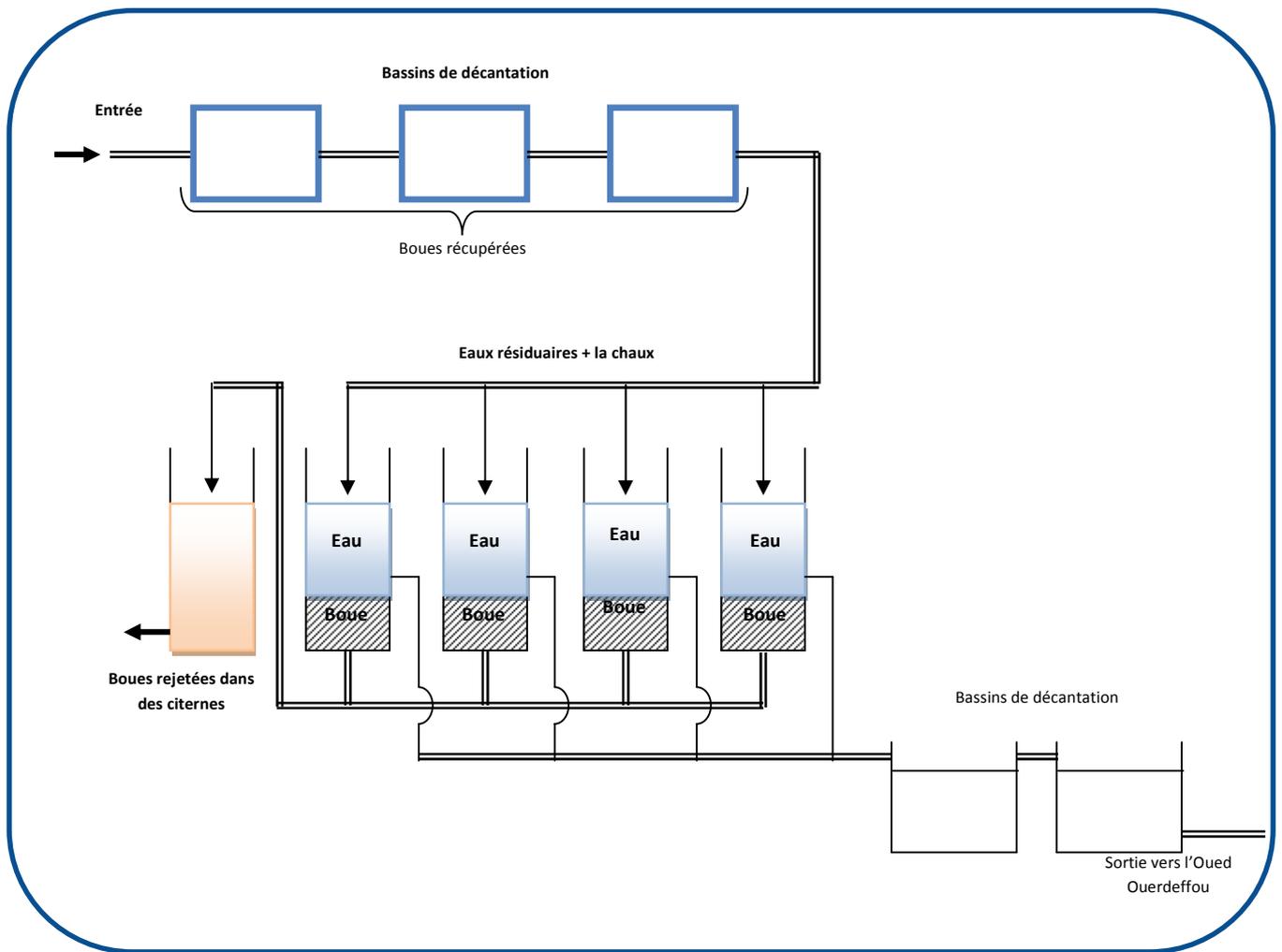


Figure VI.10 : Schéma de la station de traitement des eaux de l'ENOF

d) AUDIT AU CERTAF :

C'est l'entreprise nationale des vaisselles de table. Il occupe une superficie de 10 ha et rejette 130 m³/j d'eaux chargées fortement en minéraux avec des teneurs élevées. 60% de ces eaux sont récupérées après un traitement de floculation et les 40% sont rejetées dans l'oued Abbas.

d-1) Fiche technique de l'Unité : (voir tableau ci-dessous)**Tableau VI.10 :** Fiche technique de l'Unité.

Activité	Céramique
Production	Faïence, porcelaine
Capacité de production	✓ Faïence : 500 t/an ✓ Porcelaine : 200 t/an
Production réelle	30% de la capacité
Matière première	Kaolin, calcite, sable, zinc, feldspath.
Consommation en eau	200 m ³ /j
Source de pollution	Préparation de la pâte, émaillage, impression
Débit des effluents	120 m ³ /j
Procédé d'épuration	Coagulation – décantation – filtration
Milieu récepteur	Oued Abbès
Autocontrôle	NON

d-2) Actions d'amélioration entreprises par l'unité :

Deux actions entreprises par l'unité présentées par la réhabilitation de la station de traitement des effluents ainsi la récupération et le recyclage de 60% des volumes traités, d'une part, et la réutilisation de la pâte récupérée pour la production de produits réfractaires, d'autre part.

Tableau VI.11 : Qualité des rejets de l'unité après traitement

Paramètre	Dates de prélèvement						
	30/10/00	21/11/00	17/12/00	06/03/05	22/05/05	23/04/06	27/01/08
Ph	7	7.4	7.6	7.58	7.76	7.29	7.68
T°C	19	13	15	16	23	18	13
Oxygène dissout mg/l	6,3	7	8,9	-	-	8.6	6.5
DCO mg/l	170	90	30	80	60	60	10
DBO5 mg/l	55	22	11	16.4	12.3	11.6	3.7
MES 105 °C	-	384	1916	-	-	258	250
Cu mg/l	0.044	0.019	0.010	0.020	0	0.008	-
Phosphore total	0,45	2.23	1.59	0.28	0.90	0.57	0.38
Cr mg/l	0.897	0.047	0.0134	0	0	0	-
Fe mg/l	0.706	1.360	0.943	0.220	0.101	0.259	-
Mn mg/l	0.333	0.432	0.540	2.208	0.810	0.142	-
Pb mg/l	5.62	2.42	10.250	-	-	-	-
Zn mg/l	0.033	0.186	0.080	0.054	0.003	0.056	-

Le plomb reste le polluant majeur à surveiller. Selon les résultats ci-dessus les concentrations en plomb sont au-dessus des normes.

d-3) autres actions vont améliorées la qualité des rejets tel que :

- ✓ Un diagnostic précis des installations de traitement pour en améliorer la performance ;
- ✓ D'étudier la possibilité de récupérer l'émail à base de plomb pour éviter son rejet dans le réseau d'assainissement.

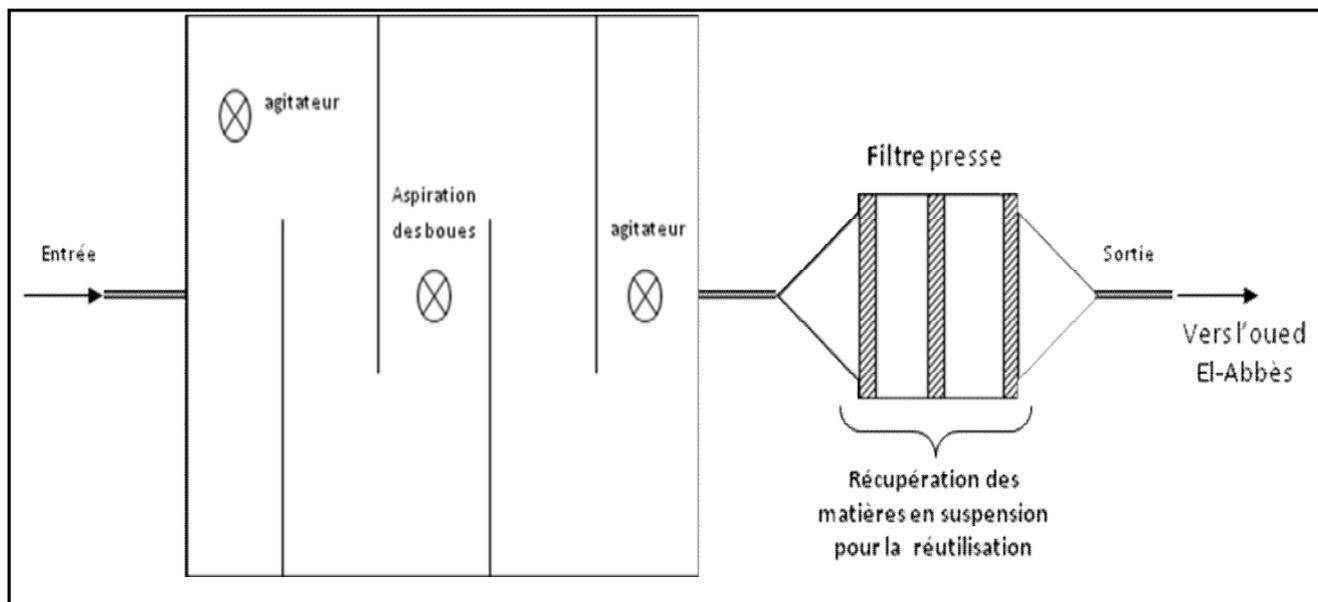


Figure VI.11 : Schéma d'épuration de l'unité

PREPARATION PATE

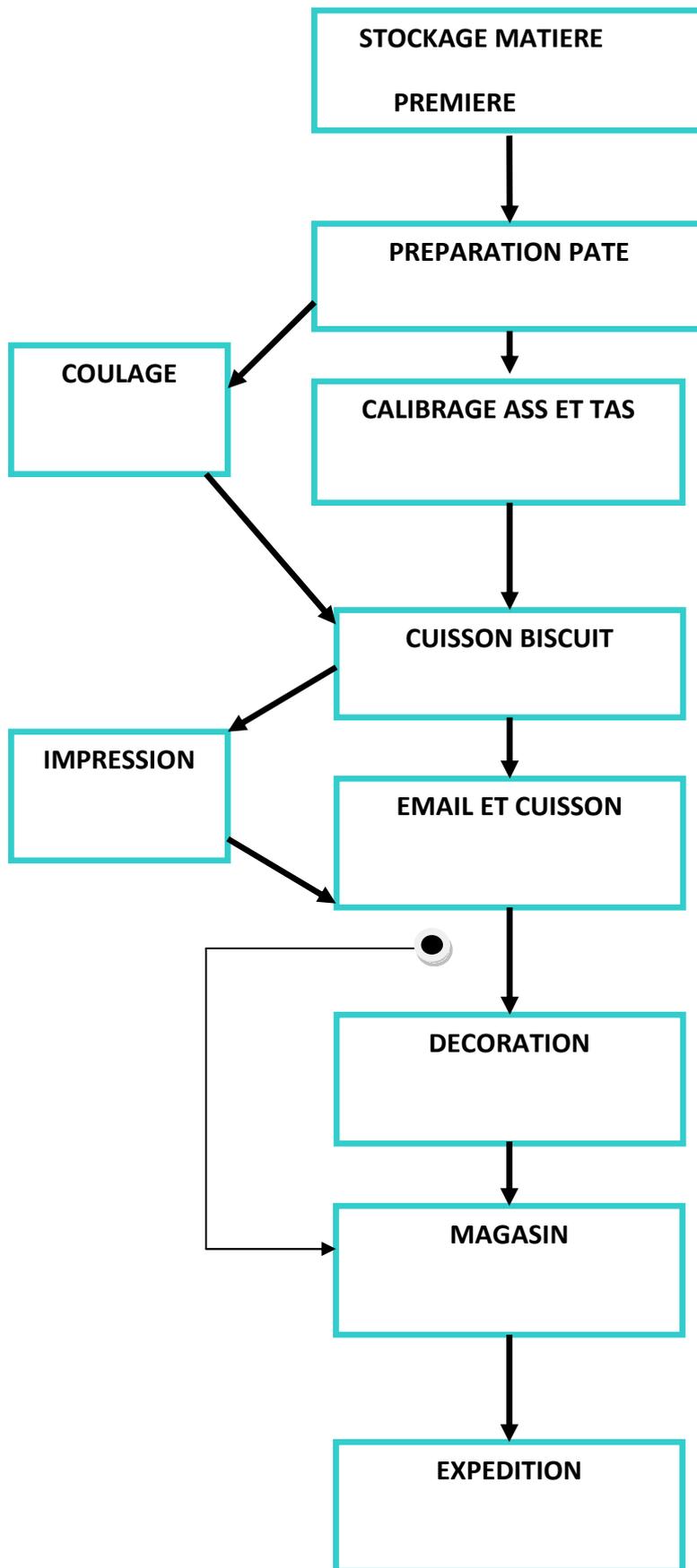
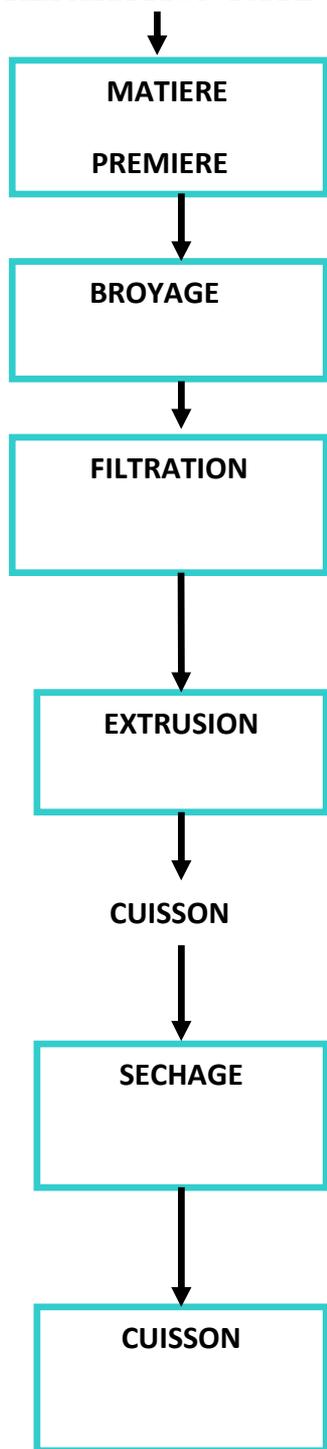


Figure VI-12 :

a)-Processus de fabrication des produits rouges

b)- Processus de fabrication vaisselle

VI.2.1.3. Sources de pollution agricole :

L'utilisation massive des engrais et des produits phytosanitaires a entraîné une pollution des eaux, des terres, des végétaux et animaux par des substances souvent toxiques. Le lessivage des engrais par les pluies ou les eaux d'irrigation et leur entraînement vers les milieux hydriques provoquent une eutrophisation de ces milieux. Les produits phytosanitaires polluent les nappes et les cours d'eau.

Les actions agricoles dans la zone d'étude présentées essentiellement par le périmètre irrigué de Maghnia et plus particulièrement, dans la plaine d'Angad au Maroc.

Pour la zone de Maghnia la surface agricole utilisable est d'environ de 26500 ha. Les quantités des engrais chimiques et pesticides utilisés pour cette surface, engendrent d'une façon ou d'une autre importantes nuisances sur la qualité des eaux d'oued Mouilah et ses affluents.

VI-2.1.4. Autres pollueurs : d'après l'enquête effectuée par l'inspection de l'environnement de la wilaya de Tlemcen (Etude de l'unification du réseau d'assainissement de la ville de Maghnia), il a été déduite une liste des artisans considérés comme pollueurs (tableau ci-dessous).

Tableau VI.12 : Autres pollueurs

N°	Propriétaire	Activité	Adresse	Mesure prise	Observation
01	Mme Bensebra, épouse Belkidari Med	Lavage et graissage	Rue de la Palestine	Fermeture de la Station	Présence d'huiles et produits chimiques
02	Mharar Med	Mécanique voitures	Bd de l'Abattoir	Fermeture du local en date du 21/05/08	- rejet d'huile dans le réseau ; -Pollution de l'environnement
03	Hamidi Lotfi	Lavage et graissage	Bd du nord N°1	Fermeture de la Station en date du 21/05/08	/
04	Hartani Sofiane Med El Amine	Lavage et graissage	28 Bd Colonel Chabou AEK	Fermeture de la Station en date du 21/05/08	/
05	Taleb Fethi	Lavage et graissage	Cité communale	Fermeture de la Station en date du 09/07/08	/
06	Chaibi Bachir	Mécanique voitures	Cité communale	Fermeture du local en date du 09/07/08	/
07	Nakkache AEK	Tournage	Cité Azzouni (prés de la mosquée El Bakir)	Fermeture du local en date du 21/05/08	/

08	Rahabe AbdelHafid	Mécanique voitures	Cité communale	Fermeture du local en date du 21/05/08	/
09	Kirwi Abd El Madjid	Mécanique voitures	Cité Matmer Djedid	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
10	Boudjenane S/Ahmed	Mécanique voitures	Cité Sakani N°04	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
11	Benahmed Omar	Lavage et graissage	Cité O/Bousalem	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
12	Lahreche Billal	Mécanique voitures	Cité O/Bensaber	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
13	Bensalah Omar	Mécanique voitures	Route Cité Omar	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
14	Mahi Rachid	Mécanique voitures	Route Cité Omar	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
15	Miloud Mustapha	Mécanique voitures	Route Cité Omar	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
16	Rahmoun Djillali	Mécanique voitures	Route Cité Omar		/
17	Kabli Med	Mécanique voitures	Cité Sakani N°60	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
18	Doukali Med	Mécanique voitures	Cité O/ Bensaber	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
19	Ouhamed Hamed	Lavage et graissage	Cité O/ Bensaber	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
20	Bensaber Benamer	Mécanique voitures	Cité O/ Bensaber	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
21	Kadri Lahcen	Mécanique voitures	Cité Chouhada	Fermeture du local en date du 20/05/08	/
22	Tammar Abd El Hadi	Mécanique voitures	Route Zouia Cité Chouhada	Fermeture du local en date du 21/05/08	/
23	Belkidari Zoubir	Mécanique voitures	Cité Palestine	Fermeture du local en date du 21/05/08	/
24	Dakhissi Ahmed	Lavage et graissage	Cité Billal	Fermeture du local en date du 21/05/08	/

IV.2.2. Coté Marocain :

Cette pollution est engendrée par les eaux usées urbaines et industrielles provenant de la ville marocaine d'Oujda, déversées, sans aucun traitement préalable, directement dans l'Oued Bounaim, principal affluent de l'Oued Mouillah.

Du coté Marocain nous avons rencontré un manque d'informations précises, sur la quantité et la qualité de la pollution domestique, industriel et agricole.

Le bassin versant de l'oued Mouillah au site de la digue (seuil), située à 328 m à l'amont du pont sur la RN 7, reçoit essentiellement les rejets provenant du coté marocain. L'ANRH contrôle périodiquement la qualité des eaux de l'oued Mouillah au niveau de trois points de prise d'échantillon d'eau de l'oued, dont deux sont situées de part et d'autre du site de la digue et le troisième au niveau du lac de la digue (seuil).

IV.2.2.1 Audit au seuil de mouillah :**a) Fiche technique de l'Unité****Tableau VI-13 : Fiche technique de l'unité**

Activité	Diguette (seuil) pour décantation
Production	Ecoulement 100l/s eaux résiduaires)/c boues
Production réelle	-
Source de pollution	urbaine, industrielle et agricole (Maroc, Oujda)
Débit des effluents	✓ Étiage : 11 000 m ³ /jour (en moyenne) ✓ Crue : 1780 m ³ /s (fréquence 1%)
Procédé d'épuration	(Etude en cours d'un système d'épuration)
Milieu récepteur	Oued Mouillah – Barrage Hammam Boughrara

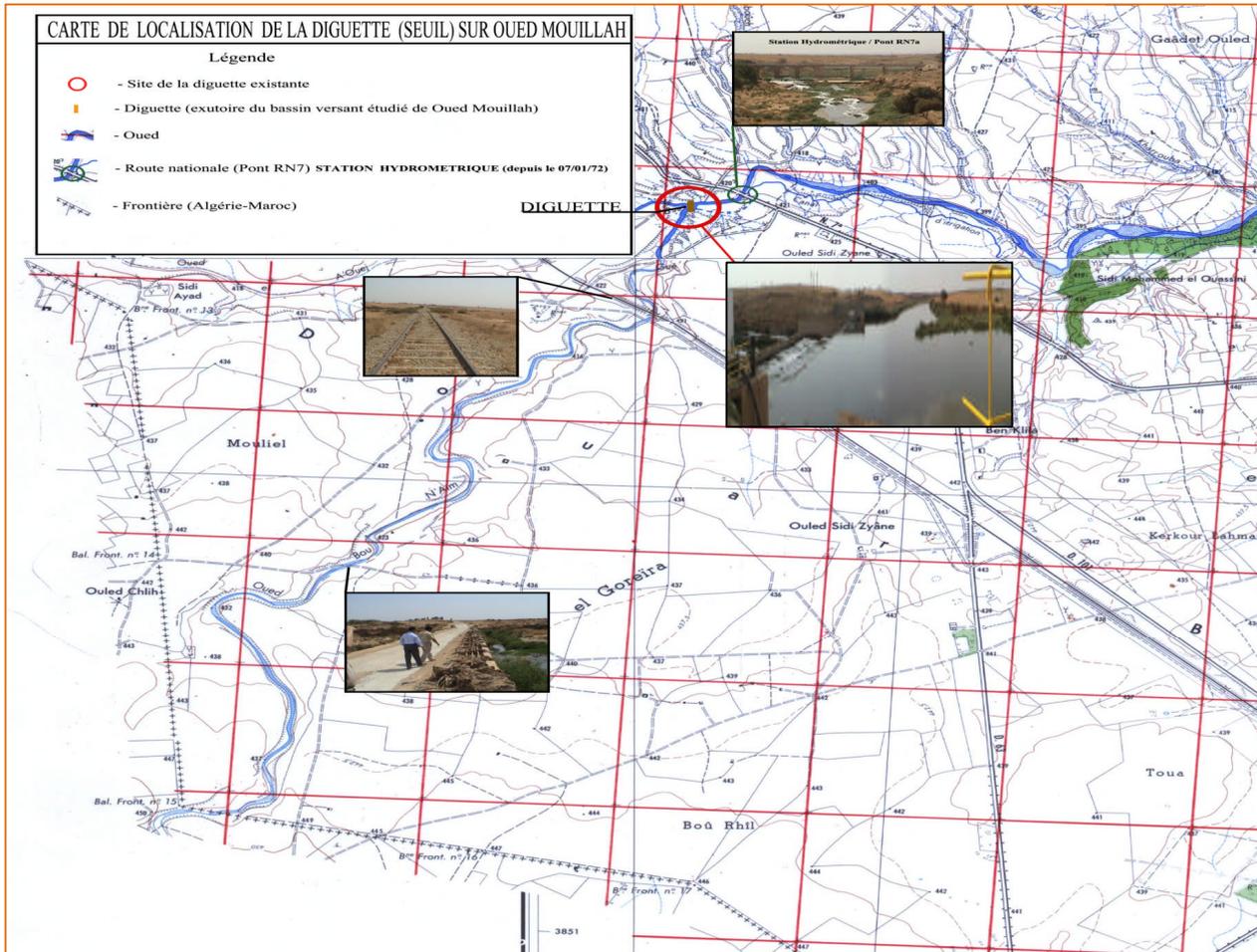


Figure VI.13 : Localisation de la diguette (seuil) sur Oued Mouillah.

VI.3 Conséquences de la pollution :

Les rejets depuis l'amont de diverses origine (domestique, industrielles, agricoles locales et transfrontalière) entraînent d'innombrable agents polluants diffusés dans le milieu récepteur du bassin versant de l'Oued Mouillah.

Ces polluants génèrent de graves conséquences sur les milieux écologiques du bassin versant et sur l'homme et sa santé.

On présent, brièvement dans ce chapitre, les conséquences de ces rejets sur le milieu du bassin versant et ces différentes composantes.

VI.3.1. Impact de la pollution sur le bassin versant de l'Oued Mouillah :

VI.3.1.1. Impact de pollution sur l'être humain :

Les nuisances les plus importantes sont engendrées par la présence des bactéries et les germes, dont certaines peuvent être pathogènes, provoquant les maladies à transmission hydrique, telles que le choléra, la fièvre typhoïde, la dysenterie bacillaire, l'hépatite virale, la méningite, la parasitologie B etc.

D'autre part, certains métaux lourds émis, tel que le plomb (Pb), s'accumulent dans les tissus et peuvent par bio-accumulation et bio-concentration causer les maladies dangereuses.

Les nitrites et nitrates peuvent, par exemple, être à l'origine de concert chez les adultes

VI.3.1.2. Impact de la pollution sur le milieu récepteur :

L'éventuelle contamination des eaux superficielles et des eaux souterraines par les divers polluants entraînés par les eaux d'infiltration jusqu'aux nappes et par les eaux de ruissellement jusqu'auoued et les dépressions inter montagneuses ou de plaine.

La pollution des cours d'eau peu avoir plusieurs origines, les principales sont les rejets en provenance de la ville de Maghnia et celle de Oujda

❖ **Le cours d'eau de l'Oued Mouillah:** celui-ci draine les pollutions urbaines et industrielles de l'importante ville d'Oujda et d'autres localités marocaines secondaires.

❖ **Le cours d'eau d'Oued Abbés:** il draine les eaux industrielles polluées de trois importantes unités de la ville de Maghnia. Se sont le complexe de corps gras (ENCG), la maïserie Tafna et le complexe de céramique-vaisselle (ECVO CERTAF). L'Oued Abbés se diverse dans l'Oued Ouerdeffou à quelques km en aval de la ville de Maghnia.

❖ **Le cours d'eau de l'Oued Ouerdeffou :** cet oued draine les eaux usées urbaines de la ville de Maghnia et les eaux de certaines activités industrielles, dont principalement, l'usine de production de bentonites et de terres décolorantes (ENOF).L'Oued Ouerdeffou est l'un des principaux affluent de l'Oued Mouillah.

En ce qui concerne les eaux souterraines, la zone d'étude comprend essentiellement la plaine de Zrigua, extension de la plaine de Maghnia, elle-même est le prolongement oriental de la plaine marocaine d'Angad.

L'intérêt de la connaissance de ces plaines, notamment les nappes de coté algérien, s'impose pour prévoir les risques de contamination des nappes par infiltration des eaux polluées :

❖ **La plaine de Maghnia:** elle se compose de cinq nappes alluviaux et plusieurs forages(9forages) dont la plupart renferment des formation alluvionnaires graviers grossiers, graviers fine, calcaires, grés...etc. ainsi, ces nappes sont sujettes au contact avec les eaux usées déversées dans le milieu.

❖ **La plaine de Zrigua:** elle fait partie du domaine Tlémcènien, et constitue un édifice régulier comportant essentiellement des terrains Mésozoïques. le remplissage alluvial de la plaine de Zrigua est constitué essentiellement par des sols rouges. Les uns dérivants vraisemblablement d'une pédogenèse du Quaternaire récent, les autres peuvent être associés à des argiles de décalcification à partir des formations calcaires des massifs bordiers. Par conséquent, certains forages existant dans cette plaine sont exposés à la contamination par les rejets environnants.

Ainsi, la sollicitation des nappes de Maghnia et de Zrigua, en général, est causée par une pollution qui se voit potentiellement aggravée par:

- ❖ La facilité d'infiltration directe des eaux usées à travers le réseau de fissures existant dans les roches largement affleurantes des principaux aquifères régionaux (calcaires et dolomites) ;
- ❖ L'interdépendance des nappes ;
- ❖ La relation hydraulique d'échanges entre les nappes et les oueds récepteurs ;
- ❖ La proximité du sol des surfaces piézométriques.

D'autre part, les décharges actuelles des déchets solides urbains, comme celle qui se situe en amont de Hammam Chigueur, ne répondent pas aux normes techniques appropriées. Et par conséquent, elles attirent les insectes, les rongeurs et d'autres animaux qui peuvent véhiculer des germes pathogènes et des parasites.

Ces déchets génèrent des nuisances comme les odeurs, la pollution du milieu et les risques de pollution des cours d'eau et nappes souterraines, par lessivage et entraînements dus aux ruissellements.

Par ailleurs, les sols et les végétations sont largement contaminés par la pollution, leur dégradation favorisés sous l'action permanente des différentes substances chimiques et biologiques polluantes.

VI.3.2. Impact de la pollution sur le barrage de Hammam Bouhrara

VI.3.2.1. Présentation du Barrage Hammam Bouhrara

Le barrage Hammam Bouhrara, le plus important de la wilaya de Tlemcen, est situé sur le point de confluence entre l'Oued Tafna et l'Oued Mouillah à environ 1 Km, en amont de la localité de Hammam Bouhrara et à 10 Km, de la daïra de Maghnia. Il est destiné à satisfaire les besoins en eau, essentiellement, des villes d'Oran (33 Hm^3) et de Maghnia (17 Hm^3) et en eau d'irrigation de la moyenne Tafna (9 Hm^3).

Tableau VI.14 : Les différentes caractéristiques de barrage Hammam Boughrara (Source : ANBT)

<p><u>Caractéristiques physiques</u> Coordonnées : X=102.92, Y=185.2, Z=251.00 Type : digue en terre hétérogène Hauteur maximale : 75m. Longueur de la crête : 1055m. Largeur de la crête : 10.00m</p> <p><u>Evacuateur de crues</u></p> <p>a) <u>Latéral</u> Débit max évacué:2900m³/s, longueur:547.70m.</p> <p>b) <u>fusible</u> débit évacué : 2220m³/s longueur : 250m, largeur : 25m, hauteur : 3.5m</p> <p><u>tour de prise</u> type : galerie avec une tour débit de la prise : 5.8m³/s débit de la vidange de fond :600m³/s. longueur de la galerie :220m. hauteur de la tour de prise : 66.7m.</p>	<p><u>Caractéristiques hydrauliques</u> Capacité totale : 177Hm³. Volume régularisé : 59Hm³ Volume mort : 23.3Hm³. Superficie de lac : 894ha. Superficie du B.V :2060 Km² Précipitation moyenne : 530mm Débit de crues : 5880m³/s. Apport solide moyen : 510.1 T/an</p> <p><u>Caractéristiques divers</u> Excavation : 2100000m³ Remblais : 4500000m³ Béton : 171000m³ Forage et injection : 258000ml</p>
---	---



Figure VI.14 : Illustration de Barrage Hammam Boughrara

IV.3.2.2. Pollution du barrage Hammam Boughrara :

Le site du barrage Hammam Boughrara se présente comme une source secondairement pollution, alimentée par les Oueds Mouillah et Tafna et leurs différents affluents.

Cette pollution composée de différents paramètres et éléments chimiques, organiques et biologiques constitue un réel danger sur la qualité et la potabilité des eaux régularisées par le barrage.

Ainsi, cet important ouvrage joue actuellement le rôle d'une grande lagune, il est utilisé pour les objectifs auxquels il a été conçu après les grandes actions d'amélioration de la qualité des rejets, mais risque reste toujours, si autres actions de lutte contre sa pollution ne sont entreprises.



Figure VI.15 : Vue de la cuvette du barrage Boughrara, Oued Tafna et Oued Mouillah (Google Map)

Chapitre VII

Analyse spatio-temporelle de la pollution

Chapitre VII : Analyse spatio-temporelle de la pollution

VII.1. Introduction :

Le transport de substances chimiques et organiques dans les cours d'eau est déterminé par l'hydraulique, la géologie et les caractéristiques chimiques et biologiques du cours d'eau [Neely et Blau, 1984, Dickson et al.1982, Thomann et Mueller 1986]. Les effets hydrodynamiques permettent le transport des matériaux par convection et diffusion dans l'eau. La réaction et le transport mécanique sont inclus avec le phénomène du transport, pour définir la distribution spatio-temporelle des éléments contenus dans le courant liquide.

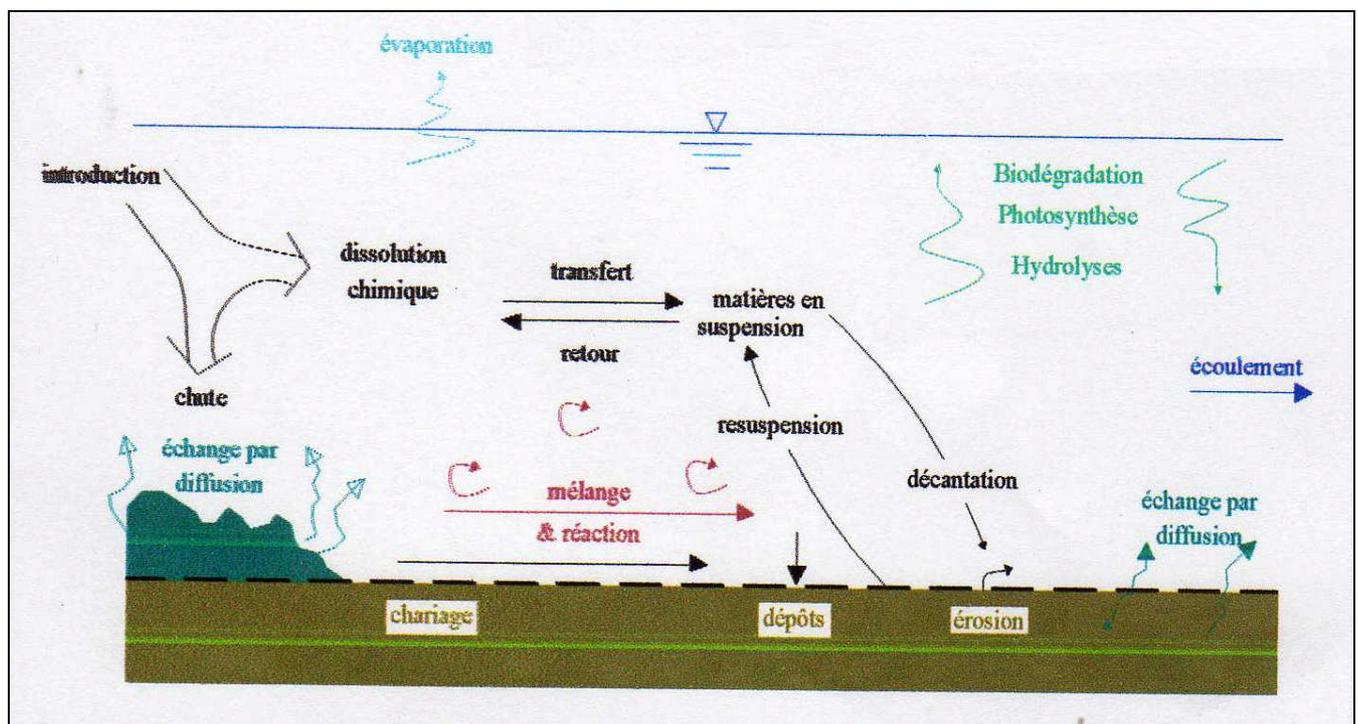


Figure VII.1 : transport des polluants dans le courant liquide. (Mrs BENADDA & all, 2005).

Toutefois, Il est important de procéder à la quantification des différents rejets d'origines diverses dans le milieu naturel et urbain, afin de connaître réellement leurs effets sur le bassin versant étudié (Oued Mouillah) et sur le barrage Hammam Boughrara, d'une part, et dont le but de maîtriser leurs impacts, d'autre part.

La quantification de la pollution s'assure par le biais de prélèvement d'échantillon d'une façon spatiale (à différents niveaux du bassin versant) et temporelle (à des différentes périodes). Ces échantillons doivent subir des analyses détaillées sur les différentes matières polluantes qu'ils peuvent contenir.

Après avoir fait l'inventaire des différents apports de charges polluantes d'eau résiduelle et connaître ces multiples origines sur Oued Mouillah, nous allons essayer de comprendre le mécanisme de cette pollution le long du cours d'eau principal.

Pour cela, nous allons apprécier les différents paramètres qui quantifient sur la qualité des eaux afin de déterminer la vulnérabilité des eaux stockées dans le barrage de Hammam Bouhrara.

Afin d'atteindre ce but, nous avons fait le suivi sur plusieurs stations.

Différentes campagnes d'analyses ont été menées à plusieurs endroits du bassin. Effectuées et suivies essentiellement par l'inspection de l'environnement et de Direction de l'hydraulique de la wilaya de Tlemcen, auprès de laboratoires : ANRH-Oran. (Analyses effectuées régulièrement pour les stations de surveillance de l'ANRH)

Les résultats d'analyses ont permis la mise en évidence des types de pollutions générées, et d'évaluer les risques inhérents des polluants situés à l'amont du barrage Hammam Bouhrara.

On présente dans ce chapitre, les différents points de prélèvement des échantillons ainsi que les résultats de leurs analyses. Les données d'analyses nous serviront par la suite dans l'étude de la propagation des matières pollutions dans le milieu liquide, de préciser réellement leur impact, et par conséquent, d'essayer de contribuer à la maîtrise de cette pollution.

VII.2 Méthode et stratégie de travail :

VII.2.1. Présentation des points de prélèvement :

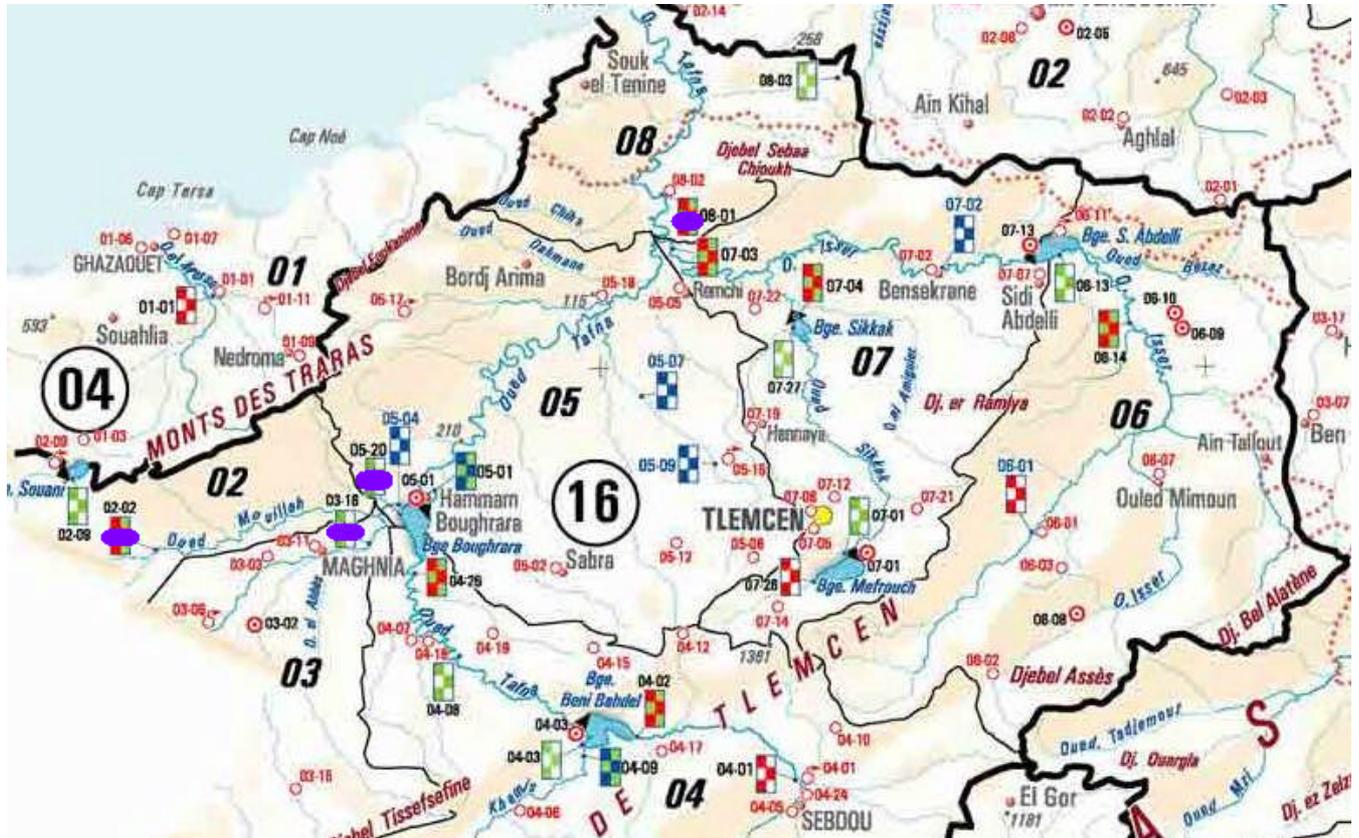
Les points de prélèvement ont été choisis selon deux principes, le premier est de prélever des échantillons au niveau de chaque source de pollution, la seconde est de les prélever au niveau des endroits dits stratégiques à l'amont du barrage Hammam Bouhrara et au niveau de l'endroit dit pierre de chat à l'aval du barrage. Les points choisis doivent se faire sur des sites offrant un bon potentiel, à savoir l'accessibilité, attrait des lieux profondeur, type de fond, ...etc. ceci selon le protocole d'environnement - plage de Ministère.

Sur cette base, Neuf (09) points de rejets ont été choisis ; ils sont répartis comme suit :

- ❖ Quatre (04) points de prélèvement au niveau de chaque unité industrielle, considérée comme source polluante principale (à la sortie de la station d'épuration de chaque unité);
- ❖ Un (01) point de prélèvement à la prise d'eau, située sur l'Oued Bounaim (au lieu dit Mouillah Amont), auprès de la frontière Algéro-Marocaine, code station 160202 dénommée Mouillah N7 amont digue;
- ❖ Un (01) point de prélèvement à la sortie de la station d'épuration de Maghnia.
- ❖ Un (01) point de prélèvement sur Oued Ouerdeffou, près de sa confluence avec l'Oued Mouillah, code station 16 03 16 dénommée Legfaf ;
- ❖ Un (01) point de prélèvement, au niveau de la cuvette du barrage Hammam Bouhrara, code station 16 05 20 dénommée Barrage Bouhrara (lac), notant ici que le bulletin que nous possédons n'indique pas à quelle profondeur sont prélevées les échantillons (fond, milieu ou surface du lac).

- ❖ Un (01) point de prélèvement, à l’aval du barrage Hammam Boughrara, au lieu-dit pierre du Chat, le code de la station est 16 08 01.

La carte suivante indique les différentes stations de surveillance, par l’agence nationale des ressources hydriques, le long de l’oued mouillah.



	Limite de bassin avec code		Station hydrométrique classique
	Limite de sous bassin avec code		Station hydrométrique automatisée
	Limite de wilaya		Station de surveillance de la qualité de l'eau
	Réseau hydrographique		Station hydrométrique classique et site de surveillance de la qualité de l'eau
	Barrage		Station hydrométrique automatisée et site de surveillance de la qualité de l'eau
	Plan d'eau (Chott, Sebkhâ)		Antenne régionale de l'ANRH
	Station pluviométrique		Secteur rattaché à l'antenne régionale
	Station pluviographique		Chef lieu de Wilaya
	Station climatologique		Localité
	station utilisée		

Figure VII.2: Localisation des stations de surveillance de l’ANRH. (Points de prélèvements)

VII.2.2. Présentation des éléments analysés et principe de prélèvement :

L'évaluation de la qualité des eaux superficielles est régie par un certain nombre de principes. Le premier principe, comme base d'évaluation, référence aux propriétés naturelles de l'eau, données par des gammes de valeurs paramétriques des stations sélectionnées. Le second principe consiste à répartir les différents paramètres physico-chimiques en plusieurs familles correspondant chacune, à un type de pollution.

Il faut signaler, toutefois, qu'il n'existe aucune règle générale dictant la période et la fréquence d'échantillonnage. Le plan d'échantillonnage doit permettre de répondre aux questions initialement soulevées et d'atteindre les objectifs visés par le suivi :

Tableau VII.1 : Type de pollution et paramètre physico-chimiques

Type de pollution	Paramètres déterminants
Altération organique	O ₂ , NH ₄ , DBO ₅ , TOC, DCO
Eutrophisation effective potentielle	Chlorophylle a, PH, O ₂ , PO ₄
Altération par les métaux	Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb, Zn
Altération par composés inorganiques	F ⁻ , CN ⁻ , NO ₃ ⁻ , NO ₂ ⁻ , NH ₃
Détergent	Détergents anioniques
Salinité	SO ₄ ²⁻ , Cl ⁻ , Conductivité

Les échantillons prélevés sont placés dans les flacons en polyéthylène et conservés à une température basse dans les glacières.

Dans la détermination des paramètres indicateurs de pollution, on utilise généralement l'acide sulfurique pour une meilleure conservation.

Le prélèvement de métaux lourds s'effectue dans des flacons en verre avec des injections d'acide pour conserver l'échantillon à un PH acide. Les paramètres organoleptiques et la température sont mesurés *in situ*.

La période d'observation s'étale sur 48 mois du Janvier 2006 jusqu'au décembre 2009, ce qui nous permet de suivre progressivement l'évolution de la qualité des eaux pendant les deux périodes (basses et hautes eaux).

Pour les unités industrielles, les analyses que nous possédons se répartissent sur une période de 09 ans, du début l'an 2000 jusqu'au fin 2008. Certainement nous n'avons pas pu avoir les séries complètes des analyses de toutes les éléments produisant de la pollution ni au moins, nous pouvons considérer que les paramètres récoltées, avec leurs répartitions temporelles, sont représentatives.

Signalant, ainsi que, la période du janvier 2007 au décembre 2008 soit 24 mois, représente la durée la plus représentative, où nous avons une série d'analyse régulière de 27 éléments polluants.

Les prélèvements ont été effectués Mensuellement.

VII.2.3. Critique et représentation des données :

En chaque point de prélèvement à travers le bassin versant de l'Oued Mouillah, nous avons totalisé près de vingt sept (27) éléments analysés appartenant aux différents types de pollution.

La fréquence de prise d'échantillons correspond à des dates et des heures irrégulières.

Aucune méthode n'est indiquée sur la façon de la prise d'échantillonnage ni sur sa fréquence en période de crues ou d'étiage. En fait, rien n'est précisé si la prise s'effectuée auprès des berges ou de milieu de l'Oued, ni à quelle profondeur.

En effet, vu l'inexistence d'aucun aménagement particulier au niveau des stations d'échantillonnage, il est impératif que la prise se fasse aléatoirement sans le suivi d'un mode précis, indiquant l'endroit et la hauteur de prélèvement.

Il faut noter le manque de certains éléments dans les séries, sont mentionner la cause. Ainsi, nous supposons l'inexistence de ces éléments durant les dates de prélèvement ou bien qu'ils n'étaient pas analysés pour des raisons inconnues.

Néanmoins, les paramètres analysés peuvent être considérés comme représentatives sur la base de l'ampleur et de la fréquence des prélèvements et des valeurs des analyses elles-mêmes.

VII.3.2. Analyse structurale des éléments :

Le problème de pollution du bassin versant de l'oued Mouillah est un problème essentiellement du aux rejets organiques et minéraux domestiques, industriels et agricoles. Les analyse des prélèvements dont nous disposons montrent totalisent près de vingt sept (27) éléments responsables plus ou moins de la pollution. L'étude de l'association de tous ces éléments entre eux est impossible de point de vue mathématique, vu le grand nombre d'arrangements possibles.

L'interprétation des mesures à une seule ou à quelques longueurs d'onde correspondant à des bandes d'absorption caractéristique. L'hypothèse de l'existence unique d'une seule espèce dans un domaine réduit de concentrations sont des méthodes approchées de détermination des constantes, car elles supposent que l'espèce soit formée à 100% ou l'équilibre étudié soit unique, ce qui n'est jamais le cas.

VII.3.3. Justification du choix des éléments :

Pour l'étude de la simulation spatio-temporelle, sur près de vingt sept (27) paramètres mesurés nous avons opté pour douze (12) éléments.

Notre choix c'est basé sur quatre points de prélèvement, dont ceux :

- ❖ Des oueds Mouillah amont et Ouerdeffou;
- ❖ Au niveau de la cuvette du barrage Hammam Boughrara ;

❖ En aval du barrage Hammam Boughrara au lieu dit pierre de chat.

Le débit du cours d'eau a été pris en considération puisque permettant l'estimation de la masse de chaque polluant analysé. La température d'eau, quant-à elle, été choisi puisque régissant les différentes réactions chimiques et biologiques. En plus, le pH pour l'acidité ou l'alcalinité de l'effluent, représentant un indice fort du type et de la qualité de celui-ci. Il représente un paramètre essentiel d'eutrophisation. Ces trios paramètre sont importants dans l'analyse de la pollution.

La Demande Biochimique en Oxygène (DBO_5), correspond à la quantité d'oxygène nécessaire à la dégradation par les micro-organismes, des matières organiques contenues dans l'eau (à 05 jours). La DBO_5 donne une idée sur l'importance de la quantité de micro-organismes existants (souvent pathogènes) dans l'effluent. Dans notre cas les valeurs de la DBO_5 sont extrêmement élevées et peuvent dépasser jusqu'à 550% la norme autorisée (<30 mg/l).

La demande Chimique en Oxygène (DCO) correspond à la quantité d'oxygène nécessaire à l'oxydation de toutes les substances oxydables (organiques et minérales) contenues dans l'eau. Ainsi, elle est directement liée à la quantité de l'oxygène dissous (O_2), toujours présent dans l'eau, sa solubilité de celui-ci est fonction de la température s'élève, la teneur en oxygène diminue en raison de sa faible solubilité mais en raison aussi de la consommation accrue par les organismes vivants ; ainsi la DCO est paramètre important. La variation de la concentration de se paramètre dans l'eau set très grande, elle peut être fonction de la présence des végétaux, des matières organiques et minérales, des organismes et des germe aérobies. Elle est donc un indicateur de pollution très important pour les eaux de surfaces.

Dans notre cas, les valeurs de la DCO peuvent aller jusqu'au 1300% au-delà de la norme autorisée (<40 mg/l), raison pour laquelle nous l'avons choisi.

Les Matières En Suspension (MES), sont la cause directe d'une érosion fluide ou de rejets industriels. Ils sont dus au transport de matériaux solides par le courant liquide. Lors d'un écoulement ils peuvent s'associer à d'autres éléments tels que les matières organiques, minérales ou même des métaux et substances chimiques. L'importance des MES transportées est donc un indicateur de l'existence et de l'importance d'autres paramètres. Dans notre cas les teneurs en MES sont parfois d'environ 16400% plus grandes à la valeur normalisée (<30 mg/l).

Enfin pour se qui concerne les éléments chimiques, nous avons divisé les paramètres analyses en familles, afin de choisir l'élément le plus représentatif de chaque famille.

VII.3.3.1. Familles des métaux de transition :

Ce sont le chrome (Cr), le manganèse (Mn), le fer (Fe), le nickel (Ni), le cuivre (Cu), le zinc (Zn) qui se trouvent dans la première période de la table périodique de Mendéliev et le cadmium (Ca), dans la deuxième période.

Les valeurs de ces métaux de transition ne sont pas significatives du point de vue pollution, car elles sont nettement plus faibles que les valeurs maximales permises, donc nous les avons pas pris en considération dans notre analyse.

VII.3.3.2. Famille du Sodium (Na^+), du Potassium (K^+), et du Chlore (Cl^-) :

Dans cette deuxième famille, le sodium (Na^+) et le potassium (K^+) qui se trouve dans la première colonne du tableau de Mendéliev, ainsi que les chlorures (Cl^-) qui réagissent avec ces deux cations.

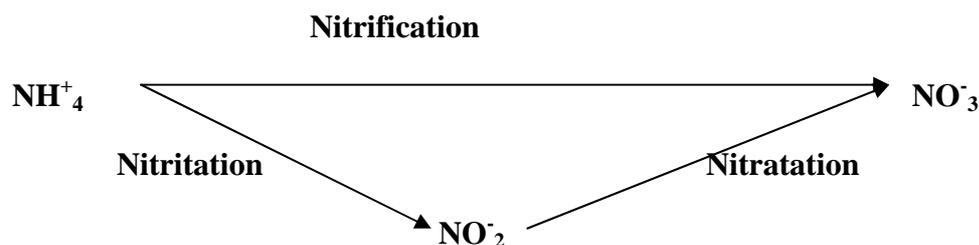
Nous avons opté pour le Na^+ qui, non seulement, a les mêmes caractéristiques que le K^+ , de même que ses valeurs sont plus grandes que celles du K^+ , d'une part, d'autre part, il réagit avec les chlorures.

VII.3.3.3. Famille du Manganèse (Mg^{+2}) et du Calcium (Ca^{+2}) :

Leurs valeurs ne sont pas assez grandes, en plus ces composés ne présentent pas une pollution nuisible. Pour cela avons éliminé de notre choix.

VII.3.3.4. Famille des éléments Azotés :

Elle est composée de nitrites (NO_2^-), de nitrates (NO_3^-), d'ammonium (NH_4^+) et de l'azote (N). Cette famille est très importante dans l'étude d'une pollution des composés inorganiques (nitrates). Les composés azotés se transforment de la manière suivant :



L'ion NH_4^+ provient essentiellement des déjections animales et humaines, par dissolution de l'azote atmosphérique dans nuages ainsi que suite à la décomposition de la matière organique par les bactéries et les champignons. Il peut être transformé en nitrites puis en nitrates.

Le NH_4^+ est relativement peu toxique, il peut provoquer la corrosion des conduites et limiter l'effet désinfectant du chlore.

Le NO_2^- provient soit d'une oxydation incomplète des ions ammoniums, soit d'une réduction des nitrates sous l'influence d'une action dénitrifiant. Les nitrites sont très solubles mais peu résistants, la nitratation étant beaucoup plus rapide que la Nitritation.

Le NO_3^- est essentiellement soluble, et très mobile ; le seul frein à sa migration est son assimilation par les micro-organismes ou sa transformation par dénitrification.

Pour l'homme, les nitrates ne sont pas en soi dangereux pour la santé, mais c'est leur transformation en nitrates dans l'estomac qui représente un risque potentiel. La transformation des nitrates en nitrites provoque une diminution du pH dans l'estomac ce qui favorise une prolifération de bactéries.

Nous avons choisi les deux composées azotés, le NH_4^+ et le NO_3^- , au vu de leur importance par rapport aux autres éléments, d'une part, et d'autre part ils jouent un rôle important dans la pollution et interaction chimiques.

VII.3.3.5. Famille des éléments Phosphatés :

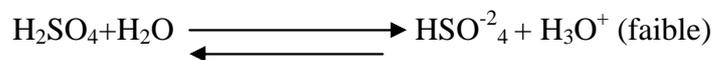
Le phosphore (p) est un élément essentiel à la croissance des êtres vivants (végétaux et animaux), nous l'avons choisi car ses valeurs sont les plus importantes par rapport aux phosphates (PO_3).

VII.3.3.6. famille des composés en aluminium (Al) et en plomb (Pb) :

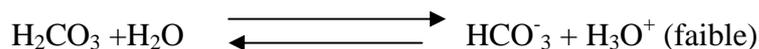
Leurs valeurs sont très faibles (largement inférieures aux valeurs de rejets permises), ainsi, nous les avons éliminés.

VII.3.3.7. famille des bicarbonates (HCO_3^-) et oxyde de soufre (SO_4^{2-}) :

Cette famille est considérée et choisie, H_2SO_4 étant un acide fort :



Tandis que le H_2CO_3 est un acide faible :



En conclusion, les douze (12) éléments choisis sont: le débit, la température de l'eau, la DBO_5 , la DCO , les MES, le PH, le P_{Total} , le Na, les SO_4^{2-} , le NO_3^- , le NH_4^+ et le HCO_3^- .

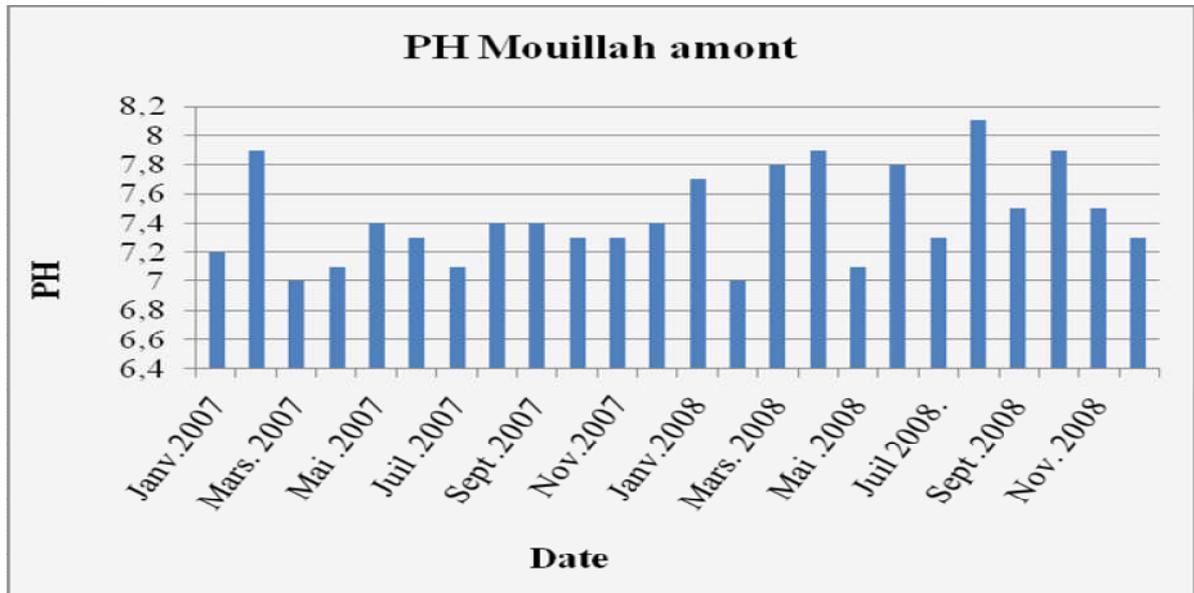
VII.3.4. Interprétation des résultats :

Nous allons dans ce qui suit, procéder à l'interprétation des résultats des analyses traitées en deux étapes. La première étape consiste à mener une analyse ponctuelle et temporelle de la pollution, la seconde consiste à donner une analyse spatiale de la pollution, de l'amont et l'aval du bassin versant de l'Oued Mouillah.

VII.3.4.1. analyses ponctuelles et temporelles de la pollution :

a) Point Oued Mouillah Amont (St N7A 160202):

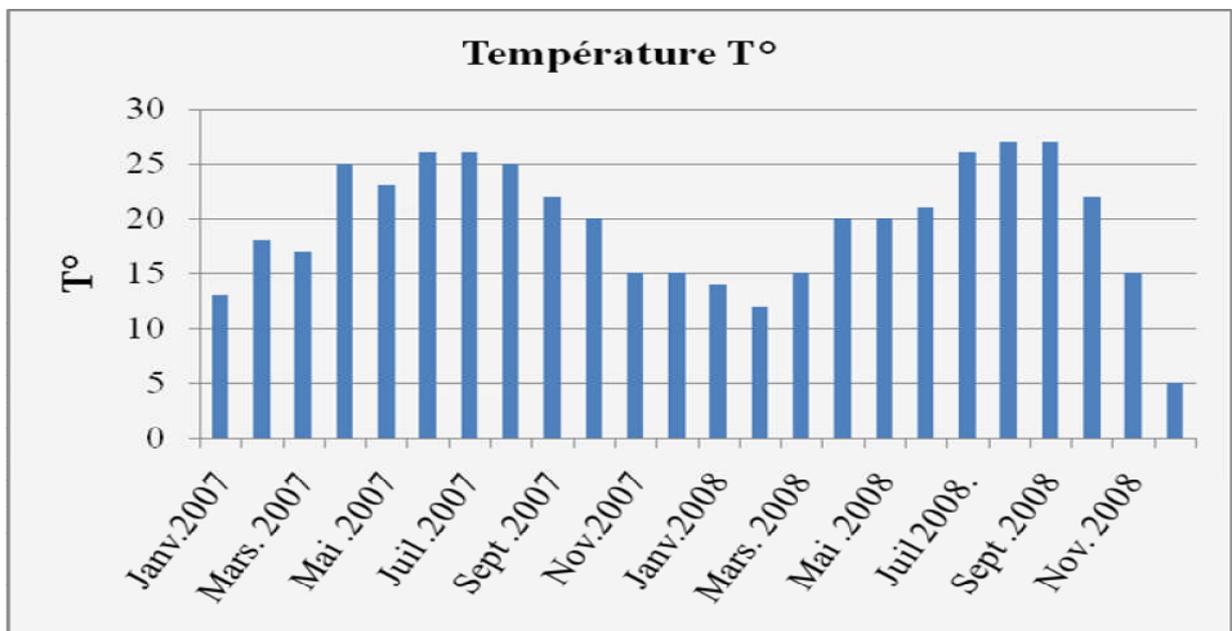
❖ PH



Graph VII.1 : l'évolution de la concentration du PH de la station de Mouillah amont digue

Le PH dépasse lui aussi est souvent compris entre la fourchette de norme (entre 6et8), mis à part la date (de Aout2008),

❖ Température



Graph VII.2 : l'évolution de la température T° de la station de Mouillah amont digue

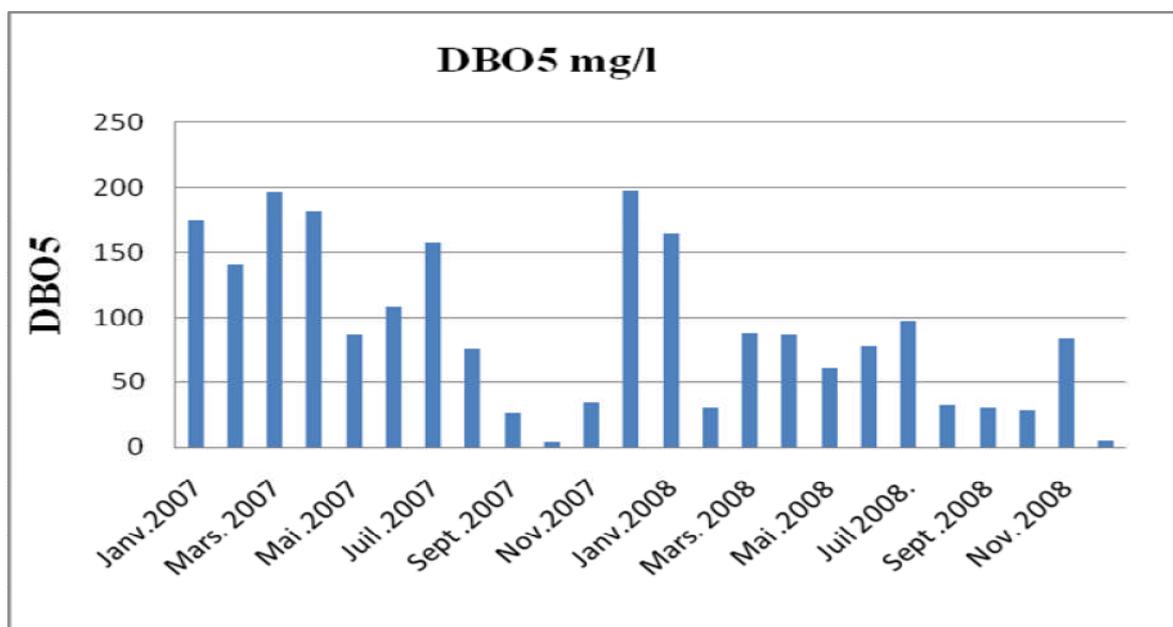
Généralement les valeurs de la température ne sont pas assez élevées.

❖ **DBO₅** :

Les résultats d'analyse de 24 échantillons, du janvier 2007 au décembre 2008, montrent que la DBO₅ est pratiquement souvent supérieure à la norme des rejets dans le milieu naturel (30mg/l), sauf pour les mois d'octobre 2007 et décembre 2008.

Les valeurs de la demande biologique en oxygène varient entre 4,4mg/l et 198,2 mg/l et elle atteint 560% supérieur à la norme.

Les valeurs qui sont inférieure à 30 mg/l peuvent être justifié par le faite que la quantité d'eau écoulee dans l'Oued lors des mois d'octobre et décembre, favorisant une dilution dans les eaux de l'oued, et La réduction des rejets organiques dans le milieu naturel du coté marocain.



Graph VII.3 : l'évolution de la concentration du DBO₅ de la station de Mouillah amont digue

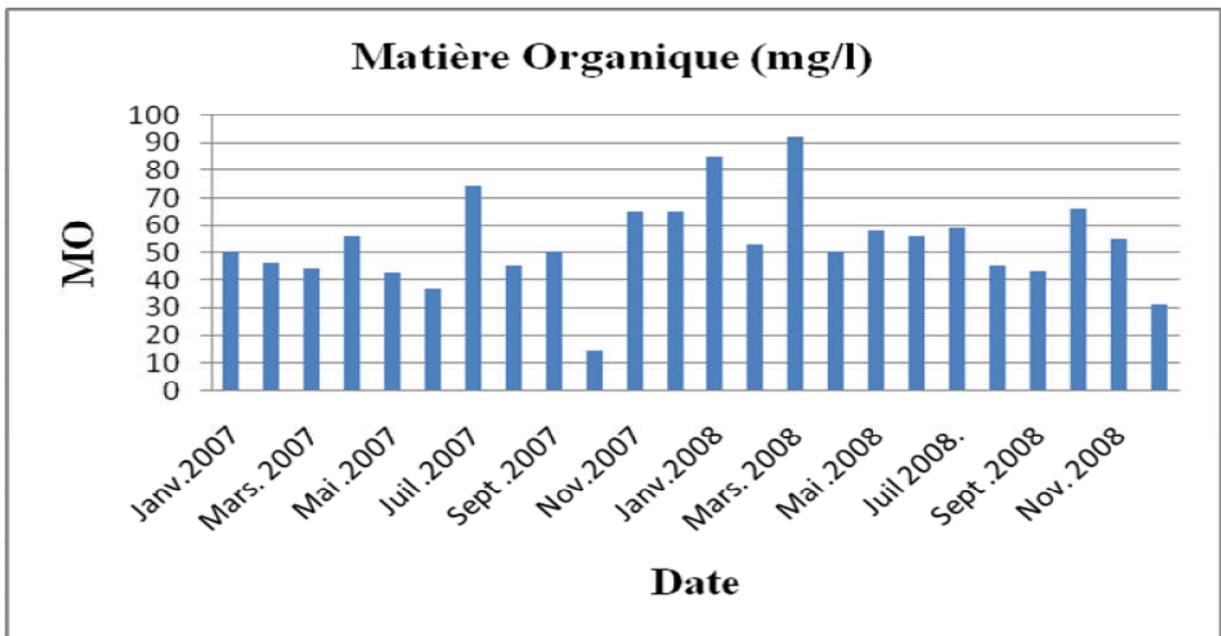
❖ **DCO** :

Pour la DCO, nous avons une série d'analyse de 48 mois, de janvier 2006 au décembre 2009.

La variation de la DCO, est pratiquement semblable à celui de la DBO₅, toutefois, comme ses valeurs sont toujours supérieures aux ceux de la DBO₅, la DCO est aussi, souvent toujours supérieure à la norme (40mg/l).

Sauf pour les dates d'octobre 2007, décembre 2008 et février 2009 ou la DCO est faible, raison similaires à celles de la DBO₅.

Allant de 20 mg/l à 520 mg/l, les valeurs de la DCO arrivent jusqu'au 766,66% supérieur à la norme en vigueur.

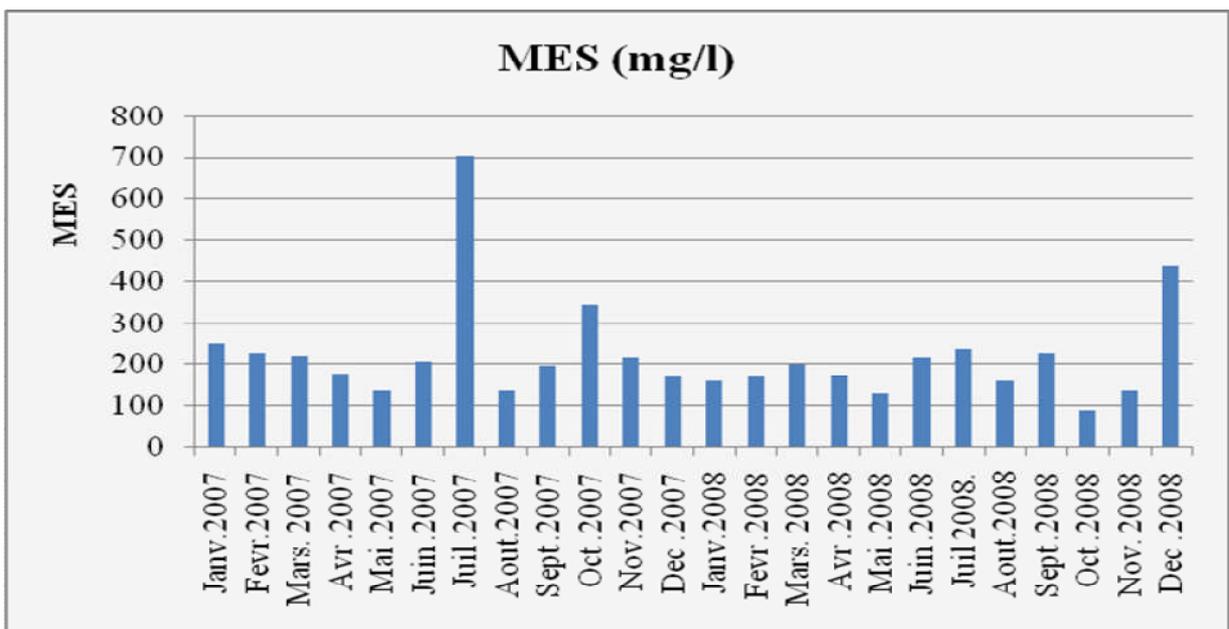


Graphes VII.5 : l'évolution de la concentration des M O de la station de Mouillah amont digue

❖ MES

Les teneurs en MES rejetées ne doivent pas dépasser une limite de 30 mg/l. D'après les résultats d'analyse des échantillons au niveau de point frontalier de Mouillah Amont, il est clair que les matières en suspension sont largement supérieures à la norme.

Signalant ainsi, la valeur de juillet 2007 qui est de l'ordre de 702 mg/l, soit 2240% supérieur à la norme en vigueur, ceci étant dû peut être au grand débit d'écoulement, dans l'oued, au moment de prélèvement (période de crue).



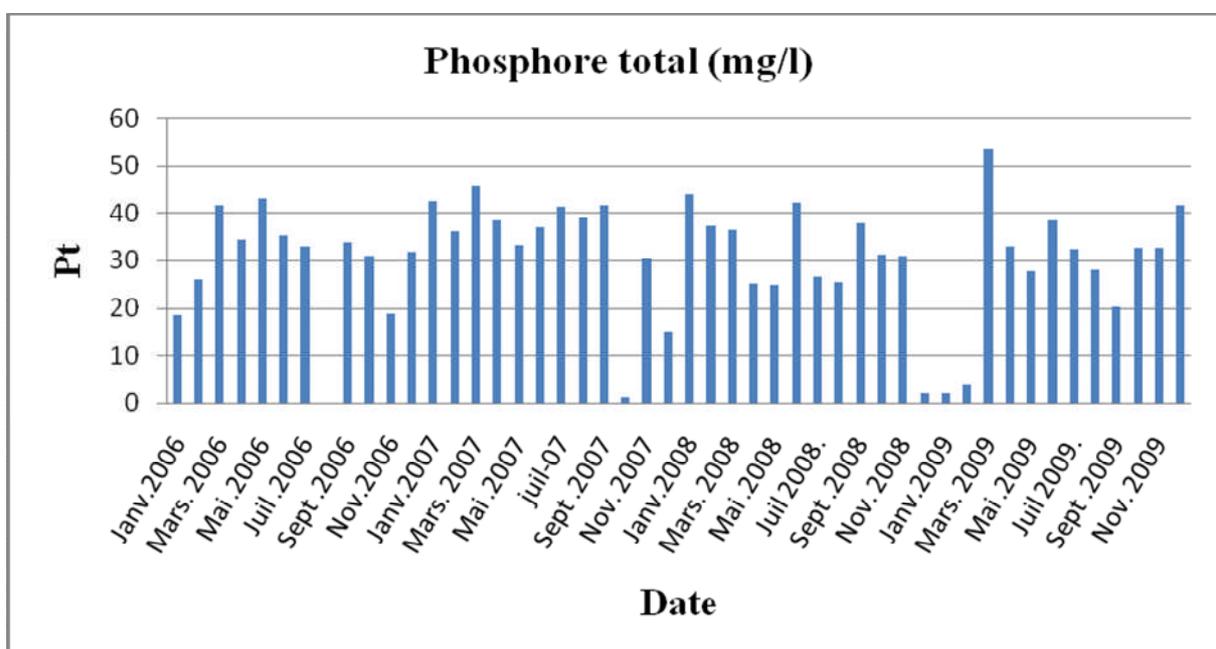
Graphes VII.6 : l'évolution de la concentration des MES de la station de Mouillah amont digue

❖ **P total** :

La présence des produits phosphatés dans les eaux est due aux rejets des détergents dans le milieu, d'une part, et des engrais phosphatés véhiculés par lessivage des terres agricoles dans les eaux des Oueds, d'autre part.

Les teneurs en phosphore total dans le point de prélèvement de Mouillah Amont montrent l'existence d'une pollution excessive. En fait, ces teneurs dépassent considérablement la norme fixée à 5mg/l pour les rejets. Mis à part le cas d'octobre 2007, décembre 2008, janvier et février 2009, soit 03 cas sur 48 ou les faibles quantités de P_{Total} rejetées sont insignifiantes.

Les valeurs du P_{total} dépassent, parfois, les 960% la norme du rejet comme étant le cas du mars 2009.



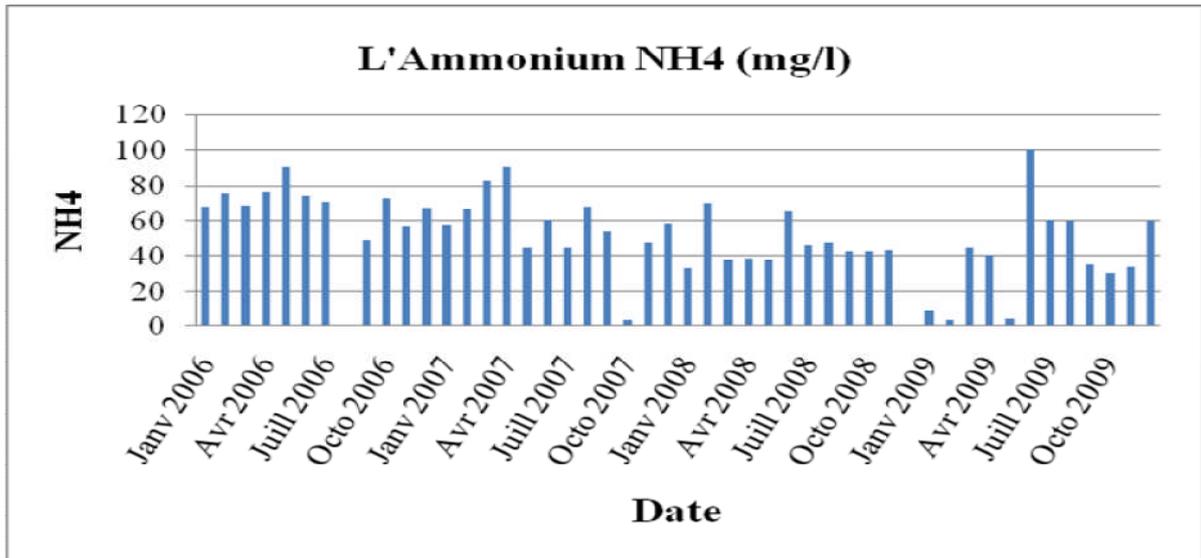
Graphes VII.7 : l'évolution de la concentration du P_{TOT} la station de Mouillah amont digue

❖ **NH4+**

L'Ammonium (NH_4^+) : radical monovalent agissant comme un métal calcin ammoniacaux; C'est la forme d'azote la plus toxique.

Sa présence dans l'eau est liée au rejet urbain et industriel qui est à l'origine des concentrations élevées au niveau de la station Mouillah amont qui atteignent (09) neuf fois la norme admissible (10mg/l), soit par des réductions des formes azotées (nitrates et nitrites).

L'importance de l'ammonium dans le milieu naturel en ce point de prélèvement, peut être justifié par la transformation de l'azote organique en azote ammoniacal par les bactéries. En plus, l'Oued Mouillah véhicule les eaux usées, de la ville marocaine d'Oujda composées principalement d'urée, source d'azote, facilement ammonifiant.



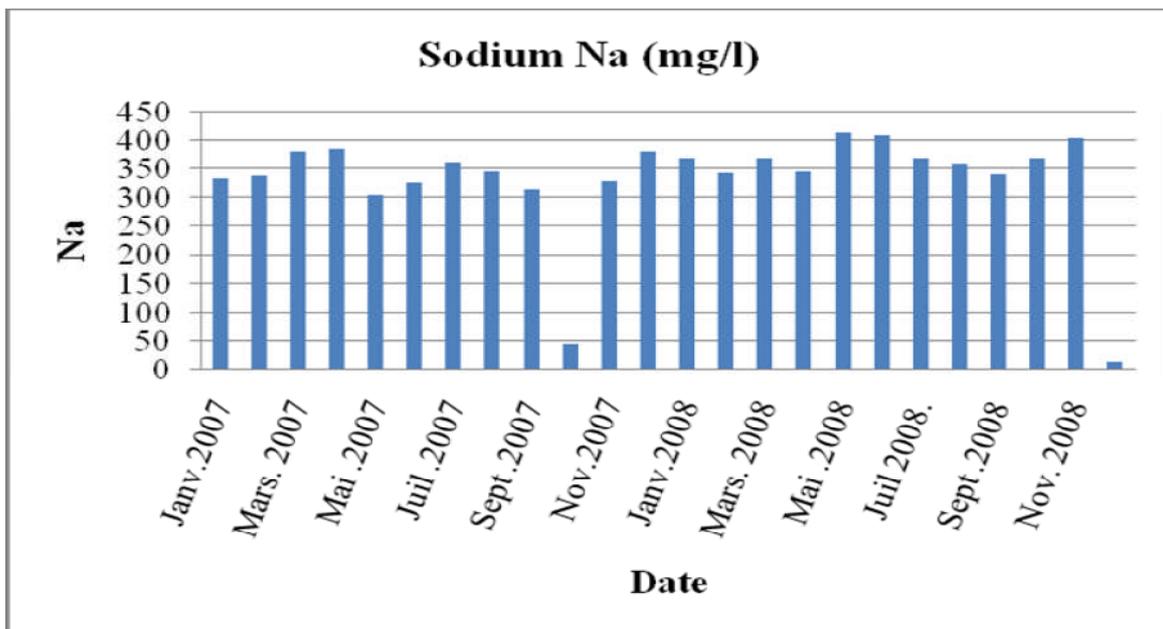
Graph VII.8 : l'évolution de la concentration du NH₄ de la station de Mouillah amont digue

❖ NA⁺

Le composé du sodium le plus important est le chlorure de sodium communément appelé sel.

Parmi les autres composés, on trouve les carbonates de sodium, bicarbonate de sodium, l'hydroxyde de sodium.

La présence du sodium (Na⁺⁺) dans les eaux est due aux rejets industriels (produits chimique, détergents), agricoles (lessivage des sels minéraux sous forme de particules), domestique (détergent sels de cuisines). Le Na⁺⁺ est essentiel à la croissance des êtres vivants, il est aussi utilisé comme détergent. Sa valeur limite, de rejet dans les Oued, est fixée à 200mg/l.



Graph VII.9 : l'évolution de la concentration du Na la station de Mouillah amont digue.

On s'aperçoit que les résultats d'analyse donnent des fortes teneurs en Na qui dépassent la norme sauf pour les deux prélèvements d'octobre 2007 et Décembre 2008, cela justifié que les prélèvements ont été faits simultanément à la période de hautes eaux

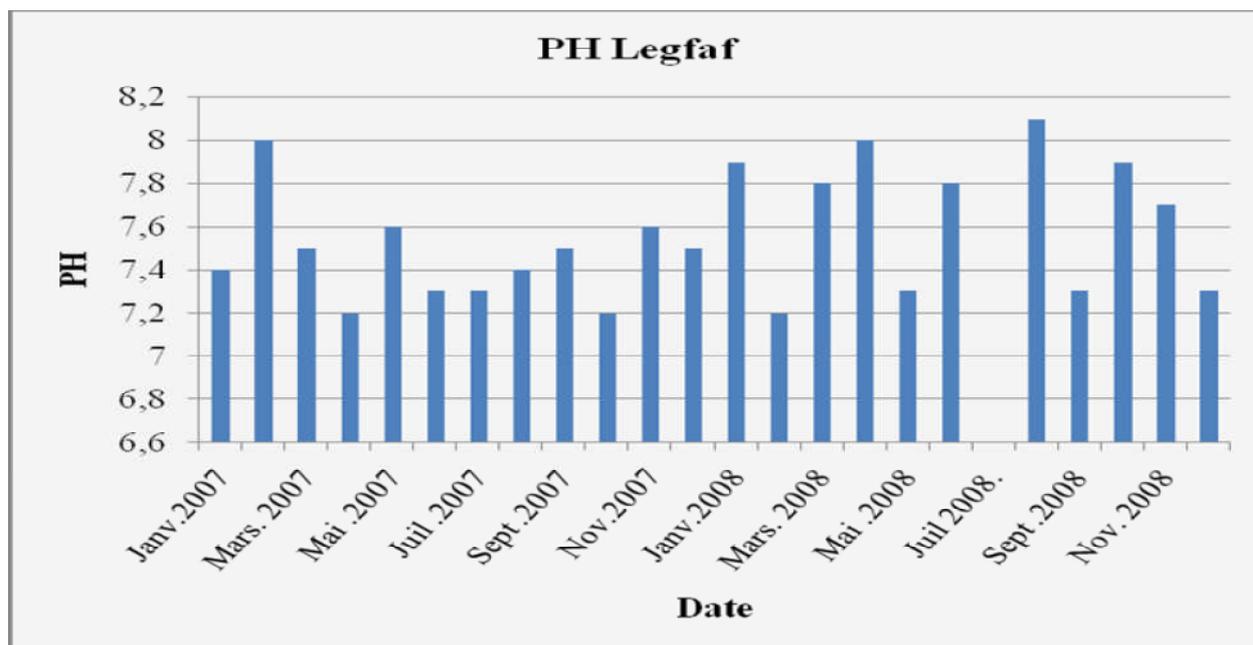
❖ Etat général de la pollution

Pour les autres paramètres, le NO_3 et le SO_4 sont souvent inférieures aux normes (respectivement, 20mg/l et 250mg/l). Le PH dépasse lui aussi est souvent compris entre la fourchette de norme (entre 6et8), mis à part la date (de Aout2008), en été, ou l'écoulement est très faible et les eaux sont basiques. Quant aux bicarbonates ils affichent des valeurs extrêmes justifiées par des rejets domestiques industriels riches en matières organiques, favorisant une décomposition bactériologique aboutissant à cet et élément (en H_2CO_3).

Les paramètres analyse montrent l'existence d'une forte pollution en provenance des réseaux urbains de la ville limitrophe d'Oujda et de sa zone industrielle, en plus de lessivage des sols agricoles (plaines de Zirga et d'Angad) par les eaux de pluies et d'irrigation.

b) Oued Ouardeffou (station Legfaf 16031)

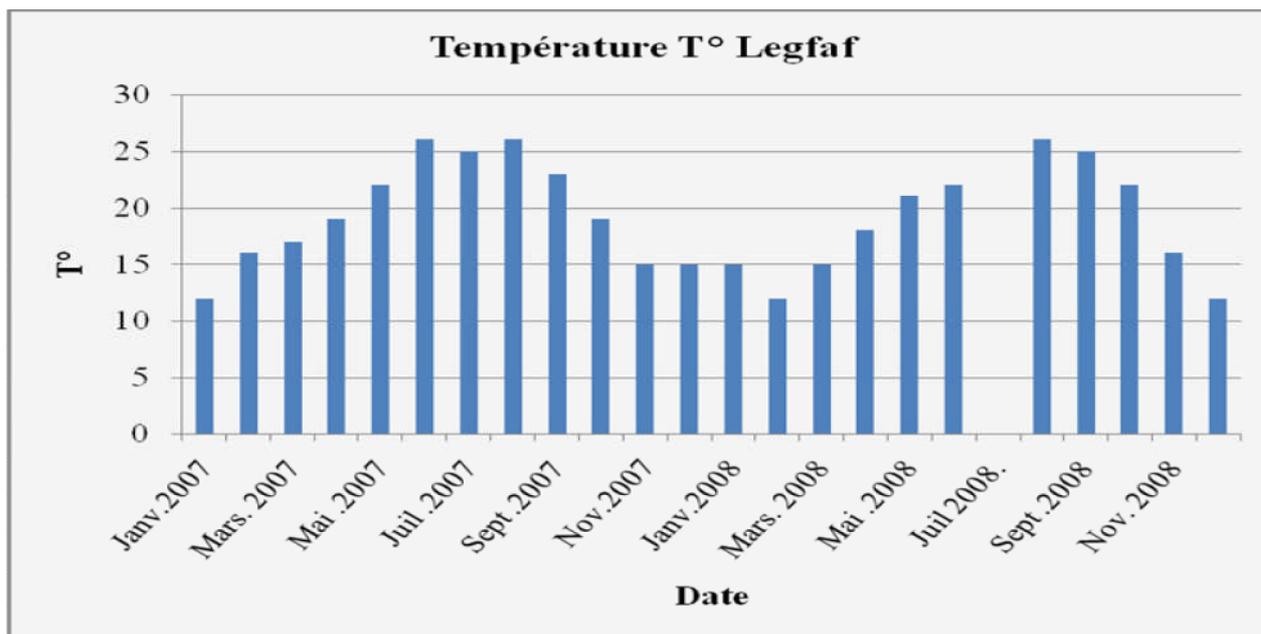
❖ Le PH



Graphe VII.10 : L'évolution du PH en fonction du temps (station Legfaf).

Souvent les valeurs du PH dans les normes.

❖ Température

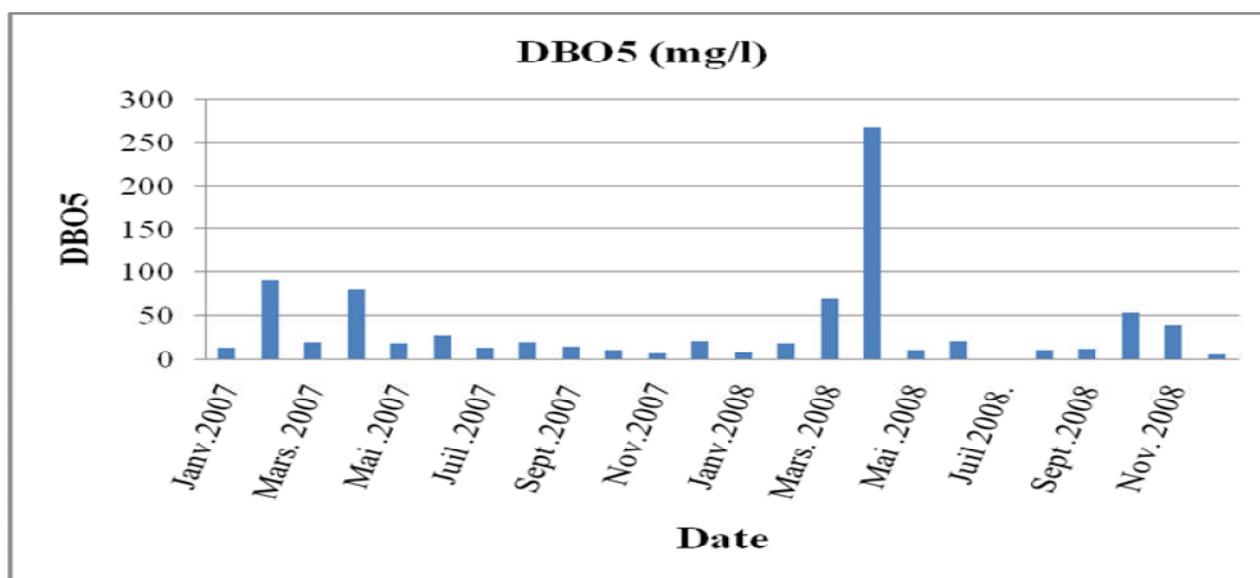


Graphes VII.11: L'évolution de la température en fonction du temps (station Legfaf).

❖ DBO₅

A cet endroit la DBO₅ affiche six (06) valeurs sur vingt quatre (24) qui sont supérieures à la norme (février, mars 2007 et mars, avril, octobre et novembre 2008) avec un maxima de 268,1 mg/l soit 793% plus supérieur. Cette énorme pollution organique est due aux rejets des industries du Maghnia, essentiellement la Maïserie et les coopératives d'olives.

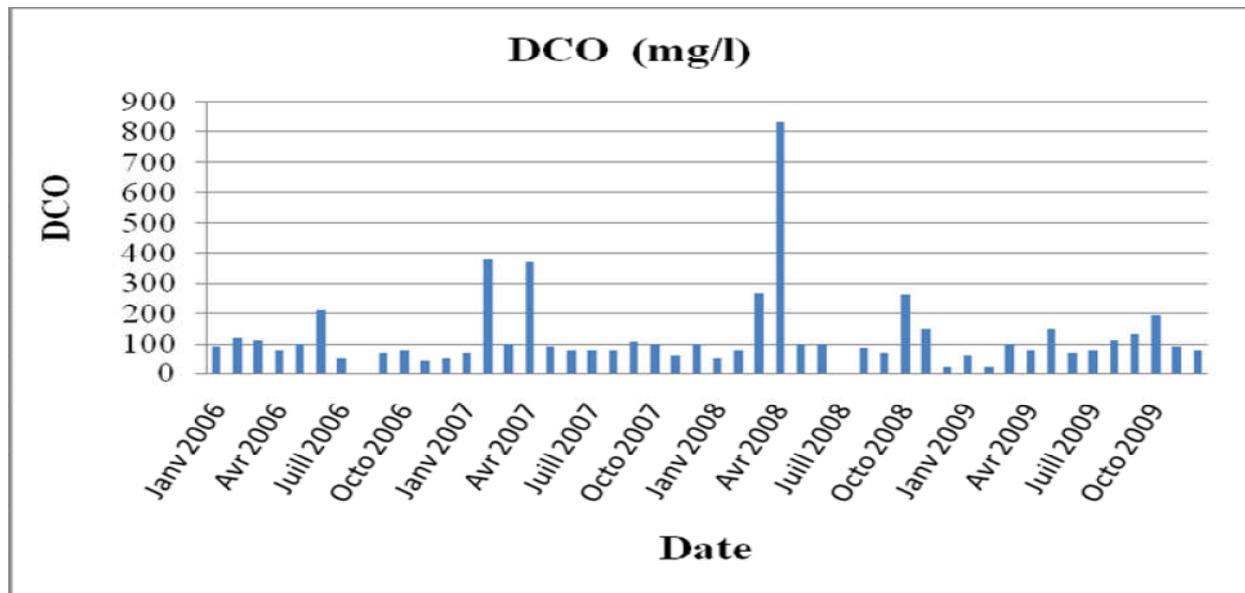
En comparaisant avec les valeurs des rejets des unités industrielles, nous remarquons qu'il ya une réduction de la DBO le long de l'oued ça se justifier par le phénomène d'autoépuration des l'oued ouardeffou.



Graphes VII.12 : L'évolution de la concentration de la DBO5 de la station Legfaf.

❖ DCO

Les valeurs de la DCO sont souvent supérieures à la norme (60 mg/l) avec un maxima de 830 mg/l, une valeur 1283% supérieur à la norme.



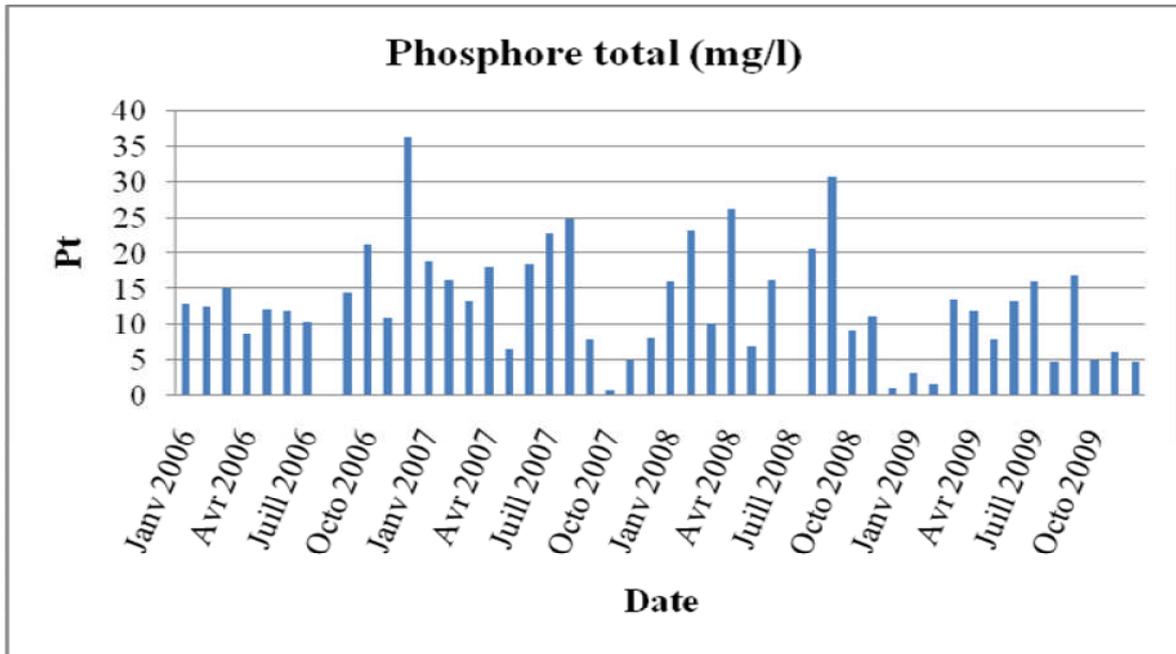
Graph VII.13: l'évolution de la concentration de la DCO de la station Legfaf.

❖ Le rapport DCO/DBO

Les valeurs de ce rapport DCO/DBO5 sont souvent supérieures à 3, ce qui montre qu'il s'agit d'une pollution domestique et industrielle difficilement biodégradable

❖ P Total

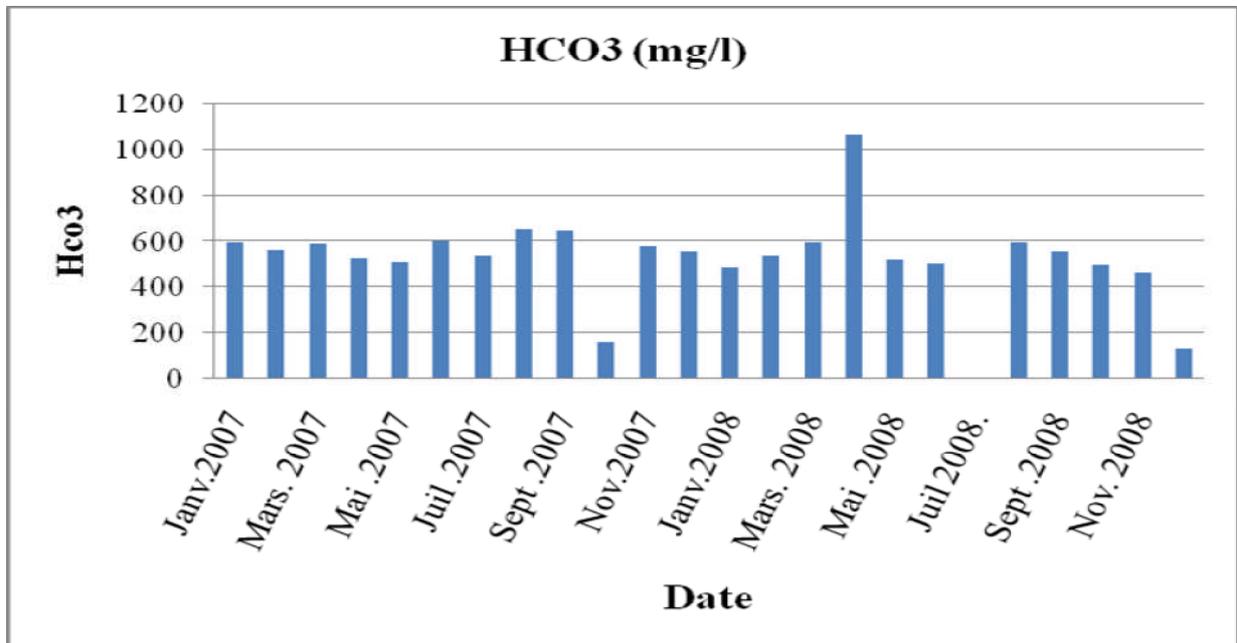
Les teneurs en P total sont très supérieures à la norme. Il est visiblement claire q'une pollution par le phosphore total est due aux produits provenant des industries (principalement celles qui rejettent des détergents produits ou utilisés dans la fabrication).



Graph VII.14: l'évolution de la concentration du P_{TOT} de la station Legfaf.

❖ HCO₃

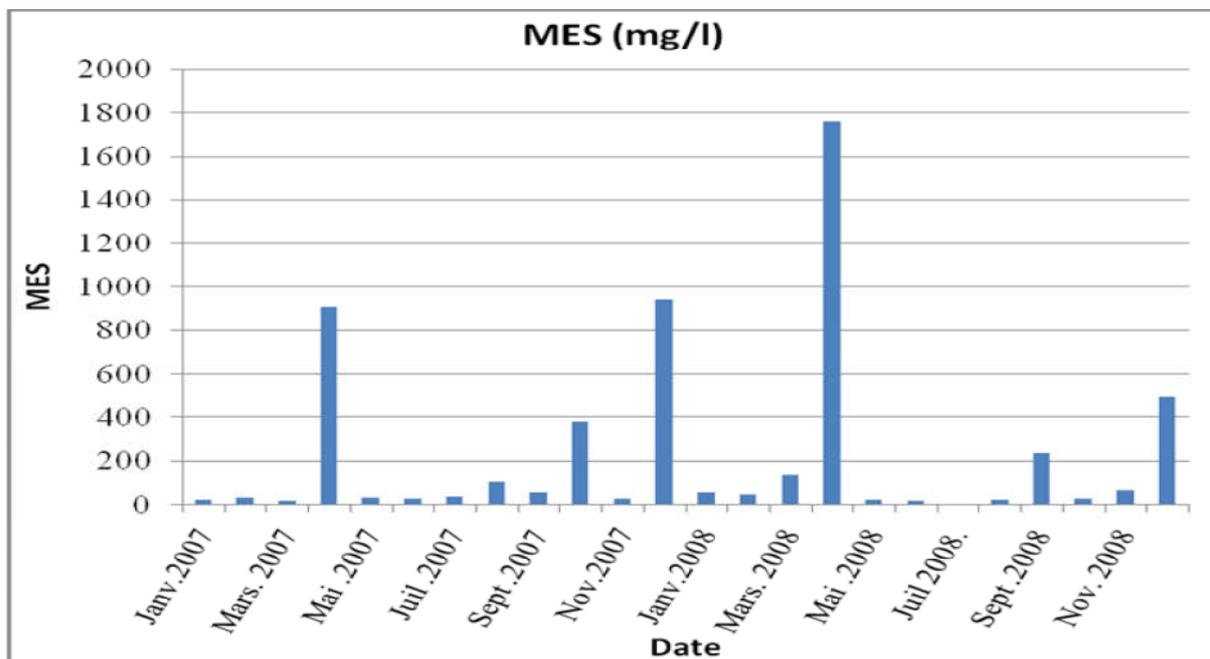
La présence des bicarbonates est très importante, ses valeurs varient entre 132 et 1064mg/l. ceci est du aux rejets de certaines usines de Maghnia principalement la Maïserie et les coopératives d'olives.



Graph VII.15: l'évolution de la concentration du HCO₃ de la station Legfaf.

❖ MES

Les résultats d'analyse montrent que les MES dépassent largement, souvent, la norme.

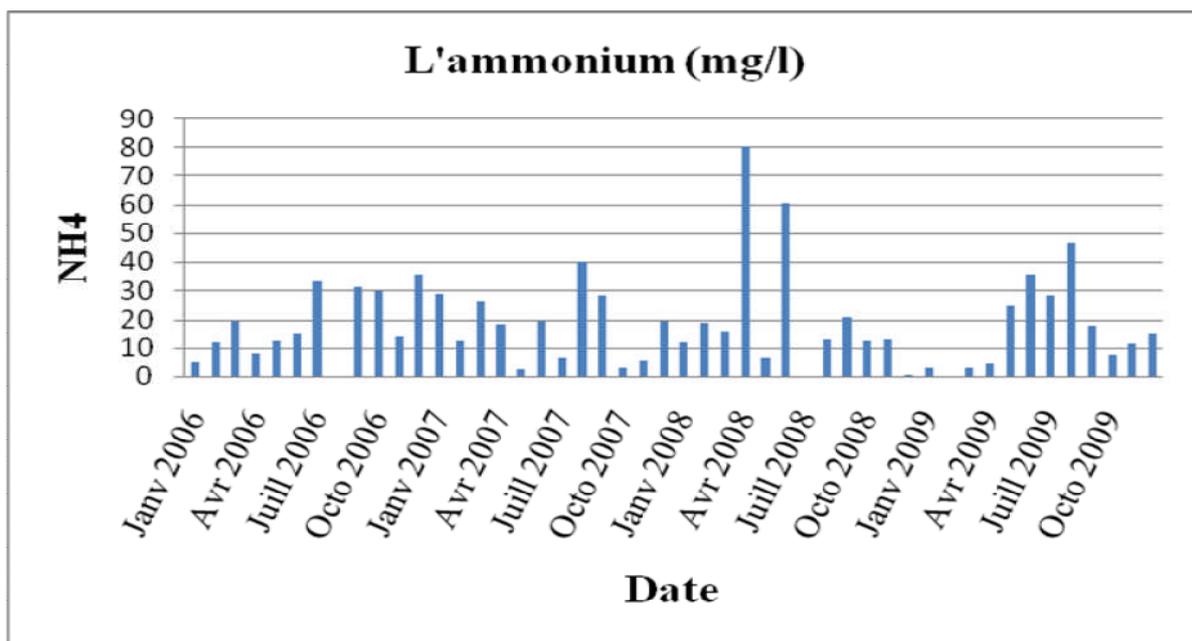


Graph VII.16 : l'évolution de la concentration du MES de la station Legfaf.

❖ NH4

L'ammonium provient essentiellement des déjections animales et humaines, par dissolution de l'azote atmosphérique dans les nuages, ainsi que par de décomposition de la matière organique par les bactéries et les champignons. Il peut être transformé en nitrites puis en nitrates. Il est peu toxique.

Les teneurs en ammonium sont élevées et dépassent souvent la norme fixée à 10 mg/l.

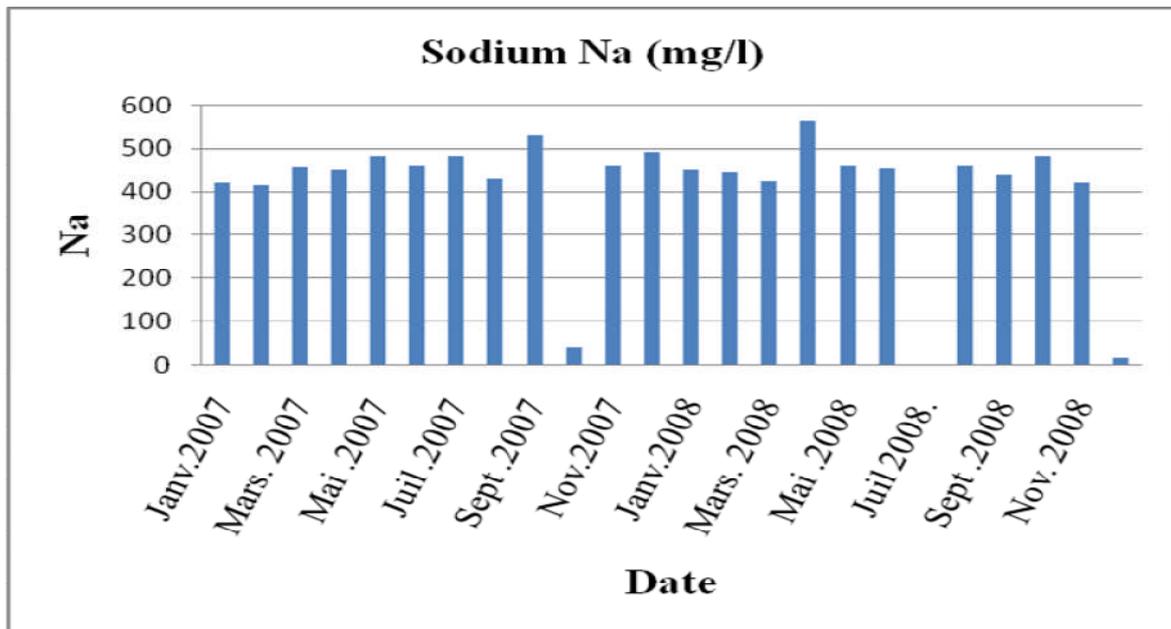


Graph VII.17: l'évolution de la concentration de l'ammonium de la station Legfaf.

❖ NA⁺⁺

La présence du sodium due aux rejets industriels (produits chimiques, détergents), agricoles, lessivage des sels minéraux), domestiques (détergent, sels de cuisines. La valeur limite du rejet est fixée à 200 mg/l.

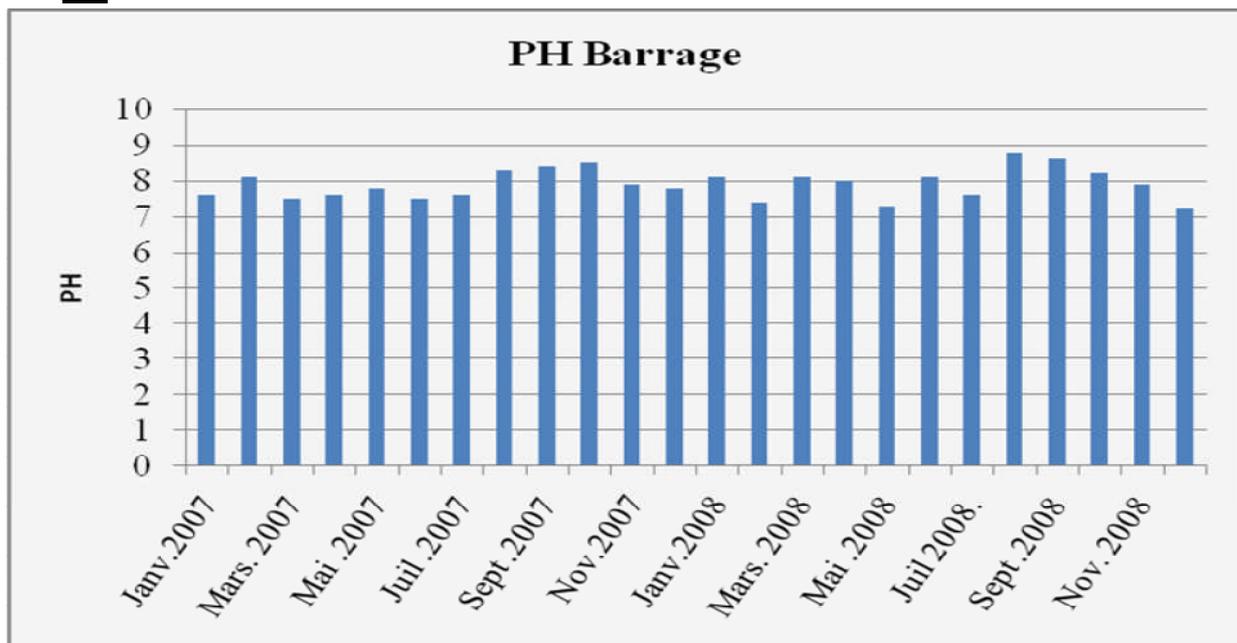
Nous remarquons que les valeurs de la série d'analyse janvier 2007 – Décembre 2008 dépassent la norme de rejet tolérante, sauf pour les deux prélèvements d'octobre 2007 et décembre 2008.



Graphes VII.18 : l'évolution de la concentration du sodium de la station Legfaf.

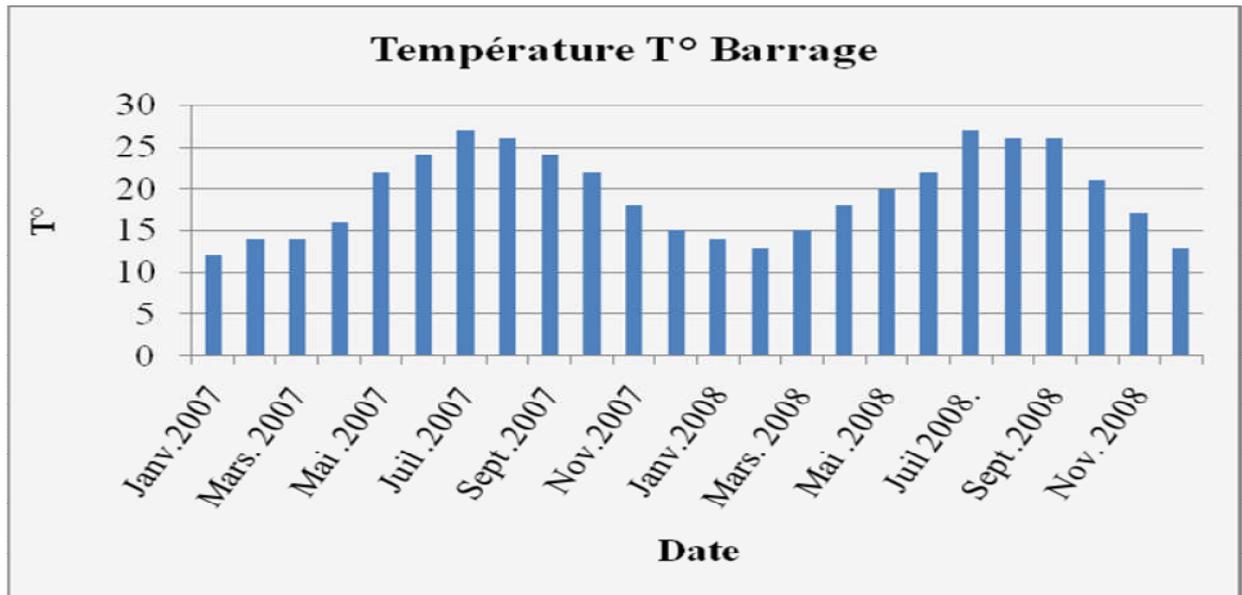
c)- Point du Barrage Hammam Bouhrara (station Barrage 160520)

❖ PH



Graphes VII.19 : l'évolution de la concentration du PH de la station barrage.

❖ Température

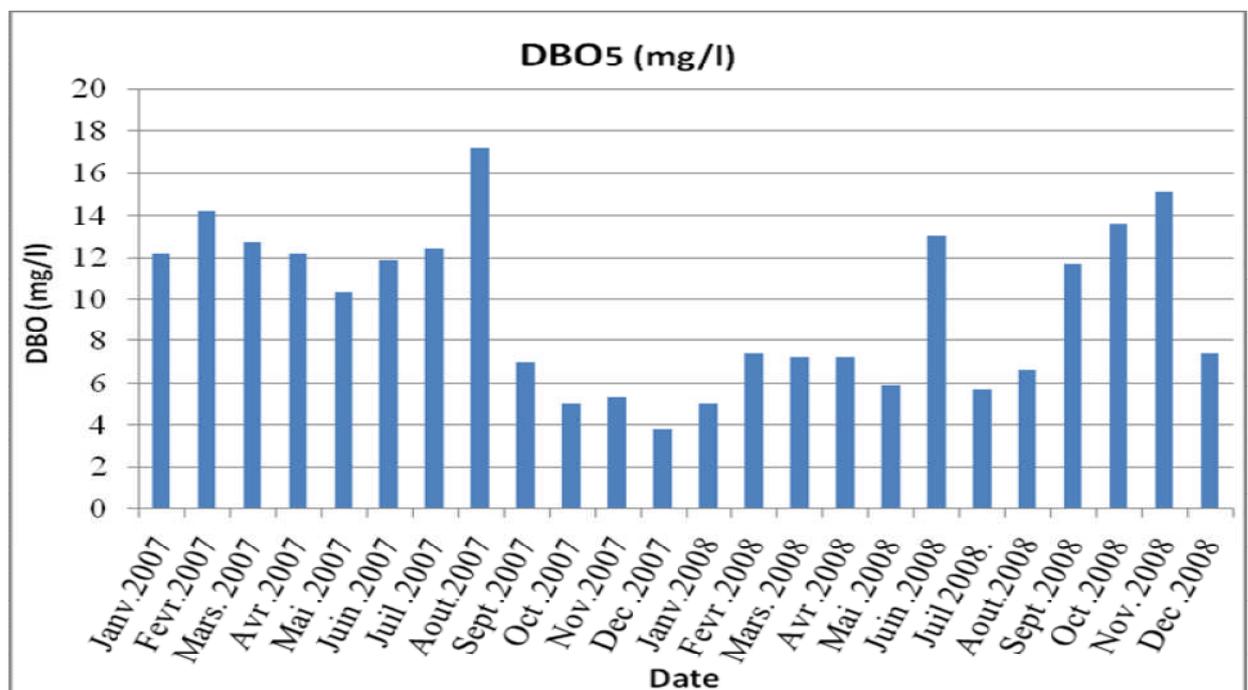


Graph VII.20 : l'évolution de la température T° de la station barrage.

❖ DBO₅

Les valeurs de la DBO₅ sont toutes inférieures à la valeur normalisée, Toutefois, il n'est pas indiqué à quel niveau de profondeur de la cuvette sont prélevées les échantillons analysés (surface, milieu ou fond).

En effet, une auto-épuration biologique anaérobie a lieu au niveau de la cuvette de barrage Hammam Boughrara.

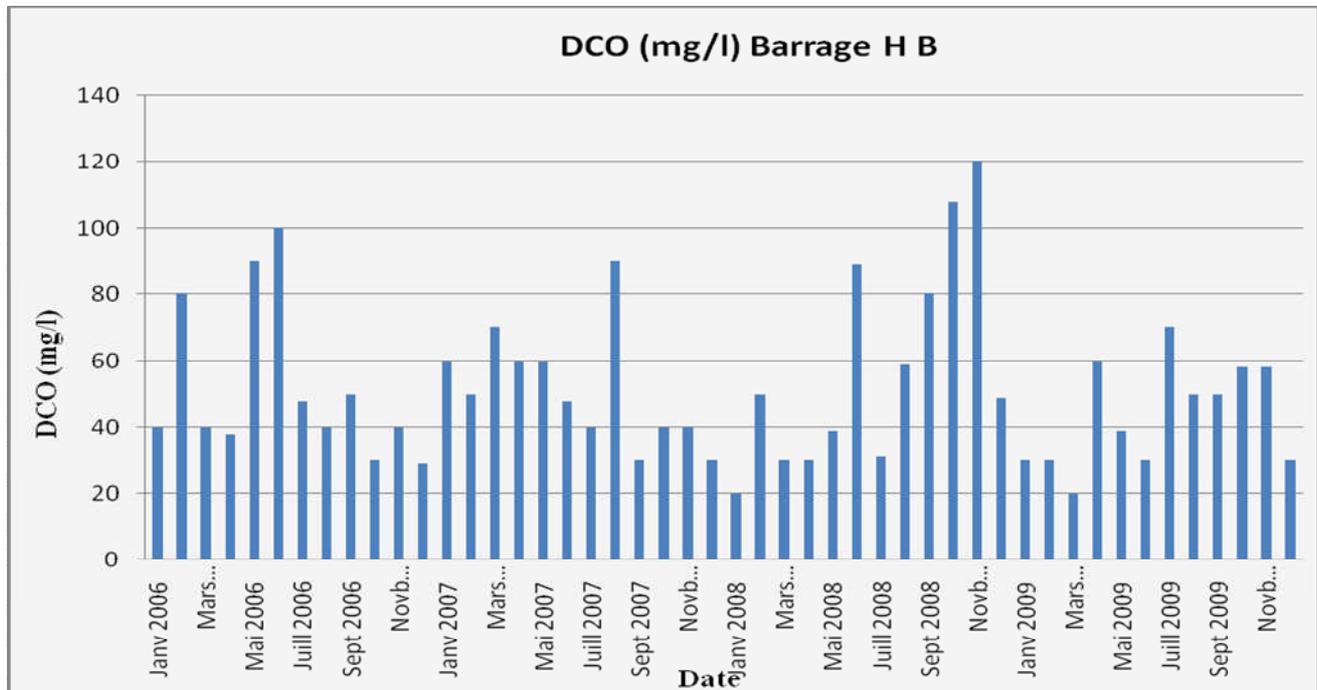


Graph VII.21: l'évolution de la concentration du DBO₅ de la station barrage.

❖ **DCO**

La DCO, par contre, présente des valeurs variables entre supérieures et inférieures à la norme (60 mg/l).

10 cas sur 48 de la DCO sont supérieurs à la norme indiquant la présence de quantité considérable de substances oxydables expliquée par la décantation des matières solides.



Graph VII.22 : l'évolution de la concentration de la DCO de la station barrage.

❖ **Le rapport DCO/DBO**

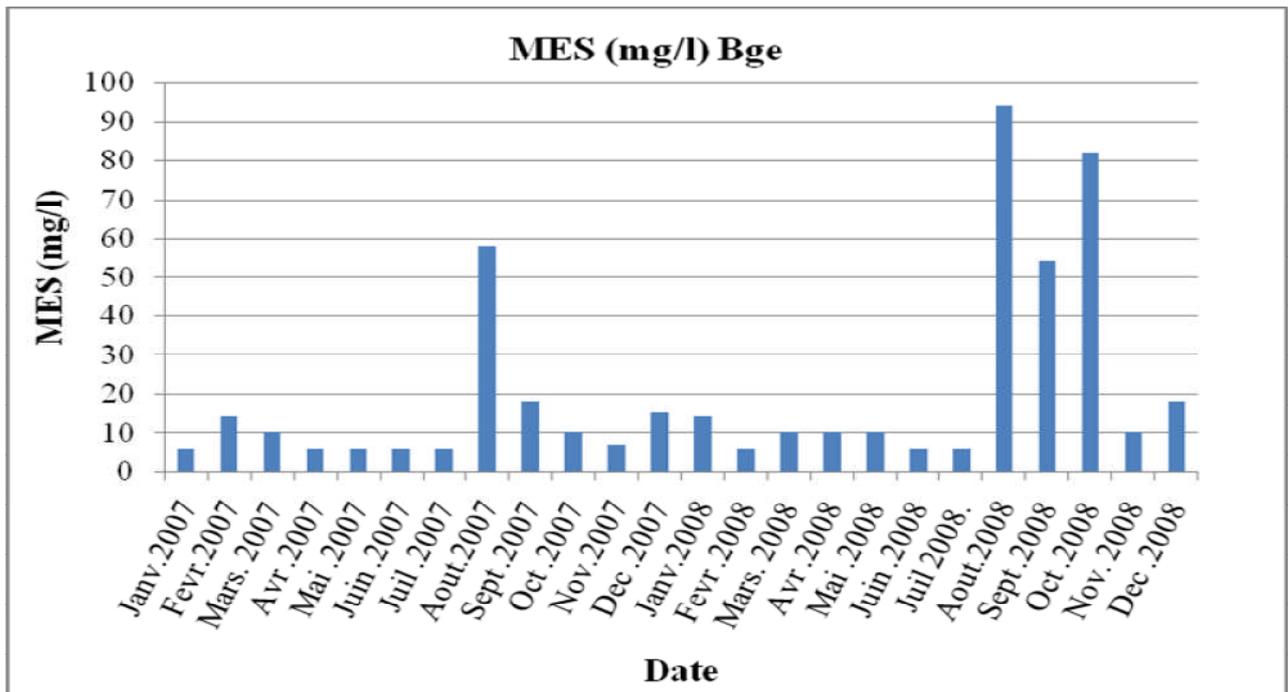
Les valeurs du rapport DCO/DBO sont comprises entre 3,22 et 8,93 supérieurs à 3 ce qui traduit l'influence d'une pollution domestique et/ou industrielle difficilement biodégradable,

❖ **MES**

Mis à part des prélèvements des dates de aout 2007, aout 2008, septembre 2008 et Octobre 2008 toutes les autres valeurs des MES sont inférieures à la norme en vigueur.

Donc il est clair que la cuvette du barrage joue un rôle d'un bassin de décantation des matières en suspension.

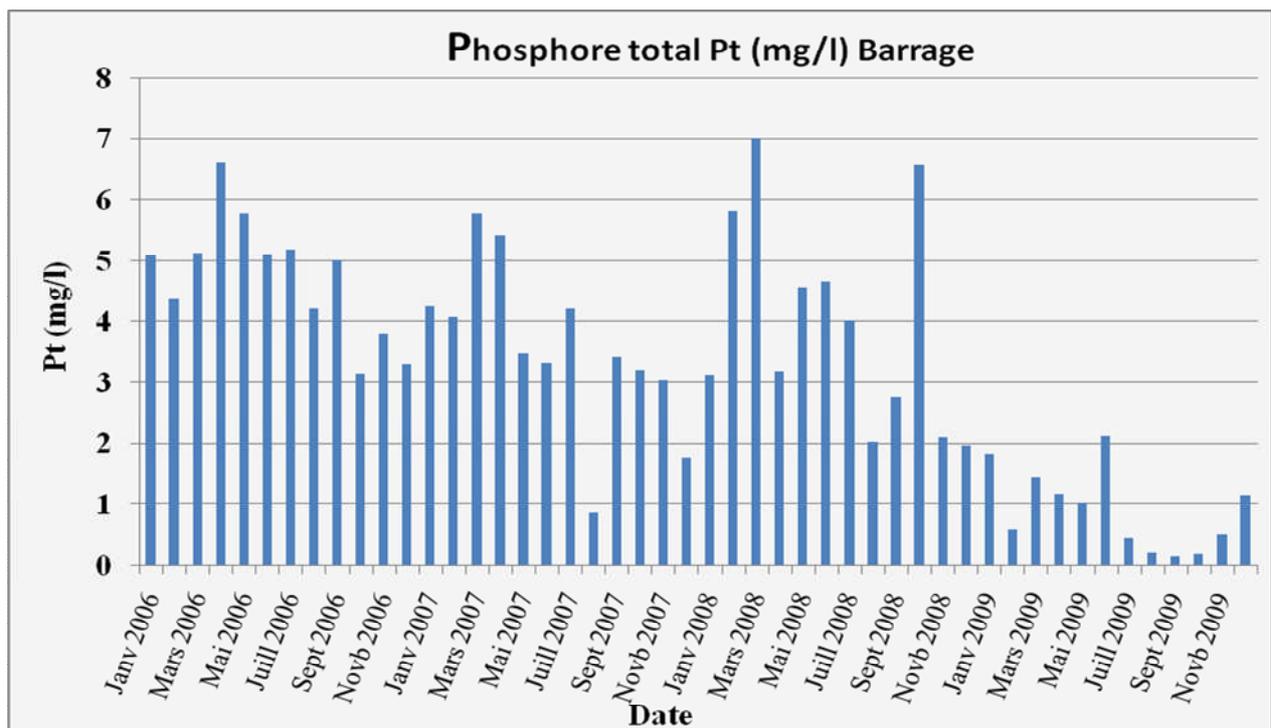
Dans leur décantation, les MES fond sédimenter d'autres substances venant s'accrocher aux particules. Ainsi, le fond du barrage est dans la plus part des cas beaucoup plus pollué qu'en surface.



Graphes VII.23 : l'évolution de la concentration du MES de la station barrage.

❖ P_{TOTAL}

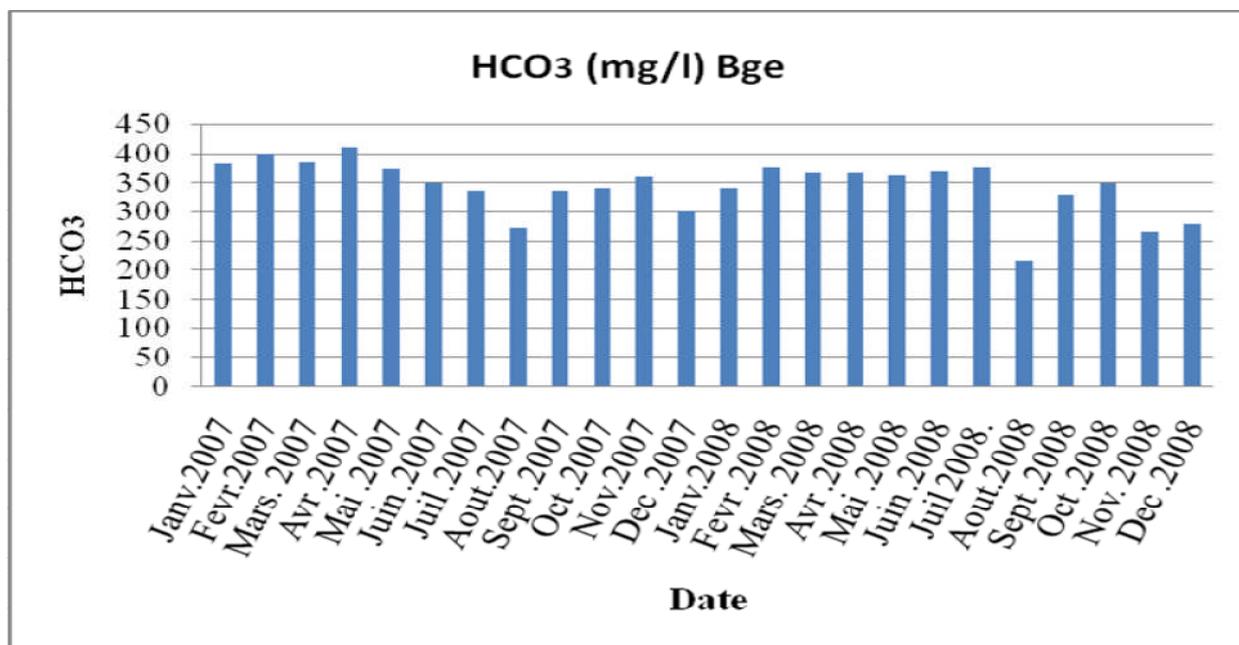
Les teneurs en phosphore sur toute la cuvette sont souvent inférieures à la norme (de 5 mg/l), mis à part quelques exceptions. Seuls les éléments phosphatés présents à des teneurs supérieures à 0.2mg/l, cas du barrage, favorisent le développement d'algues conduisant à une eutrophisation des eaux et parfois même à leur hyper eutrophisation, ceci est clairement justifier par la présence, en quantité considérable, d'algues bleues sur la surface du plan d'eau de la cuvette.



Graphes VII.24: concentration du P_{TOT} de la station barrage.

❖ **HCO₃**

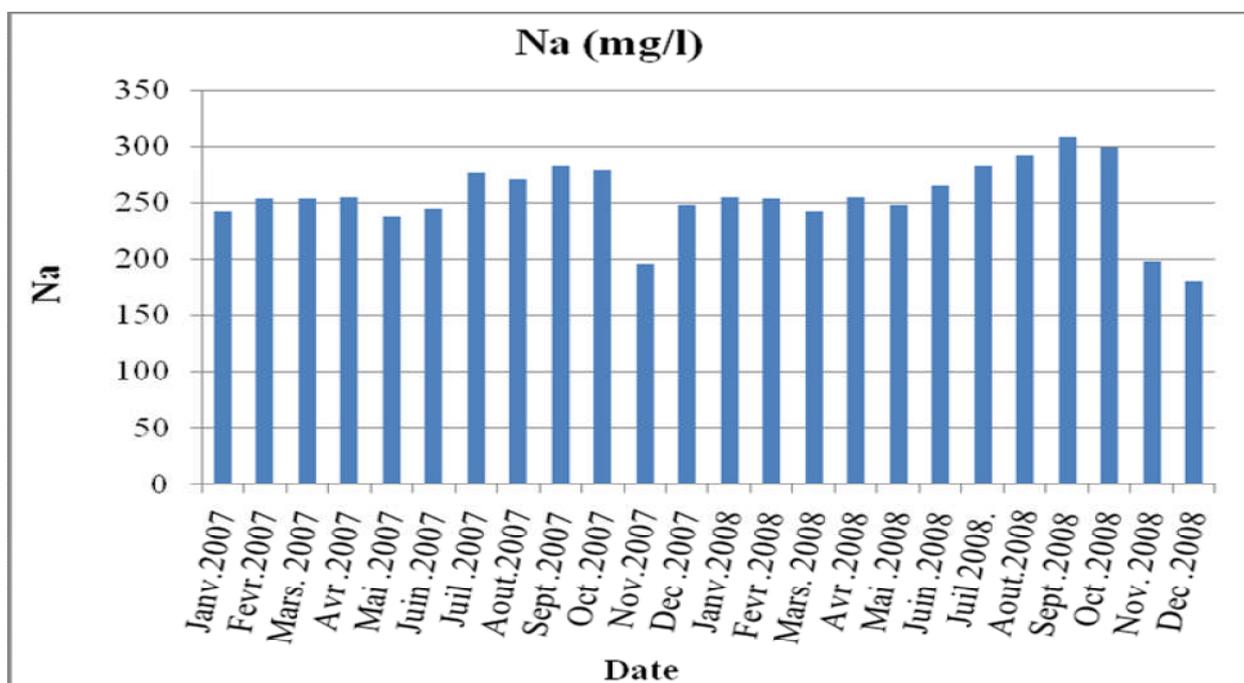
Les bicarbonates sont en quantité importante dans la cuvette du barrage, Ces teneurs indiquent la présence d'une eutrophisation par les matières organiques et par quelques substances chimiques.



Graphes VII.25 : concentration du HCO₃ de la station barrage.

❖ **Na⁺**

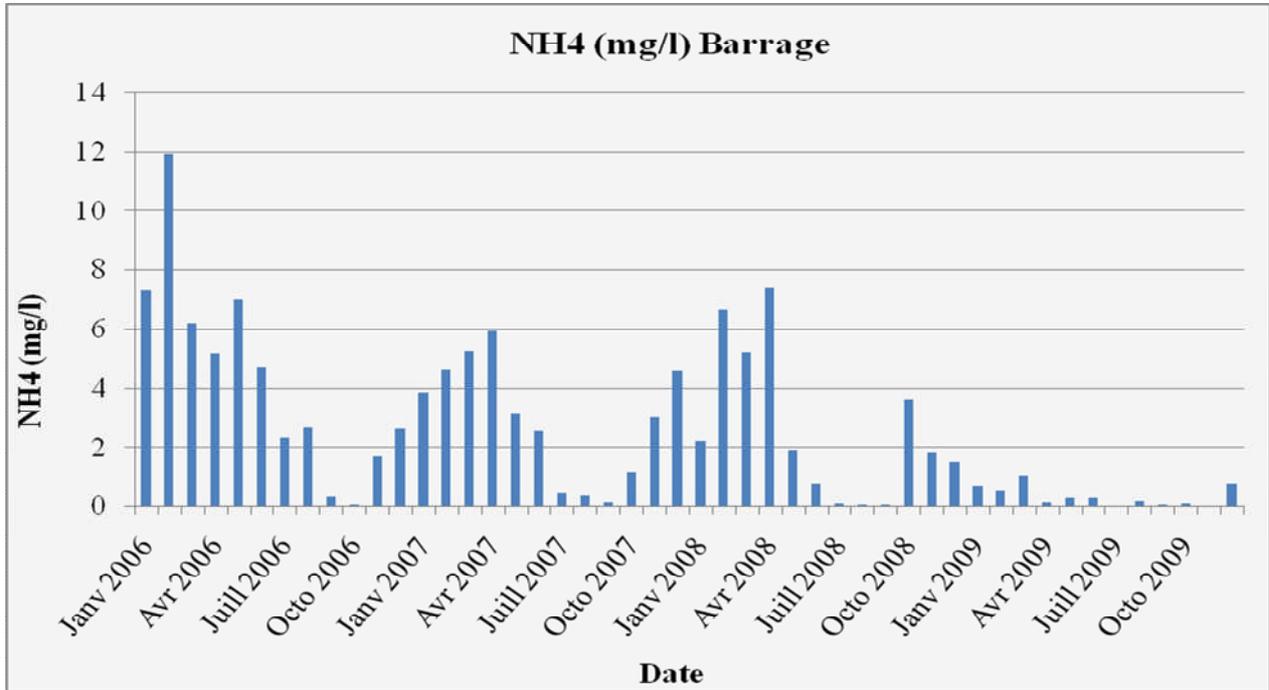
Le Na présente des valeurs sont souvent supérieures aux normes de rejet (200mg/l)



Graphes VII.26 : l'évolution de la concentration du Na de la station barrage.

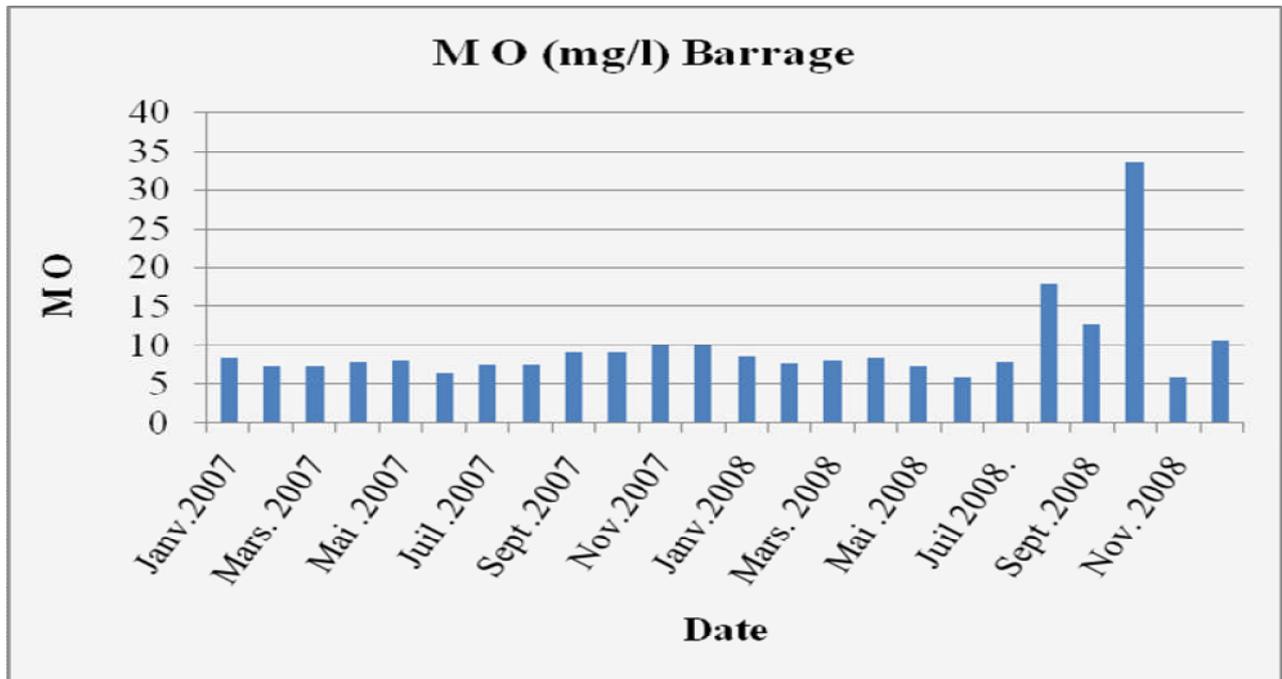
❖ **NH₄**

Les teneurs en ammonium, sont souvent, inférieures à la norme fixée à 10 mg/l .sauf pour le cas de mars 2006 où le NH₄ atteint la valeur de 11,9 mg/l.



Graphes VII.27 : l'évolution de la concentration du NH₄ en de la station barrage.

❖ **MO**



Graphes VII.28 : l'évolution de la concentration du M O de la station barrage.

❖ Etat général de la pollution

Le PH des eaux de la cuvette sont basiques. Les autres substances analysées dans ces eaux, restent en majorité inférieurs aux normes

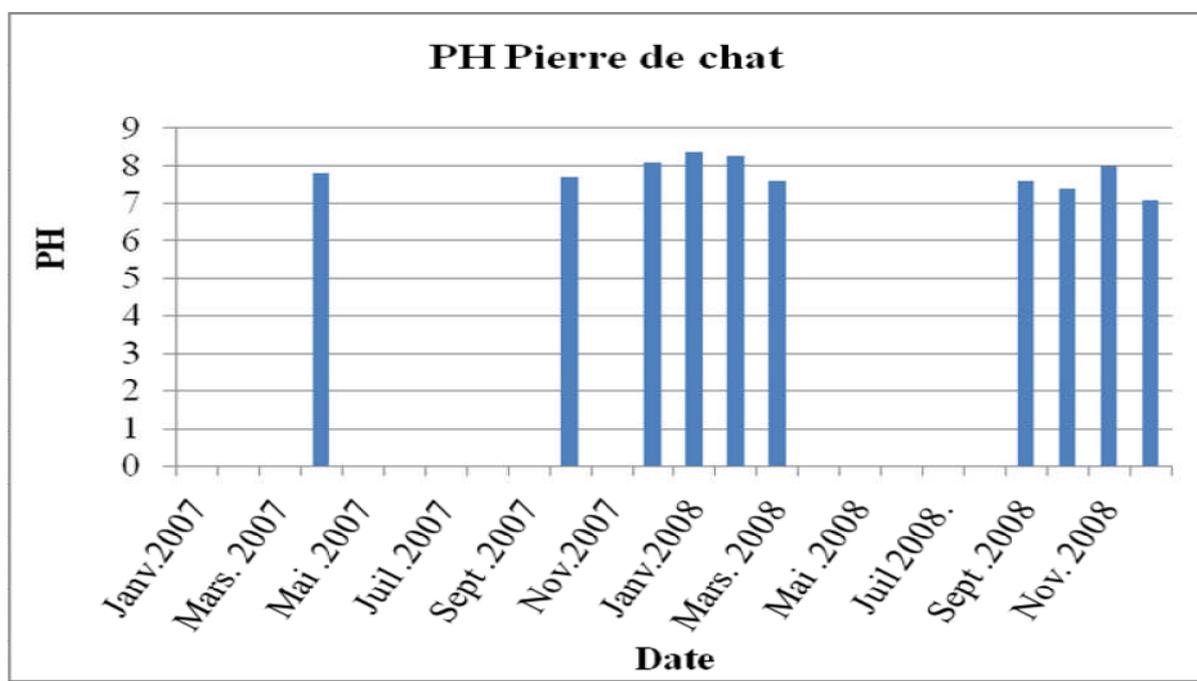
Les éléments azotés comme les nitrates et l'ammonium, malgré leurs faibles teneurs dans la cuvette, sont essentiels pour le métabolisme des algues bleues, massivement présent dans la cuvette du barrage.

En conclusion, il est clair que la pollution, qui trouve refuge dans la cuvette du barrage, suite à son charriage par les différents affluents du barrage, connaît une dilution et une autoépuration biologique, rendant les eaux du barrage beaucoup moins polluée. Autrement dit, la cuvette du barrage Hammam Boughrara joue le rôle d'une lagune d'épuration à système facultatif, aérobie en profondeur.

Toutefois, il faut signaler que le fond du barrage doit être largement chargé par des teneurs de différentes substances chimiques et microbiennes, ces concentrations peuvent facilement se retrouver à des hauteurs différentes de la cuvette, par calorifugeage suite à de fortes crues.

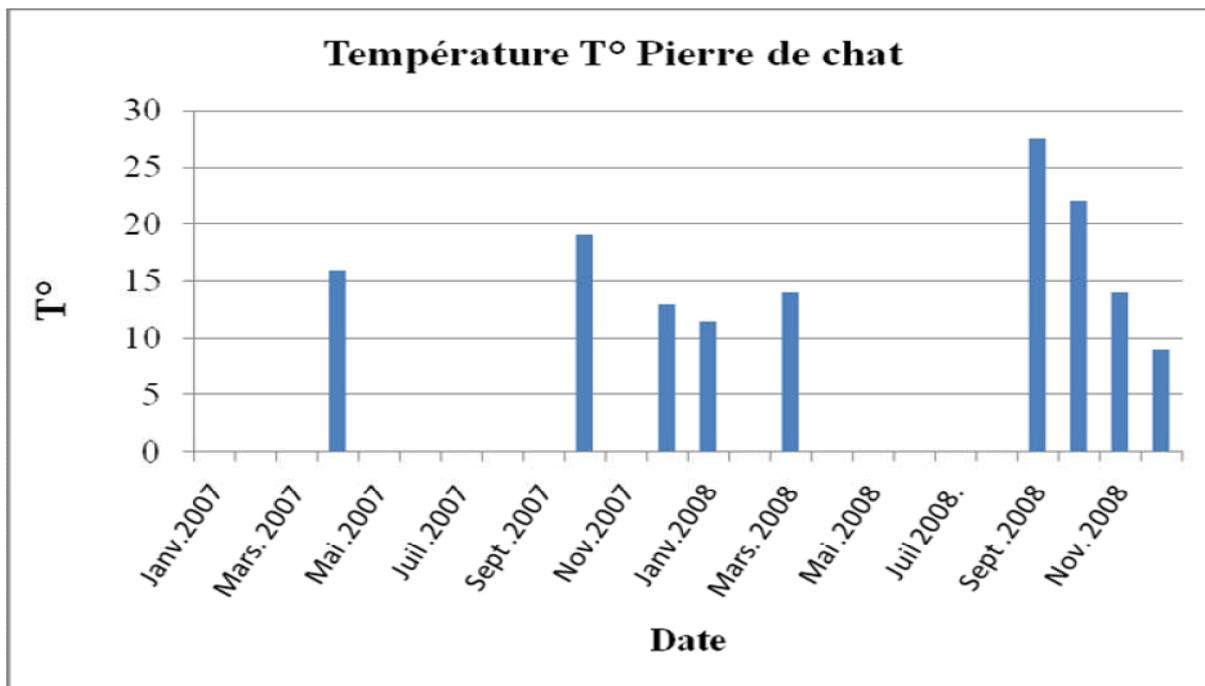
d) Point Pierre du Chat (station Pierre de chat 160801)

❖ PH



Graphes VII.29 : l'évolution du PH de la station de la station pierre de chat.

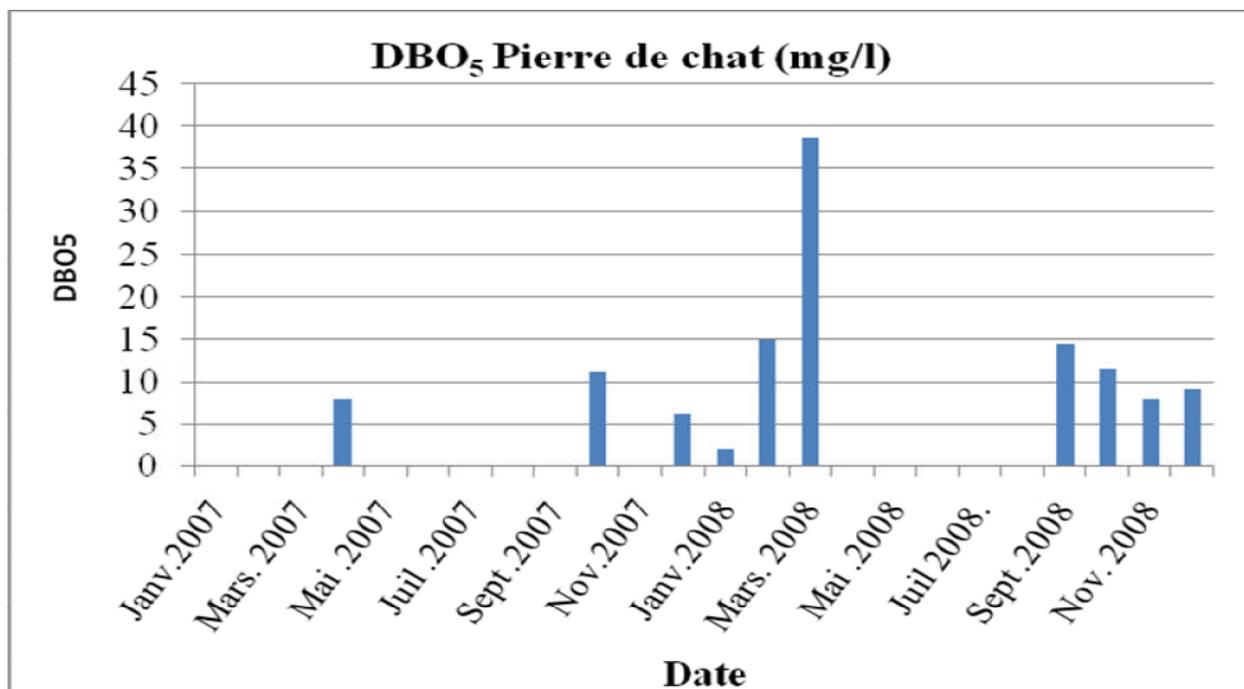
❖ Température



Graphes VII.30 : l'évolution de la température T° de la station de pierre de chat.

❖ DBO₅

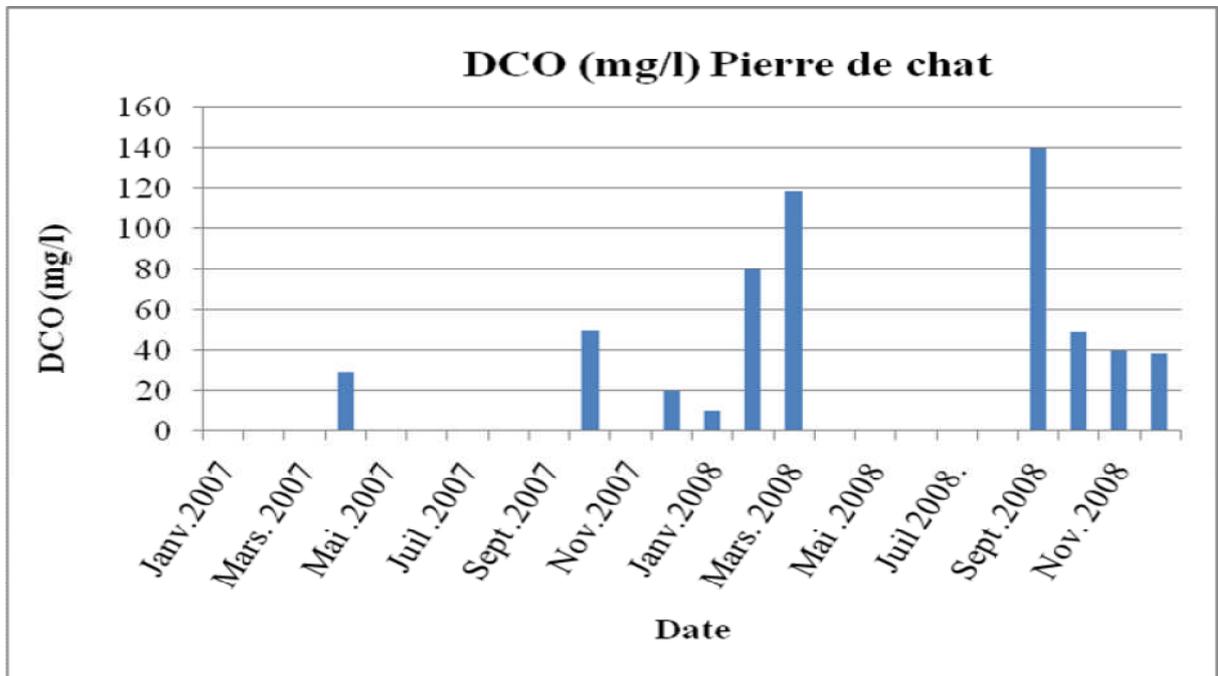
Au niveau du point de station de pierre du Chat on ne dispose pas de valeur de la DBO₅. Celle-ci doit être négligeable.



Graphes VII.31 : l'évolution de la concentration du DBO₅ de la station pierre de chat.

❖ **DCO**

Par ailleurs, la DCO est soit souvent inférieure à la norme (60 mg/l) ou bien quelque fois supérieur. Ceci est dû certainement aux divers rejets dans la moyenne Tafna, surtout d'origine domestique et agricole, chargés par certaines matières oxydables.



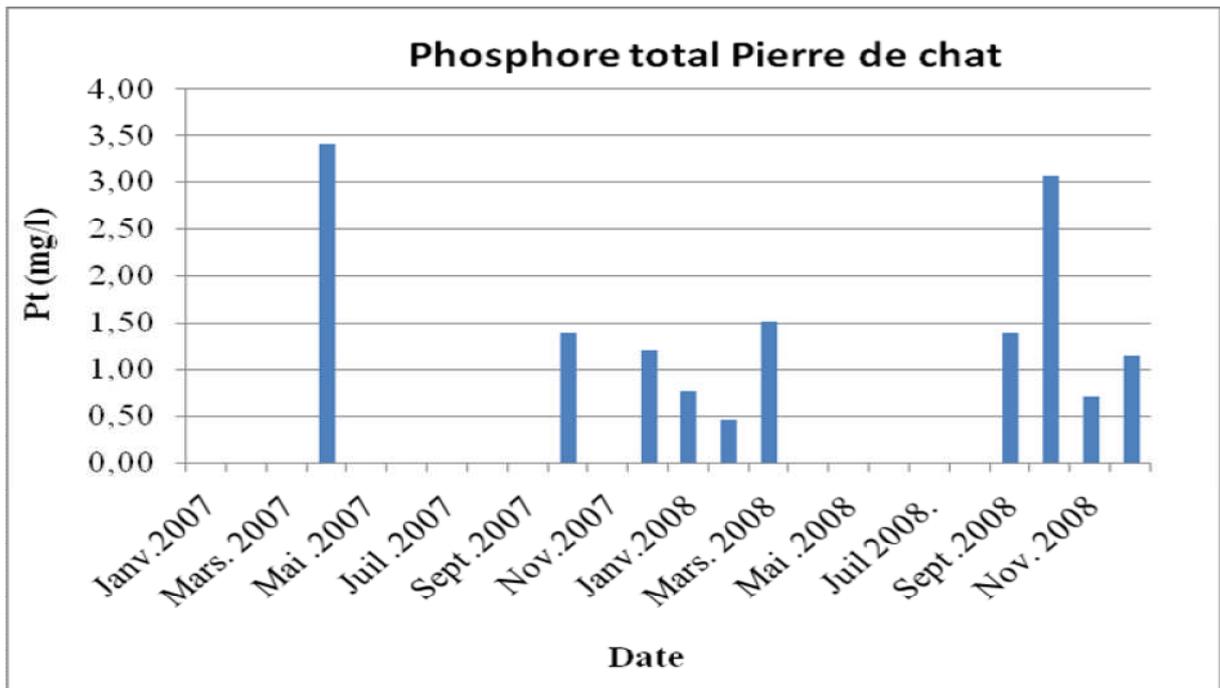
Graph VII.32: l'évolution de la concentration du DCO pierre de chat.

❖ **Le rapport DCO/DBO₅**

Les valeurs du rapport DCO/DBO sont supérieures à 3 ce qui traduit l'influence d'une pollution domestique et/ou industrielle difficilement biodégradable.

❖ **P Total**

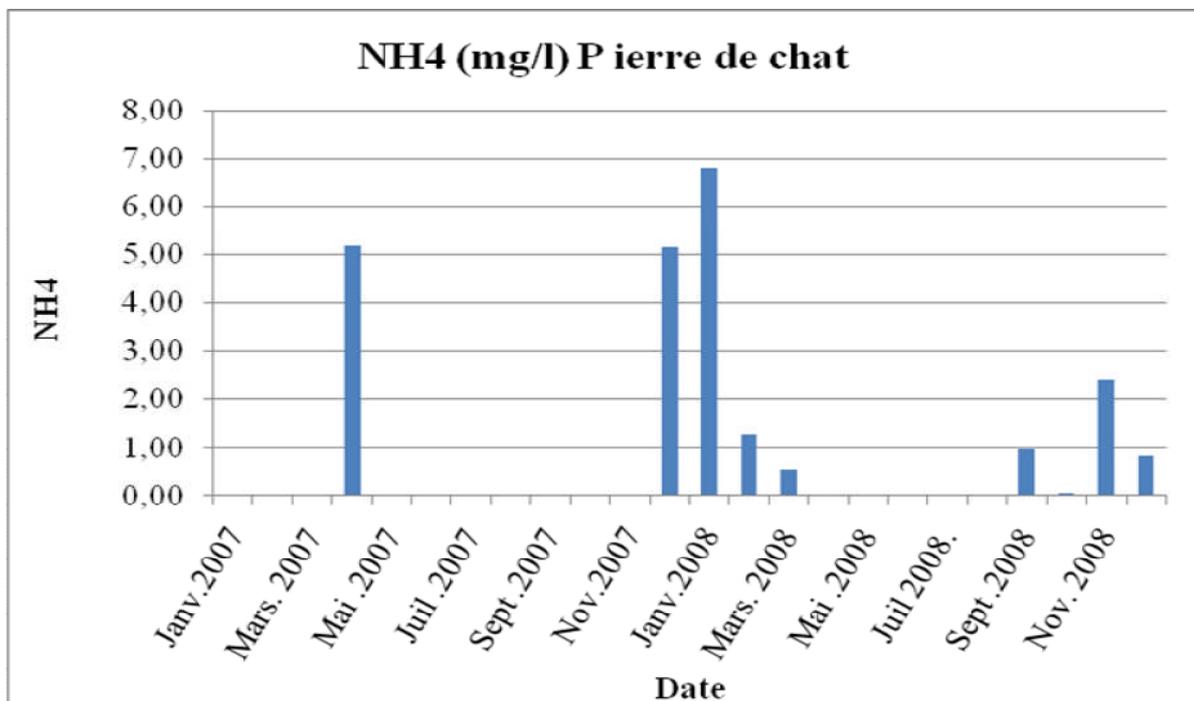
Les valeurs du phosphore sont toutes inférieures à la norme. Mais elles dépassent les 0.2 mg/l, favorisant ainsi le développement des algues bleues.



Graphes VII.33: l'évolution de la concentration du P_{TOT} pierre de chat.

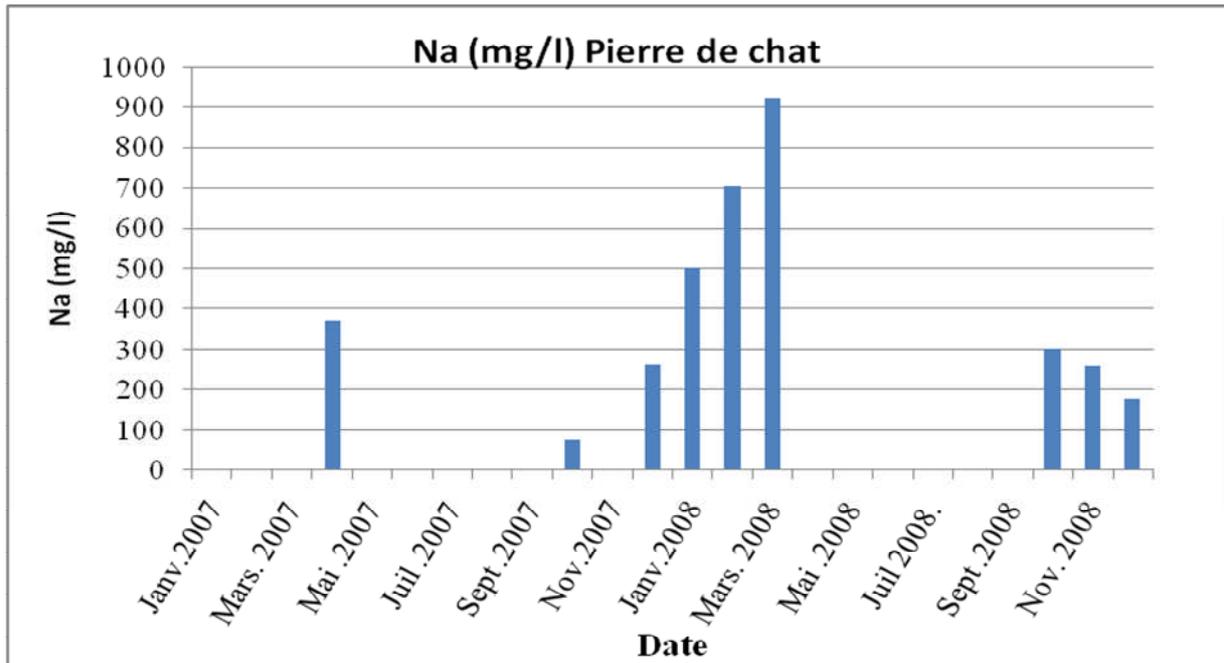
❖ NH_4

L'ammonium à la pierre du Chat est très faible à la norme. Ceci indique l'absence de pollution en éléments azotés.



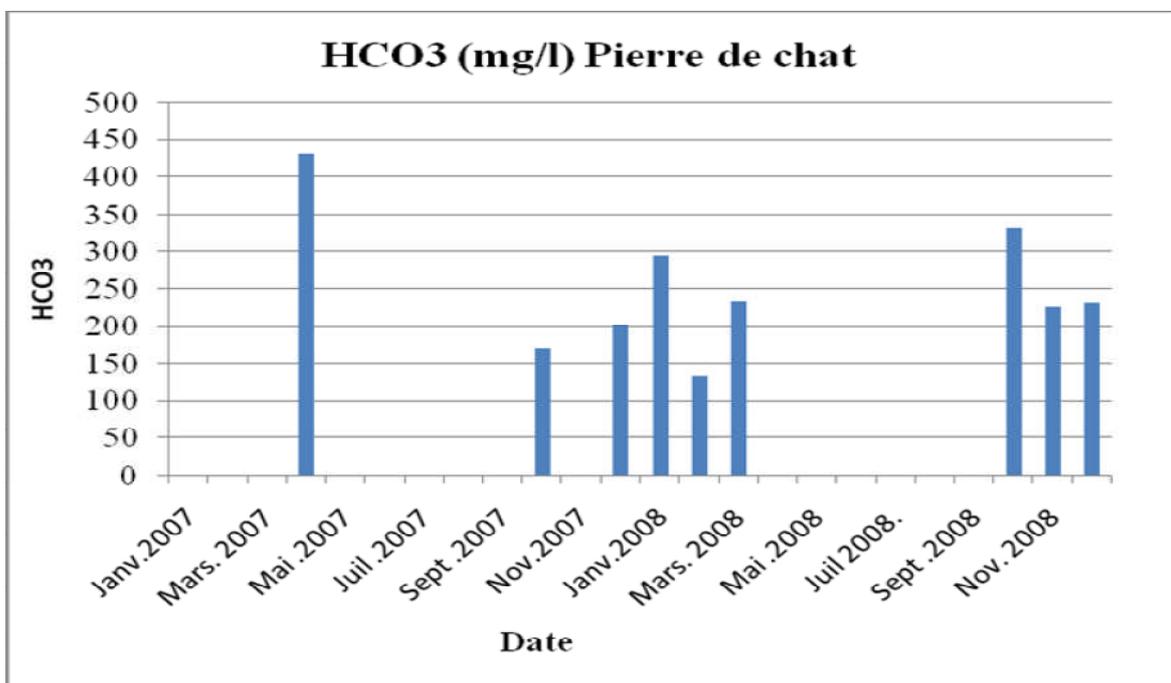
Graphes VII.34: l'évolution de la concentration du NH_4 pierre de chat.

❖ Na

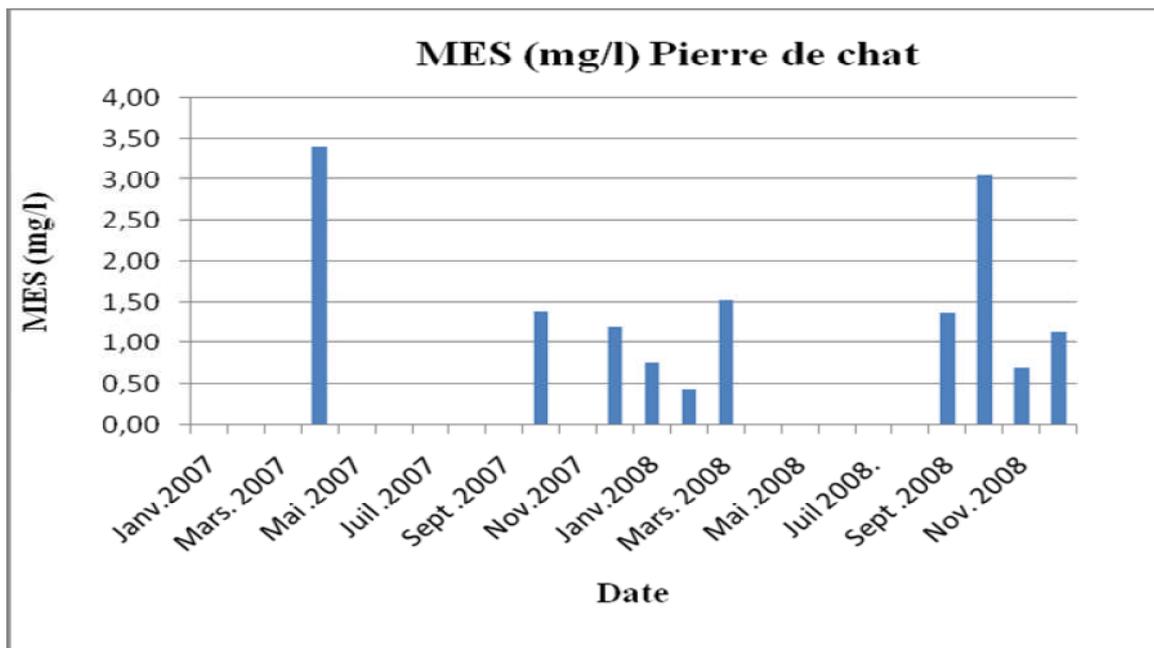


Graph VII.35: l'évolution de la concentration du Na pierre de chat.

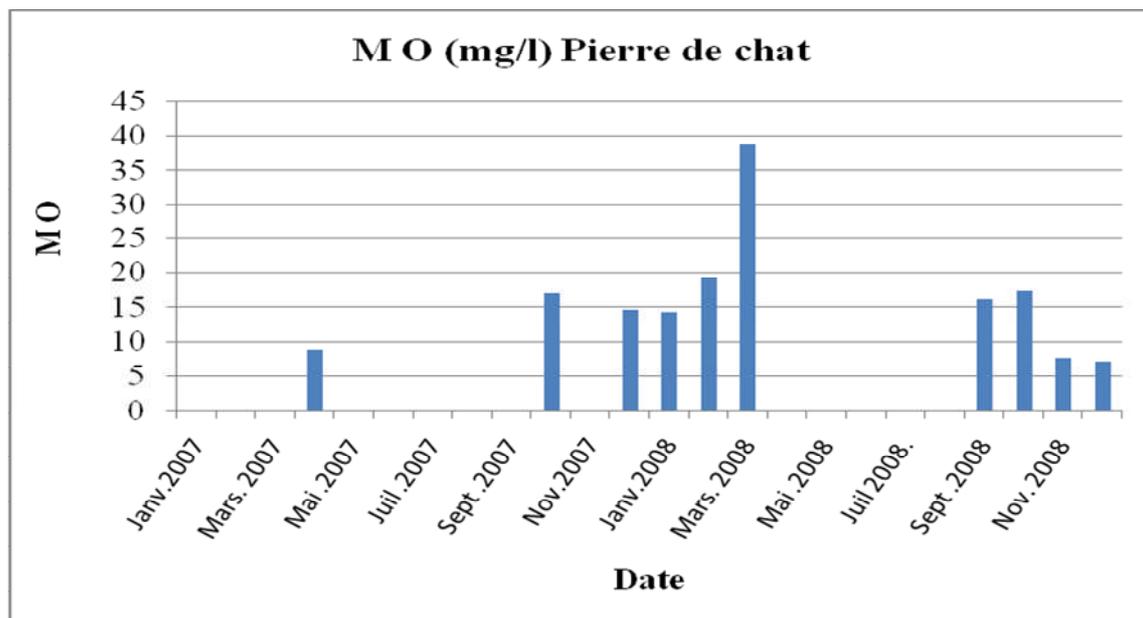
❖ HCO₃



Graph VII.36 : l'évolution de la concentration du HCO₃ pierre de chat.

❖ MES

Graphe VII.37 : l'évolution de la concentration du MES pierre de chat.

❖ MO

Graphe VII.38 : l'évolution de la concentration du M O pierre de chat.

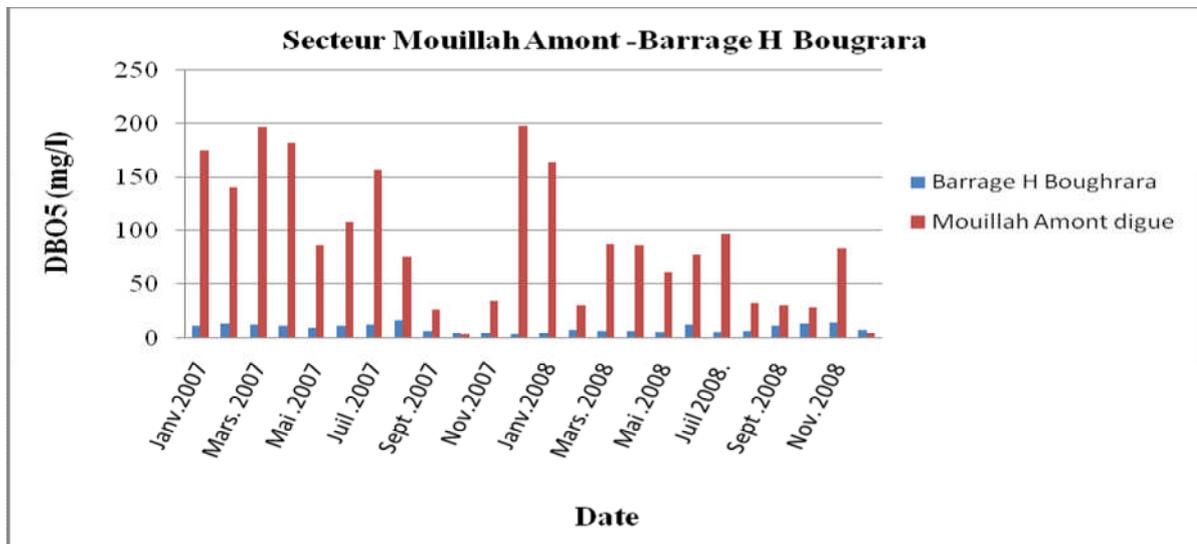
❖ Etat général de la pollution

Avec des eaux neutres ayant une tendance alcaline, les résultats des différents paramètres montrent qu'au niveau de la station Pierre du chat, à l'aval du barrage (plus loin du barrage), les eaux ne présentent pas un risque de pollution. Nous devons, tout de même signaler la présence de quelques éléments de matières oxydables, fort probablement dus aux rejets domestiques et agricoles de la moyenne Tafna.

VII.3.4.2. Analyse spatiale de la pollution :

Secteur Mouillah Amont-Barrage Hammam Boughrara :

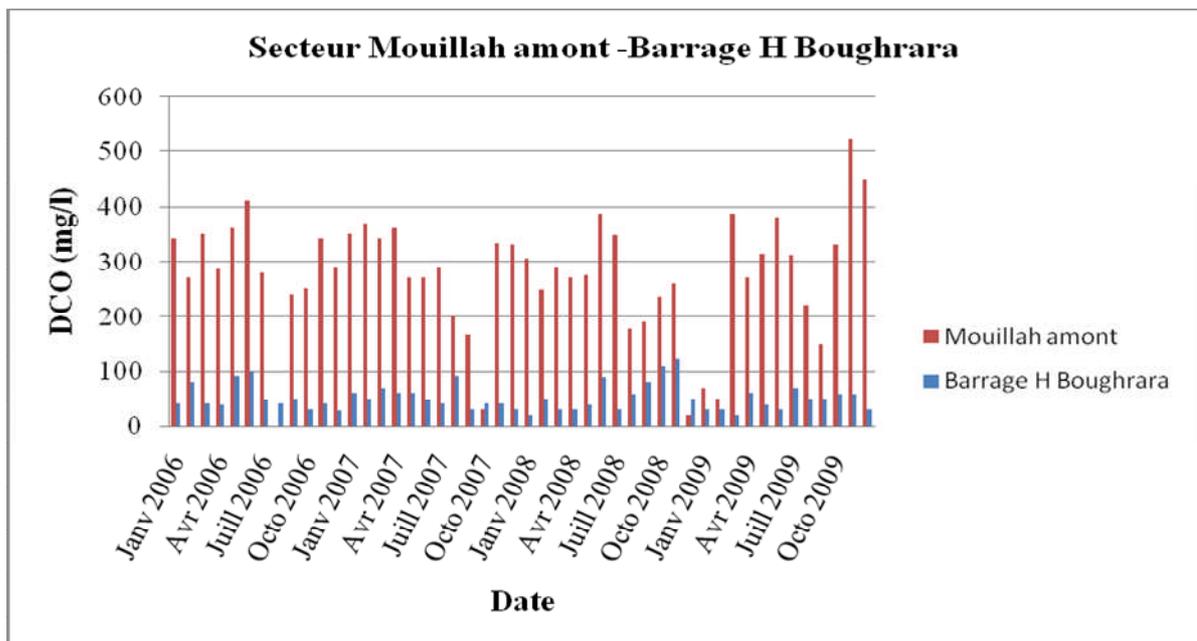
❖ DBO₅



Graphes VII.39 : concentration de la DBO₅ en fonction du temps (secteur mouilliah amont –barrage)

Nous remarquons que la DBO₅ connaît bien une réduction au cours de son parcours entre les points de Mouillah amont et Barrage Hammam Boughrara. Cette réduction due à une auto-épuration peut atteindre les 98 % (cas du mois du décembre 2008).

❖ DCO



Graphes VII.40 : concentration de la DCO en fonction du temps (secteur mouilliah amont –barrage)

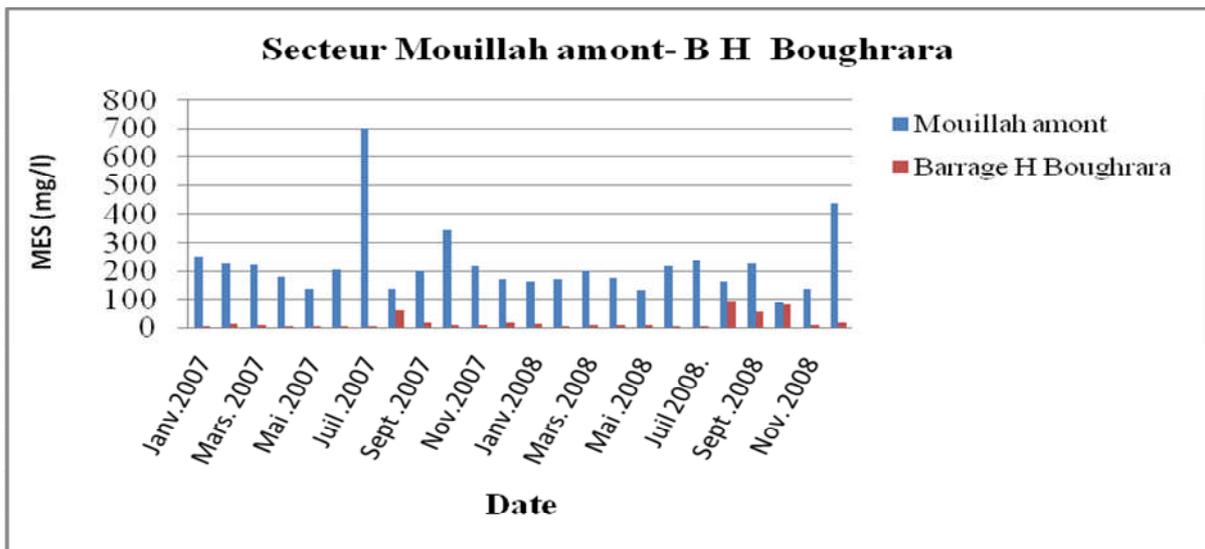
Quant à la DCO elle aussi est réduite entre les points de prélèvement Mouillah amont et Barrage de H Boughrara. Cette réduction atteignant les 95% (mars 2009) montre l’existence de micro-

organismes en forte activité (algues bleues, bactéries hétérotrophes). Néanmoins, au mois d’octobre 2007 et décembre 2008 la DCO au niveau du Barrage dépasse celle enregistrée à Mouillah amont, ceci est dû à la forte quantité d’oxygène dissoute dans l’eau.

❖ **MES**

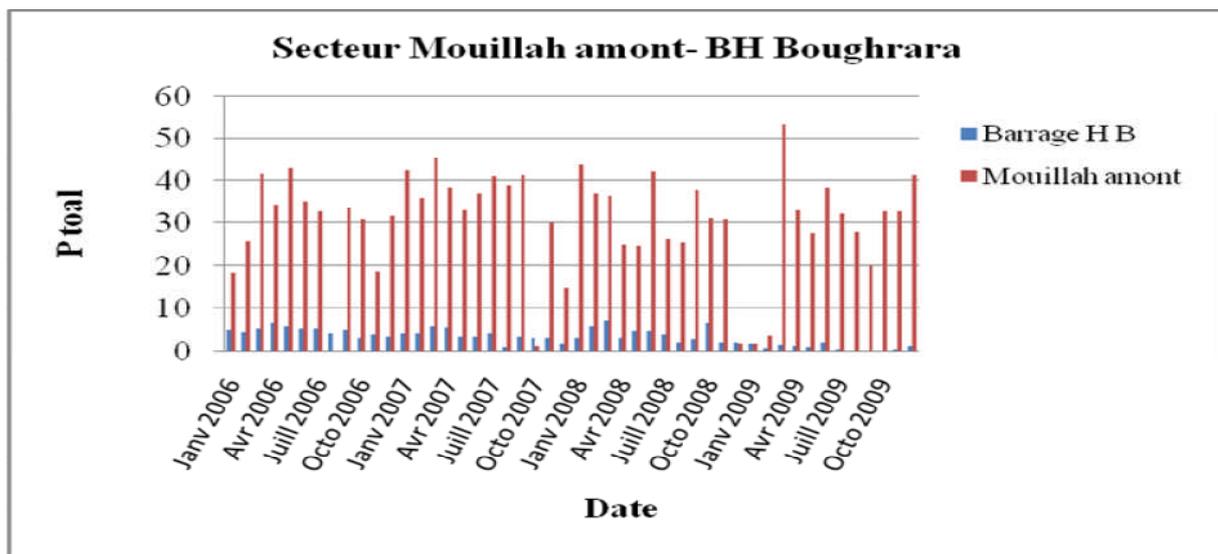
La diminution ou l’augmentation des MES entre les deux points et leur quantité, dépend essentiellement de la masse d’eau écoulée et à l’érosion des sols, surtout agricoles, ces deux endroits

Les matières en suspension (MES) enregistrées au barrage sont largement inférieures aux valeurs de Mouillah, En effet, la réduction en MES dépasse les 90% sauf pour trois (03) cas (Aout 2007, Aout et Octobre 2008



Graph VII.41: concentration du MES en fonction du temps (secteur mouillah amont –barrage)

❖ **P_{Total}**

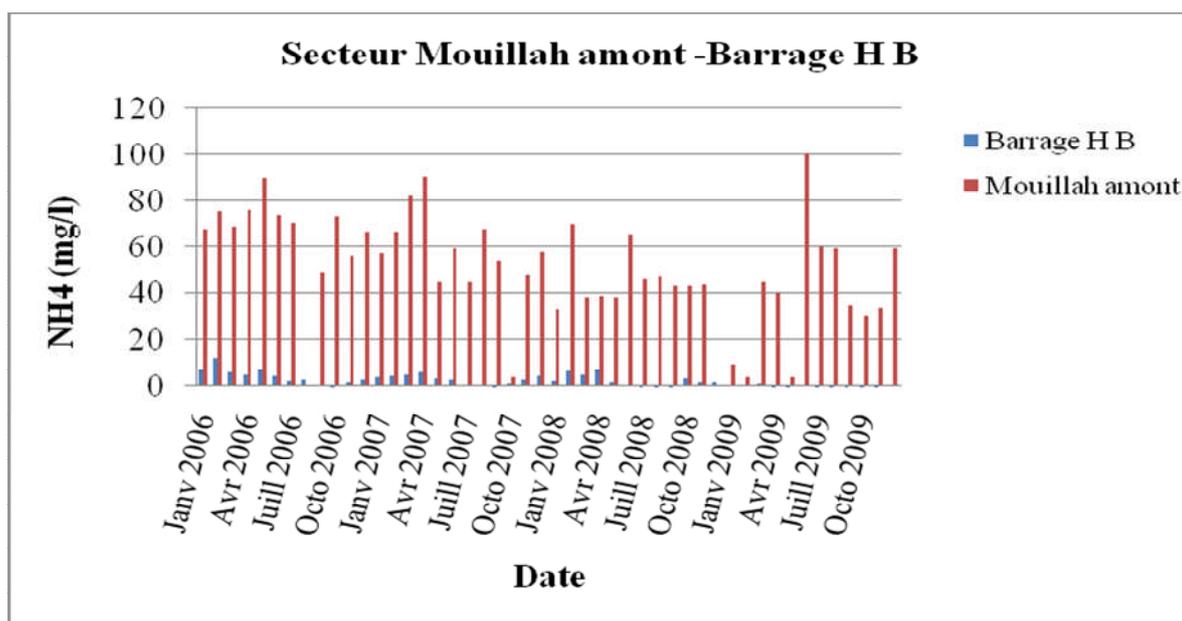


Graph VII.42: concentration du P_{TOT} en fonction du temps (secteur mouillah amont –barrage H B)

Dans la majorité des cas, le phosphore Total entre Mouillah Amont et Barrage hammam Boughrara connaît une réduction variant de 08% (janvier 2009) à 99% (Octobre 2009).

Les quantités du P_{Tot} ont connus une augmentation en Octobre 2007 et Décembre 2008, probablement due à un apport supplémentaire au niveau du cours d'eau, cet apport est la cause d'un lessivage soit des sols agricoles riches en engrais phosphatés, soit de rejets au niveau de la décharge non contrôlée de Hammam Chigueur, renfermant des détergents.

❖ **NH₄⁺⁺**



Graph VII.43: concentration du NH_4 en fonction du temps (secteur mouillah amont –barrage H B)

L'ammonium entre Mouillah Amont et barrage Boughrara connaît bien une réduction, celle-ci varie de 68% (Octobre 2007) à 99.9% (Novembre 2009), sauf pour le prélèvement du mois de décembre 2008. D'ailleurs, cette auto-épuration peut réduire l'ammonium au-dessous de la norme (10mg/l). Cependant son niveau du barrage ou entre les deux points de prélèvement, ou encore d'une transformation d'autre élément (N, NO_3^- ou NO_2^-) en NH_4 sachant que ce dernier est facilement ammonifiable.

❖ **Etat général de la pollution**

Les autres paramètres, analysés connaissent dans leur majorité une nette réduction entre point de prélèvement de Mouillah Amont et barrage de Hammam Boughrara. Cette réduction implique l'existence d'une auto-épuration plus ou moins importante.

Chapitre VIII

Etude de la diffusion des polluants dans le milieu

Chapitre VIII : Etude de la diffusion des polluants dans le milieu

VIII.1. Introduction :

Dans ce chapitre on traite la simulation spatio-temporelle de la pollution dans le bassin versant d'oued Mouillah par un modèle mathématique. Cette simulation nous permet de connaître la variation des matières polluantes, déversées dans le milieu, selon des différents intervalles de temps et de distances.

VIII.2 Présentation du modèle utilisé :

Le programme utilisé est écrit en FORTRAN 77 standard, il a été écrit pour résoudre les équations :

- de la convection-diffusion unidimensionnelle,

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left(\frac{U_x}{\epsilon_m}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x+U_t}{\sqrt{4\epsilon_m t}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x-U_t}{\sqrt{4\epsilon_m t}}\right) \right] \dots\dots\dots(\text{VIII .1})$$

- et de la convection-dispersion unidimensionnelle,

$$C(x,t) = \frac{C_0}{2} \left[\exp\left(\frac{U_x}{k_x}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x+U_t}{\sqrt{4k_x t}}\right) + \operatorname{erfc}\left(\frac{x-U_t}{\sqrt{4k_x t}}\right) \right] \dots\dots\dots(\text{VIII .2})$$

Ces deux solutions, qui sont valables pour n'importe quel instant, t, ont été données par Daily et Harleman (1966, p. 434)

Les deux solutions sont comparables. La diffusivité moléculaire, ϵ_m , dans l'équation VIII.1 a été remplacée dans l'équation VIII.2 par la dispersivité, K_x .

L'implantation de ces deux équations dans un programme d'ordinateur présente une difficulté d'ordre pratique. Le plus grand nombre à virgule flottante qui peut être exprimé sur un ordinateur habituel est :

$$2^{1023} = 2^{(2^{10}-1)} = 8.988E + 307$$

En évaluant les équations dans leur présente forme, cette limite peut être atteinte très rapidement. En effet, $\exp(710) > 8.988E+307$; ce qui revient à dire que $(U_x / K_x) < 710$.

le calcul direct du terme $\exp(U_x / K_x)$ dans l'éq. VIII.2 devient impossible déjà à partir de $x = 710$ m.

Pour contourner cette difficulté, le premier terme entre parenthèses dans l'éq. VIII.2 (le même développement reste aussi valable pour l'éq. VIII.1) est réécrit de la manière suivante:

$$\exp\left(\frac{Ux}{k_x}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}\right) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-(x-Ut)^2}{4k_x t}\right) \frac{1}{\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}} \left[\sqrt{\pi} \frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}} \exp\left(\frac{(x+Ut)^2}{4k_x t}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}\right) \right] \dots\dots\dots (\text{VIII.3})$$

Il existe une expansion asymptotique en série comme suit :

$$\sqrt{\pi} \alpha \exp(\alpha^2) \operatorname{erfc}(\alpha) \approx 1 + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{1.3\dots(2m-1)}{(2\alpha^2)^m} \dots\dots\dots (\text{VIII.4})$$

En posant :

$$\alpha = \frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}$$

L'équation VIII.3 peut être réécrite en utilisant l'expansion asymptotique dans l'équation. VIII.4

$$\exp\left(\frac{Ux}{k_x}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}\right) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-(x-Ut)^2}{4k_x t}\right) \frac{1}{\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}} \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{1.3\dots(2m-1)}{\left(2\left(\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}\right)^2\right)^m} \right] \dots\dots\dots (\text{VIII.5})$$

En utilisant cette approximation, l'équation VIII.2 prend la forme suivante :

$$\frac{C(x,t)}{C_0} \approx \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp\left(\frac{-(x-Ut)^2}{4k_x t}\right) \frac{1}{\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}} \left[1 + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \frac{1.3\dots(2m-1)}{\left(2\left(\frac{x+Ut}{\sqrt{4k_x t}}\right)^2\right)^m} \right] + \operatorname{erfcx}\left(\frac{x-Ut}{\sqrt{4k_x t}}\right) \right\} \dots\dots\dots (\text{VIII.6})$$

Tous les termes de cette équation peuvent être calculés sur un ordinateur sans dépassement de la capacité de représentation des nombres. C'est cette équation qui a été utilisée dans le programme.

Il convient d'ajouter que la valeur absolue du résidu de l'expansion asymptotique, éq. VIII.4, après m termes est plus petite que le premier terme négligé et a le même signe.

VIII.3 Structure et fonctionnement du programme :

Le programme est composé d'un programme principal et de deux sous-programmes.

- Le programme principal contrôle le déroulement de l'ensemble. Il s'agit de calculer le profil de la concentration adimensionnelle résultant d'une source continue placée à l'origine, $x = 0$, le long d'un tronçon à un moment donné. Le programme principal appelle deux sous-programmes pour effectuer des tâches bien précises: LIRE et ERF. Les résultats sont écrits dans le fichier de sortie.

➤ Le sous-programme LIRE, comme son nom l'indique, lit les données du problème en questionnant l'utilisateur. L'utilisateur fournit au programme :

- le coefficient de dispersion longitudinale, K_x , (ou la diffusivité moléculaire longitudinale, ϵ_m) ;
- la vitesse moyenne de l'écoulement, U (m/s) ;
- le temps pour lequel le profil doit être calculé ;
- les limites du tronçon et le pas d'espace ;
- le nom du fichier de sortie.

Le sous-programme ERF calcule la fonction d'erreur en utilisant la formule approximative.

➤

$$erf(Y) = 1 - \frac{1}{(1 + a_1Y + a_2Y^2 + a_3Y^3 + a_4Y^4 + a_5Y^5 + a_6Y^6)^{16}} + \epsilon(Y)$$

Où

$$|\epsilon(Y)| \leq 3.10^{-7}$$

Et

$$a_1 = 0.0705230784 \quad ; \quad a_2 = 0.0422820123 \quad ; \quad a_3 = 0.0092705272$$

$$a_4 = 0.0001520143 \quad ; \quad a_5 = 0.0002765672 \quad ; \quad a_6 = 0.0000430638$$

VIII.4. Choix des polluants pour la simulation :

Nous allons dans ce qui suit étudier la diffusion du Phosphore Total (P_{TOT}), DBO_5 et la DCO

Le choix de ces trois éléments, s'est fait sur la base de l'étude de variabilité spatio-temporelle, menée précédemment. Nous avons remarqués que le P_{tot} de différentes origines, la DBO_5 et la DCO des sources organiques (industrielle ou domestique), sont parmi les paramètres les plus polluants au niveau du bassin versant du barrage Hammam Boughrara.

L'étude de la diffusion intéresse la partie amont du barrage, sur deux (02) points de prélèvements caractéristiques différents, (possédons leurs données), l'un au niveau du point dit Mouillah amont couvrant le cours d'eau principale (Mouillah) et l'autre au niveau de la station de Legfaf sur le cours d'eau d'oued Ouardeffou principal affluent d'oued Mouillah draine lui-même les eaux des affluents oued Lamhaguen et oued Abbes ce qui nous a permis de couvrir la totalité du bassin versant.

Vu la complexité du problème, il était indispensable d'apporter quelques simplifications sur les caractéristiques morphologiques des Oueds, ainsi que les conditions d'écoulements et de répartitions de la concentration. Néanmoins, les hypothèses fixées n'influent guère sur la diffusion de la pollution dans le bassin versant, ces hypothèses se résument par les points suivants :

- ❖ La section transversale au niveau des stations de prélèvement a une forme rectangulaire, de la largeur B , où la hauteur du plan d'eau est h ;
- ❖ L'écoulement dans les cours d'eau est considéré comme unidimensionnel ;
- ❖ La vitesse moyenne correspond au débit d'écoulement enregistré ;
- ❖ Les concentrations des paramètres analysés au niveau des prises sont considérées comme une source continue et constante ;
- ❖ Les concentrations sont supposées réparties sur l'ensemble de la section transversale ;
- ❖ Le coefficient de dispersion longitudinal, K_x (m^2/s), c'est un paramètre qui peut être déterminé expérimentalement ou à l'aide des formules empiriques.

a) **Détermination expérimentale** : c'est la meilleure solution pour obtenir une valeur qui reflète le vrai comportement d'un polluant dans un cours d'eau.

Trois méthodes existent pour évaluer expérimentalement ce coefficient, la méthode des *Moments*, la méthode de *Chatwin* et la méthode d'*acheminement* (routing procedure).

b) **Détermination à l'aide des formules empiriques** : l'importance d'une bonne estimation du coefficient de dispersion longitudinale a poussé pendant plus de trois décennies de nombreux chercheurs à développer des formules analytiques adaptées à différentes caractéristiques hydrauliques des cours d'eau. Treize formules ont été recensées, elles sont présentées dans le tableau ci-dessous.

Tableau VIII -1 : Formules empiriques pour déterminer le coefficient de dispersion longitudinal.

Auteurs	Formules	Domaine d'application
Elder (1959)	$K_x = 5.93 HU^*$	Canaux très larges
Parker 1961	$k_x = 14.28R_H^{3/2} \sqrt{2gS}$	Canaux
Fisher 1966	$k_x = -\frac{1}{A} \int_0^W bu' \int_0^\gamma \frac{1}{Eb} \int_0^\gamma bu' d\gamma d\gamma d\gamma$	Canaux naturels larges
McQuivey and Keefer 1974	$k_x = 0.058 \frac{HU}{S}$	Fr < 0.5
Fisher 1975	$k_x = 0.011 \frac{U^2 W^2}{HU^*}$	Canaux naturels larges
Liu 1977	$k_x = 0.18 \left(\frac{U^*}{U}\right)^{1.5} \frac{U^2 W^2}{HU^*}$	Tous types de cours d'eau
Magazine et Al 1988	$k_x = 0.4 \left(\frac{U}{U^*}\right)^{-1.632} 75.86 R_H U$	Cours d'eau naturels
Iwasa and Aya 1991	$k_x = 2 \left(\frac{W}{H}\right)^{1.5} HU^*$	Canaux et cours d'eau naturels
Seo and Sheong	$k_x = 5.915 \left(\frac{W}{H}\right)^{0.620} \left(\frac{U}{U^*}\right)^{1.428} HU^*$	Cours d'eau naturels
Koussis an Rodriguez- Mirasol 1998.	$k_x = 0.6 \frac{U^* W^2}{H}$	Cours d'eau naturels
Dong and Al 2001	$k_x = \frac{0.01 \psi}{8 M_*} \left(\frac{W}{H}\right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{U}{U^*}\right)^2$	Cours d'eau naturels ou uniforme W/H > 10.
Dong and Al 2002	$k_x = -\left(\frac{I}{M_*}\right) \left(\frac{U}{U^*}\right)^2 \left(\frac{W}{H}\right)^2 U^* H$	Canaux naturel W<200
Kashfepour and Falconer 2002	$k_x = 10.612 HU \left(\frac{U}{U^*}\right)$	Canaux naturel W/H > 50

Avec :

U : Vitesse du cours d'eau (m/s) ;

U* : Vitesse de cisaillement (m/s) ;

W : Largeur (m) ;

H : hauteur d'eau ;

R_H : Rayon hydraulique ;

S : Pente (m/m) ;

b : Fonction de y ;

γ : Coordonnées cartésiennes dans la direction latérale ;

U' : déviation par rapport à la vitesse moyenne ;

E_z : coefficient de dispersion latéral ;

Ψ : coefficient égal à l'unité pour des cours d'eau uniformes et droits , et égal à 15 pour des cours d'eau naturels.

M^* : coefficient qui caractérise la dispersion transversale, il s'écrit :

$$M_* = 0.145 + \frac{1}{3520} \left(\frac{U}{U^*} \right) \left(\frac{W}{H} \right)^{1.38}$$

Certaines de ces formules sont plus adaptées que d'autres pour estimer le coefficient de dispersion longitudinale parce qu'elles prennent en compte les paramètres essentiels pour décrire le phénomène de dispersion d'un polluant. Le bon choix des variables à utiliser se reflète directement sur la précision de la prédiction.

Dans notre cas, nous avons recours aux formules empiriques.

La condition globale pour le calcul du coefficient de dispersion longitudinal, K_x (m²/s) selon **GRAF**

W. H., ALTINAKAR M.S, 2008 : $140 < \frac{K_x}{u_* h} < 500$

Tel que : u_* : vitesse de frottement.

h : hauteur de l'eau.

VIII.5. Etude de la diffusion du phosphore total, de la DBO₅ et de la DCO :

Nous concèderons l'injection, d'une concentration C_0 , est surfacique et continu.

VIII.5.1. Etude de la diffusion du phosphore total :

La propagation du Phosphore total est un problème de convection-diffusion. Pour une telle situation, nous utilisons l'équation (VIII.2) pour simuler la répartition de la concentration, $C(x, t)$, pour des temps allant d'une demi-heure à 24 heures, en admettant différentes valeurs pour la distance, x , allant du point de prélèvement jusqu'à l'entrée de la retenue du barrage.

Les caractéristiques de forme des sections des Oueds ainsi que les caractéristiques d'écoulement et celle de l'élément analysé en question (concentration du polluant), sont résumées pour chaque station, dans le tableau suivant :

Tableau VIII.2 : Caractéristiques forme de la section, d'écoulement et de l'élément analysé au niveau de des stations de prélèvement.

Stations	Mouillah	O. Ouardeffou
C (mg/l)	30.75	37.90
U (m/s)	0.357	0.051
Q (m³/s)	0.976	0.046
H (m)	0.341	0.183
B (m)	8.00	5.00
S (m²)	2.728	0.915
K_x (m²/s)	4.33	0.895

Les caractéristiques résumées dans le tableau ci-dessus correspondent à la date de prélèvement du mois de Septembre 2008. Cette date est choisie en raison des quantités plus ou moins importantes du P_{tot}.

a) La propagation du P_{TOT} à la St. du Mouillah Amont :

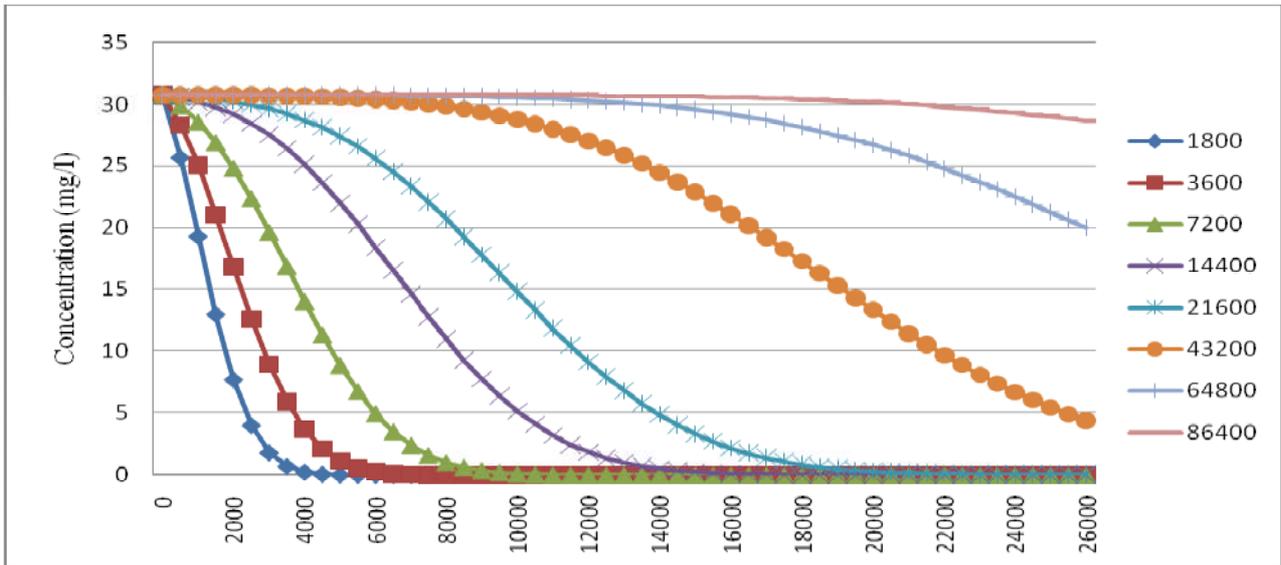
Nous avons calculé la variation du Phosphore total à des intervalles de temps variable, sur des différentes distances d'écoulement, à partir de la station de prélèvement de Mouillah Amont, jusqu'au barrage Hammam Bouhrara.

Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau VIII.3 : Evolution spatio-temporelle du P_{TOT} à Mouillah Amont

ΔC	$X(m)$											
	0.0	500	1000	1500	2000	4000	6000	8000	10000	15000	20000	27270
1800	30.75	25.63	19.31	12.97	7.69	0.23	0.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3600	30.75	28.32	25.01	21.05	16.79	3.65	0.26	0.006	0.00	0.00	0.00	0.00
7200	30.75	29.85	28.56	26.87	24.77	14.01	4.93	1.01	0.12	0.00	0.00	0.00
14400	30.75	30.53	30.21	29.77	29.19	25.10	18.42	10.97	5.13	0.24	0.003	0.00
21600	30.75	30.68	30.58	30.44	30.24	28.73	25.59	20.70	14.78	3.27	0.26	0.005
43200	30.75	30.74	30.74	30.73	30.72	30.62	30.37	29.81	28.75	22.83	13.31	4.32
64800	30.75	30.74	30.74	30.74	30.74	30.74	30.71	30.66	30.55	29.60	26.69	20.02
86400	30.75	30.74	30.74	30.74	30.74	30.74	30.74	30.74	30.73	30.62	30.17	28.68

Nous avons, par la suite, pour chaque instant, t, représenté les résultats de la diffusion-convection par les courbes de la figure suivantes :



Graph VIII.1 : Evolution spatio-temporelle du P_{TOT} à partir de Mouillah Amont

Nous remarquons que la réduction de la concentration est inversement proportionnelle au temps. Durant les faibles instants, celle-ci est rapidement réduite, par contre sa diffusion dans le milieu est faible lors des temps plus importants.

Ainsi, nous remarquons pour les durées d'une demi-heure, une heure et deux heures, la valeur de la concentration s'annule respectivement, à 4 km, 6 km et 9 km (avant la station thermique de Chigueur) et juste avant la confluence entre Oued Mouillah et Oued Ouardeffou.

Après douze (12) heures, la valeur du P_{TOT} enregistrée à l'embouchure de la retenue, est inférieure à la norme, mais elle permet la prolifération d'algues bleues. Au-delà de cette durée, le phosphore dépasse largement la norme.

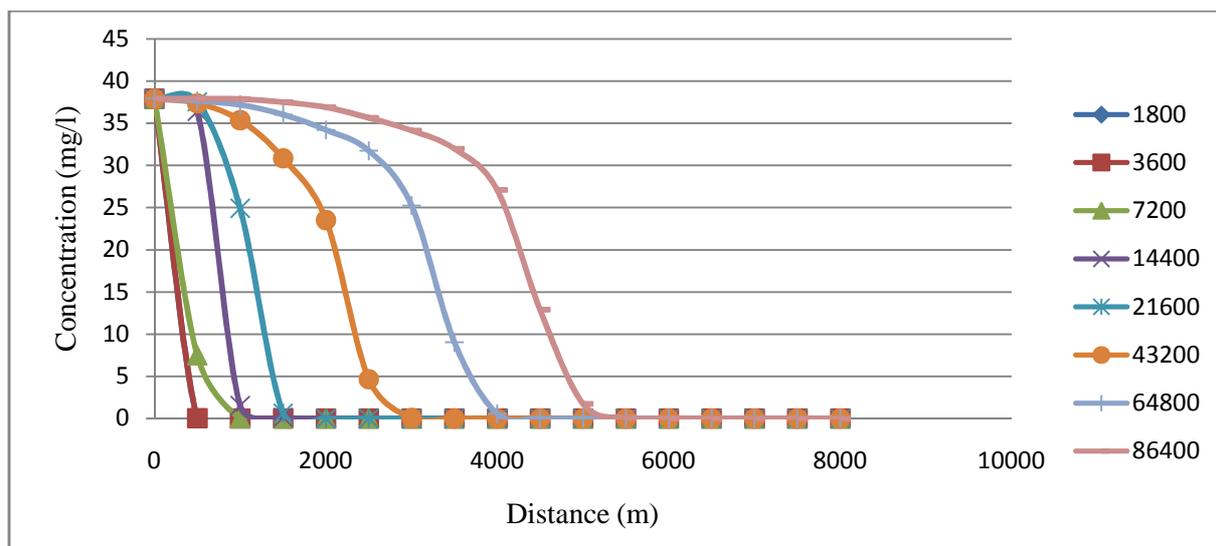
b) La propagation du P_{TOT} à la St. O. Ouardeffou :

Les résultats de calcul de la diffusion du P_{tot} , à partir de la st. O. Ouardeffou jusqu'au Hammam Boughrara, sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau (VIII.4) : Evolution spatio-temporelle du P_{TOT} à Ouardeffou

$\Delta C(x,t)$	X(m)							
	0.00	500	1000	1500	2000	4000	6000	8000
1800	37.9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3600	37.9	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7200	37.9	7.51	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
14400	37.9	36.39	1.55	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00
21600	37.9	37.55	24.92	0.63	0.00	0.00	0.00	0.00
43200	37.9	37.35	35.36	30.85	23.52	0.00	0.00	0.00
64800	37.9	37.64	37.17	36.00	34.22	0.55	0.00	0.00
86400	37.9	37.90	37.85	37.49	36.13	22.55	0.00	0.00

Les résultats de la diffusion-convection, résumés dans le tableau ci-dessus, sont représentés par les courbes de la figure suivante :



Grphe VIII.2 : Evolution spatio-temporelle du Ptot à partir d’O. Ouardeffou

Nous remarquons que la diffusion de la concentration met plus de temps. Par contre, avec des faibles instants la concentration s’annule après de courtes distances. Ceci s’explique, soit par une eutrophisation rapide, soit que le temps de parcours étant trop court pour de telles distances.

D’ailleurs la deuxième hypothèse, Est justifiée par l’allure des différentes courbes représentées dans la figure.

Toutefois, nous remarquons qu’après 24heurs, il y a une réduction totale du P_{tot}, juste après la confluence entre O. Ouardeffou et O. Mouillah. Cause directe des conditions d’écoulement, dont l’influence est très importante dans le phénomène de propagation.

c) Variation temporelle du P_{TOT} à l’entrée de la cuvette :

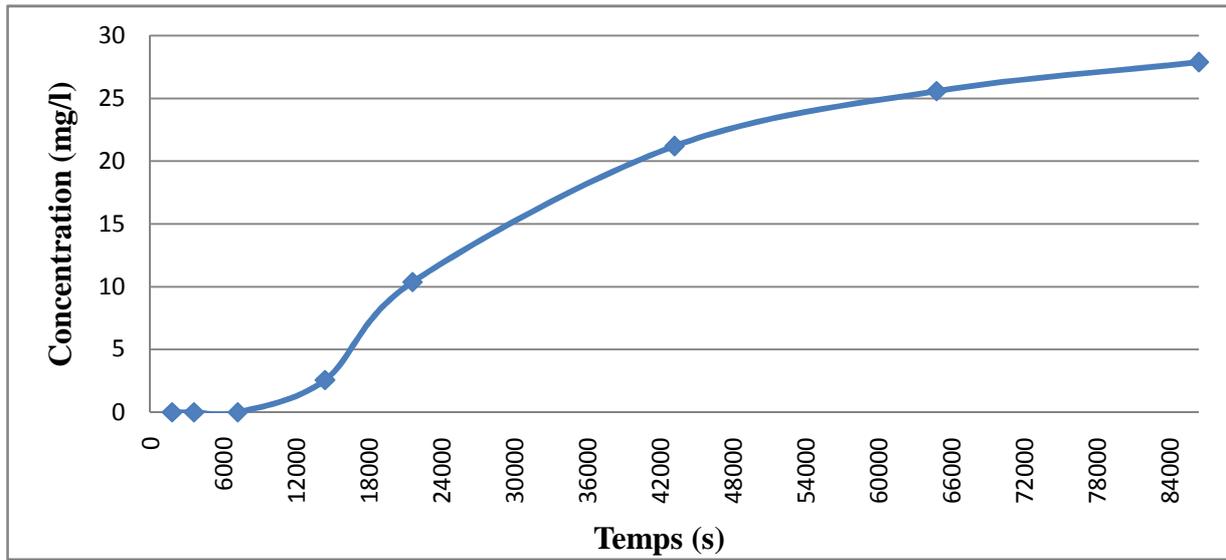
La somme en différentes périodes, des concentrations atteignant le barrage Hammam Boughrara, après leur parcours de différentes distances à partir de leurs stations de prélèvement, correspond à la variation temporelle de la diffusion de cet élément à l’entrée de la cuvette du barrage

Les concentrations transitant le barrage Hammam Boughrara à partir des différentes stations, en chaque temps, sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau VIII.5 : Variation temporelle du P_{TOT} A l’entrée du Barrage Hammam Boughrara

T(s)	Concentrations transitées à partir		Barrage H. Boughrara
	Mouillah Amont	Ouardeffou	
1800	0.00	0.00	0.00
3600	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.00	0.00
14400	2.56	0.00	2.56
21600	10.37	0.00	10.37
43200	21.18	0.00	21.18
64800	25.57	0.00	25.57
86400	27.87	0.00	27.87

L'évolution de la variation des concentrations de différentes périodes, transitées au Barrage Hammam Bouhrara, est représentée par la courbe suivante :



Graphe VIII.3: Variation temporelle du P_{TOT} A l'entrée du Barrage Hammam Bouhrara

Nous remarquons que la concentration du phosphore total à l'entrée de la cuvette est proportionnelle à la durée de diffusion et est importante avec l'augmentation du temps. Il est clair que la concentration met plus de temps pour dériver à la retenue, indépendamment des conditions d'écoulement. Ainsi, lorsque le débit est important, le phosphore total atteint plus rapidement la cuvette. Dans le cas contraire, il se peut que l'élément étudié se dégrade avant même d'aboutir à la cuvette (cas de la concentration transitant à partir de la station de Legfaf).

VIII.5.2. Etude de la propagation de la Demande Biochimique en Oxygène :

Les différents paramètres permettant l'étude de la propagation de la DBO₅ dans le milieu du bassin versant de l'Oued Mouillah, sont résumés dans le tableau suivant

Tableau VIII.6: Paramètres de l'étude de la propagation de la DBO₅ au niveau des stations

Station	Mouillah Amont	O. Ouardeffou
C (mg/l)	86.7	268.1
U (m/s)	0.381	0.103
Q (m³/s)	1.133	0.087
H (m)	0.372	0.15
B (m)	8.00	5.00
S (m²)	2.976	0.85
K_x (m²/s)	4.98	1.69

Les caractéristiques résumées dans le tableau ci-dessus correspondent à la date de prélèvement du mois d'Avril 2008. Cette date était choisie en raison des quantités plus ou moins importantes de la DBO₅.

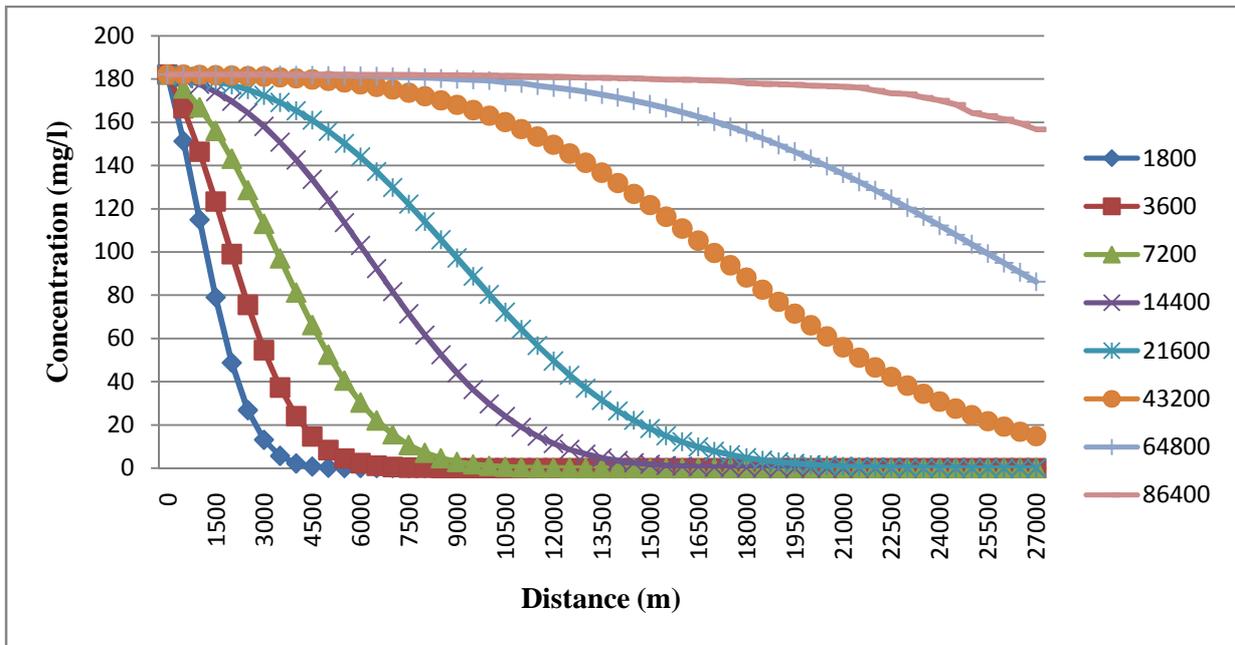
a) La dégradation de la DBO₅ a partir de la St. Mouillah Amont :

L'estimation de la propagation de la DBO₅ à des différents intervalles de temps, sur des différentes distances d'écoulement, jusqu'au barrage Hammam Boughrara, est résumée dans le tableau ci-dessous :

Tableau VIII.7: Evolution spatio-temporelle de la DBO₅ à Mouillah Amont

ΔC	X(m)											
T(s)	0.0	500	1000	1500	2000	4000	6000	8000	10000	15000	20000	27270
1800	86.7	72.03	54.73	37.62	23.20	1.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3600	86.7	79.25	69.71	58.71	47.14	11.43	1.07	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00
7200	86.7	83.61	79.48	74.29	68.15	38.66	14.45	3.38	0.48	0.00	0.00	0.00
14400	86.7	85.79	84.54	82.90	80.83	67.91	49.04	29.32	14.14	0.82	0.01	0.00
21600	86.7	86.35	85.88	85.24	84.41	78.74	68.56	54.29	38.26	8.71	0.78	0.01
43200	86.7	86.67	86.62	86.56	86.48	85.88	84.52	81.93	77.62	57.95	31.48	7.06
64800	86.7	86.70	86.69	86.68	86.67	86.59	86.40	85.99	85.39	80.19	68.18	41.11
86400	86.7	86.70	86.70	86.70	86.70	86.68	86.66	86.59	86.46	85.74	84.26	74.63

Nous avons représenté l'évolution de la dégradation de la DBO₅, en chaque instant, par les courbes de la figure suivante :



Graph VIII.4: Dégradation spatiale en chaque instant de la DBO₅ à Mouillah

Nous remarquons que pour une même distance, la DBO₅ est plus faible lorsque le temps qui lui est associé est faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que la propagation de la DBO₅ se fait lentement ; de plus, pour des courtes durées, la phase de latence bactériologique est dépassée et les micro-organismes ont déjà atteint la phase de croissance rapide, d'où la dégradation extensive de la matière organique. Cette dégradation tend asymétriquement vers la valeur nulle tant que la distance est importante. Toutefois, il faut beaucoup plus de distance pour atteindre une DBO₅ nulle, lorsque le temps est important.

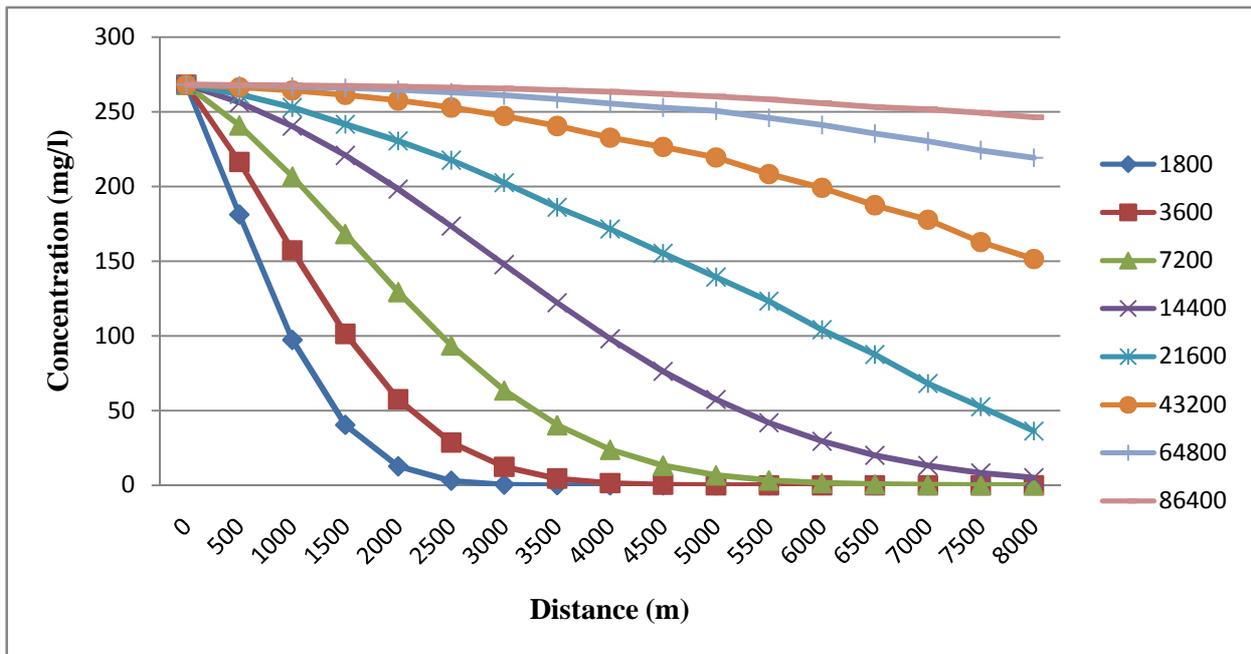
b) la dégradation de la DBO₅ à partir de la St. Oued Ouardeffou :

L'évolution spatio-temporelle de la DBO₅ à partir de la station d'Ouardeffou, pour des intervalles de temps variables et différentes distances, est résumée dans le tableau ci-dessous.

Tableau VIII.8: Evolution spatio-temporelle de La DBO₅ Ouardeffou

$\Delta C(x,t)$	X(m)							
T(s)	0	500	1000	1500	2000	4000	6000	8000
1800	268.10	181.21	97.31	40.40	12.74	0.01	0.00	0.00
3600	268.10	216.46	157.19	101.39	57.54	1.48	0.00	0.00
7200	268.10	240.91	206.65	168.22	129.33	23.81	1.42	0.03
14400	268.10	256.17	240.33	220.82	198.21	98.02	29.32	5.03
21600	268.10	261.61	252.84	241.65	230.47	171.60	104.11	36.27
43200	268.10	266.49	264.26	261.31	257.54	232.62	199.11	151.44
64800	268.10	267.58	266.85	265.88	264.61	255.53	241.17	219.13
86400	268.10	267.91	267.64	267.28	266.81	263.29	255.74	246.20

Nous avons représenté l'évolution de la dégradation de la DBO₅, en chaque instant, par les courbes de la figure suivante :



Graph VIII.5: Dégradation spatial en chaque instant de la DBO₅ à partir d'Ouardeffou

Nous remarquons que sur des différentes distances, lorsque la durée attribuée est importante, la DBO₅, trop élevée en raison des concentrations très importantes de l'amont, tend à se rapprocher pour atteindre la concentration maximale.

Toutefois, la propagation de la DBO₅ est lente à des courtes durées. Ceci est la cause directe de la dégradation rapide des bactéries, notamment celles de type anaérobie (hétérotrophes). Durant les faibles durées, la dégradation tend rapidement vers des valeurs zéro.

c) Variation temporelle de la DBO₅ à l'entrée de la cuvette :

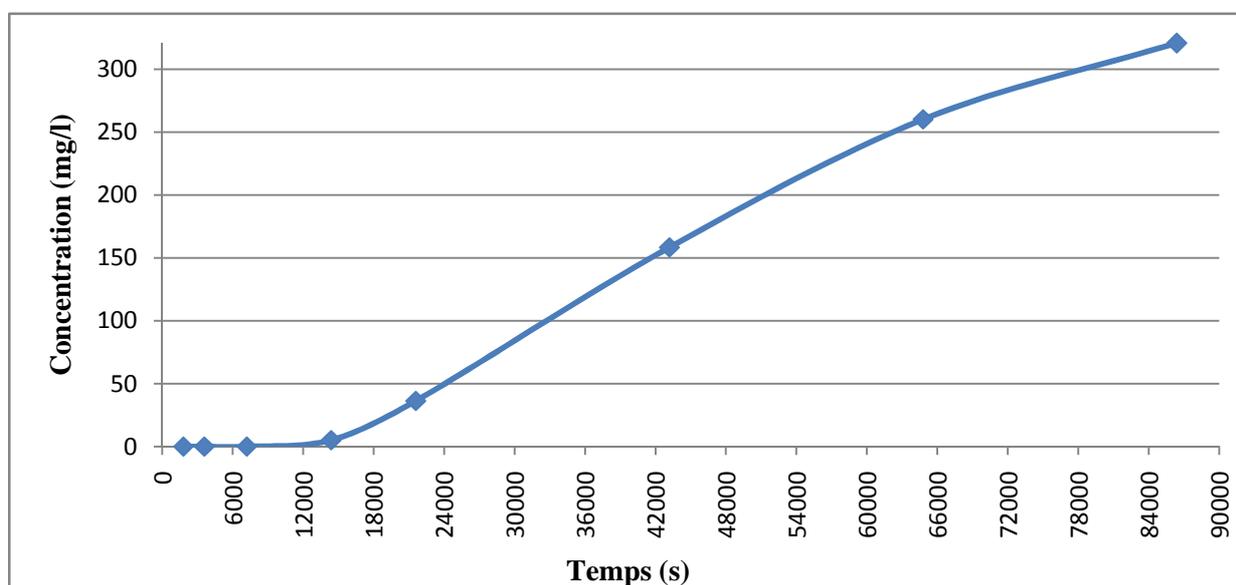
La somme en différentes périodes, des concentrations atteignant le barrage Hammam Boughrara, après leur parcours des différentes distances, à partir de leur station de prélèvement, correspond à la variation temporelle de la propagation de la DBO₅ à l'entrée de la cuvette de barrage.

Les concentrations transitant au barrage Hammam Boughrara à partir des différentes stations, en chaque instant, sont résumées dans le tableau suivant : Concentrations transitées à partir de chaque station.

Tableau VIII.9: Variation temporelle de la DBO₅ à l'entrée du barrage

T(s)	Mouillah amont	Ouardeffou	Barrage Hammam Boughrara
1800	0.00	0.00	0.00
3600	0.00	0.00	0.00
7200	0.00	0.03	0.03
14400	0.00	5.03	5.03
21600	0.01	36.27	36.28
43200	7.06	151.44	158.5
64800	41.11	219.13	260.24
86400	74.63	246.2	320.83

L'évolution de la variation des concentrations en différentes périodes, transitant au barrage Hammam Boughrara, est représentée par la courbe suivante :



Graphé VIII.6 : Variation temporelle de la DBO₅ à l'entrée de La Cuvette

Nous remarquons que la concentration de la DBO₅ à l'entrée de la cuvette est exponentiellement proportionnelle à la durée de dégradation. La dégradation est très faible avec des temps importants, pourtant même avec les faibles instants, la valeur de la DBO₅ est très importante et dépasse de loin la norme de 30 mg/l, fixée par l'Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S).

VIII.5.3. Etude de la propagation de la Demande Chimique en Oxygène :

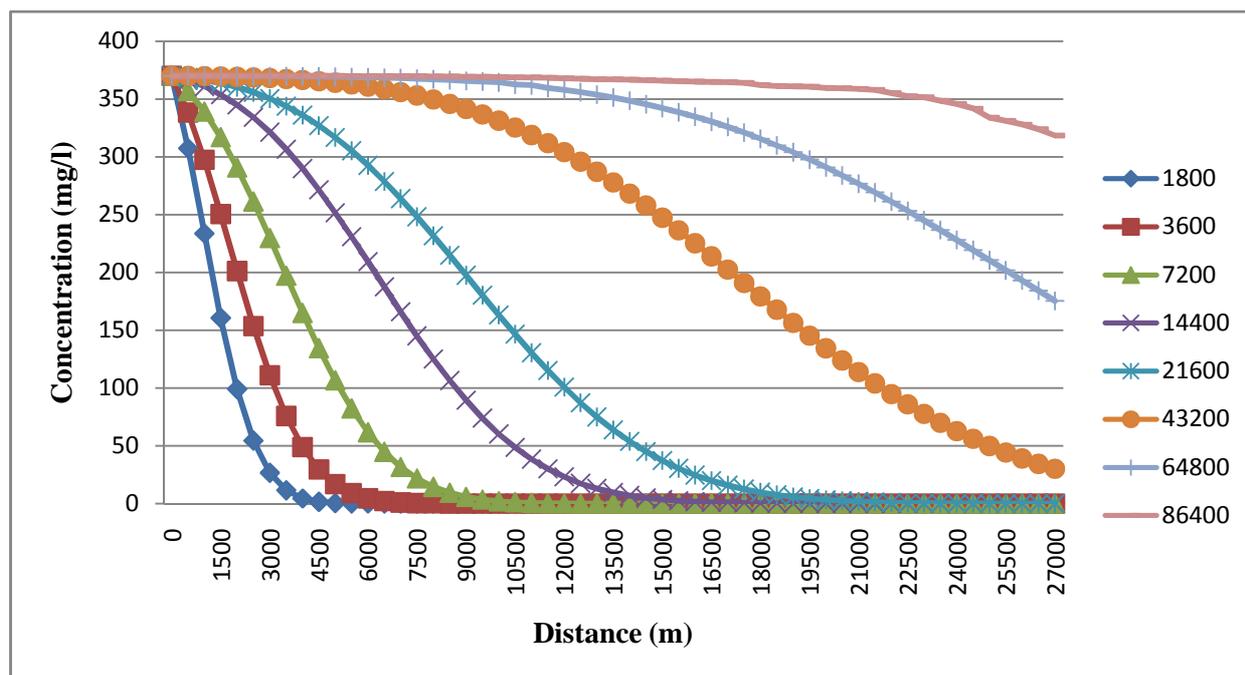
a) La dégradation de la DCO à partir de la St. Mouillah Amont :

Les résultats de simulation de la propagation de la DCO à des différents intervalles de temps, sur des différentes distances d'écoulement, jusqu'au barrage Hammam Boughrara, est donné dans le tableau ci-dessous :

Tableau VIII.10: Evolution spatio-temporelle de la DCO à Mouillah Amont

ΔC	X(m)											
	0.0	500	1000	1500	2000	4000	6000	8000	10000	15000	20000	27270
1800	370	307.41	233.56	160.55	99.02	4.36	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
3600	370	338.21	297.49	250.54	201.17	48.79	4.56	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00
7200	370	356.83	339.17	317.04	290.86	164.97	61.65	14.41	2.06	0.00	0.00	0.00
14400	370	366.12	360.78	353.77	344.93	289.81	209.29	125.1	60.33	3.51	0.05	0.00
21600	370	368.53	366.48	363.75	360.23	336.03	292.57	231.6	163.26	37.18	3.34	0.03
43200	370	369.87	369.68	369.42	369.08	366.49	360.70	349.6	331.25	247.30	134.36	30.11
64800	370	369.98	369.96	369.93	369.88	369.54	368.72	366.9	364.39	342.23	290.94	175.45
86400	370	370.00	369.99	369.99	369.98	369.93	369.81	369.5	368.97	365.91	359.59	318.48

La figure ci-dessous représente l'évolution de la dégradation de la DCO, en chaque instant.



Graph VIII.7: Dégradation spatiale en chaque instant de la DCO à partir de Mouillah amont

Nous remarquons que pour une même distance, la DCO est plus faible lorsque le temps qui lui est associé est faible. Ceci peut s'expliquer par le fait que la propagation de la DCO se fait lentement. Il faut beaucoup plus de distance pour atteindre une DCO nulle, lorsque le temps est important.

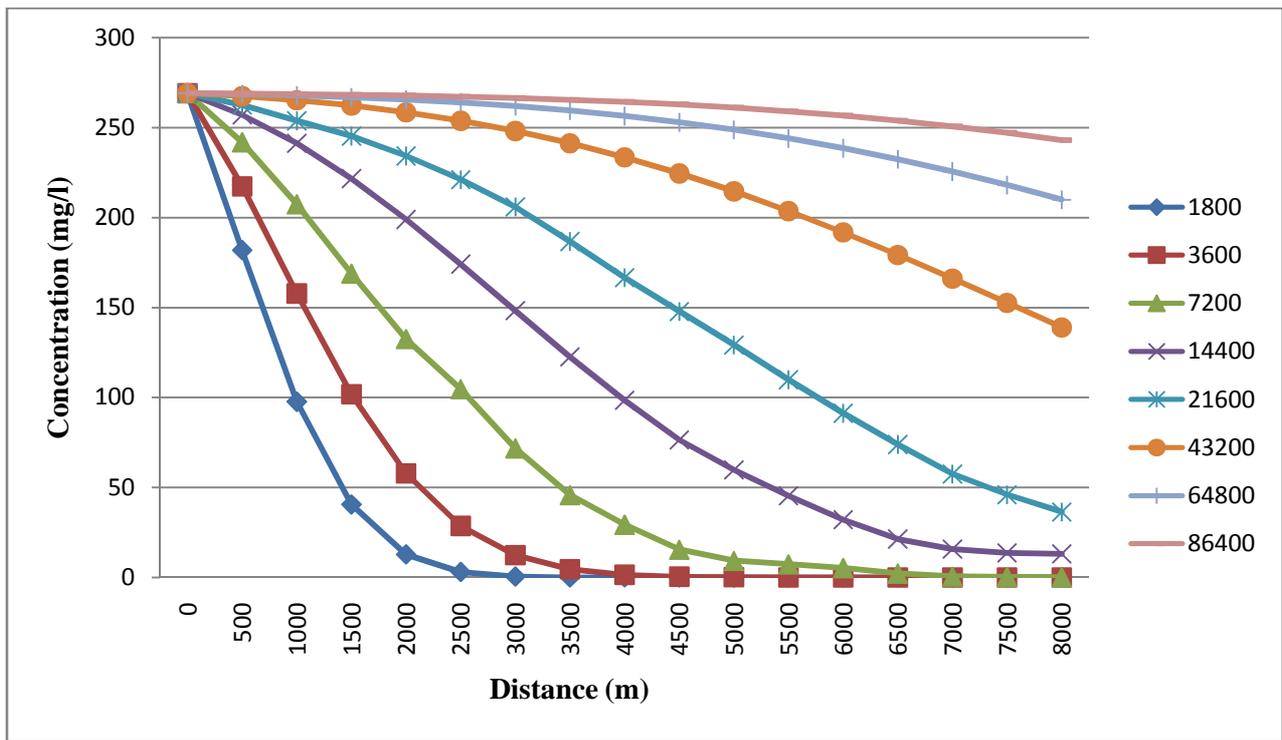
b) la dégradation de la DCO à partir de la St. Oued Ouardeffou :

Résumant l'évolution spatio-temporelle de la DCO à partir de la Ouardeffou, pour des intervalles de temps variables et différentes distances, dans le tableau suivant.

Tableau VIII.11: Evolution spatio-temporelle de La DCO Ouardeffou

$\Delta C(x,t)$	X(m)							
T(s)	0.0	500	1000	1500	2000	4000	6000	8000
1800	269.00	181.82	97.64	40.54	12.78	0.01	0.00	0.00
3600	269.00	217.19	157.72	101.73	57.73	1.48	0.00	0.00
7200	269.00	241.72	207.34	168.79	129.77	23.89	1.43	0.03
14400	269.00	257.03	241.14	221.56	198.88	98.35	29.42	5.05
21600	269.00	262.49	253.69	242.46	228.82	155.75	49.43	28.33
43200	269.00	267.38	265.15	262.19	258.41	233.40	191.71	138.94
64800	269.00	268.48	267.75	266.77	265.49	256.38	238.48	209.91
86400	269.00	268.81	268.54	268.18	267.71	264.17	256.60	242.99

Ces résultats sont représentés par les courbes de la figure suivante:



Graph VIII.8: Dégradation spatial en chaque instant de la DCO à partir d'Ouardeffou

Nous remarquons que sur des différentes distances, lorsque la durée attribuée est importante, la dégradation de la DCO, est faible c'est-à-dire les valeurs de la DCO sont élevées.

Notant ainsi, en comparaison les résultats d'analyse de la station du barrage Hammam Boughrara et ceux obtenus par la simulation, que les valeurs de ces derniers sont trop élevées, cela peut se justifier par l'existence d'une épuration naturelle au niveau du Barrage.

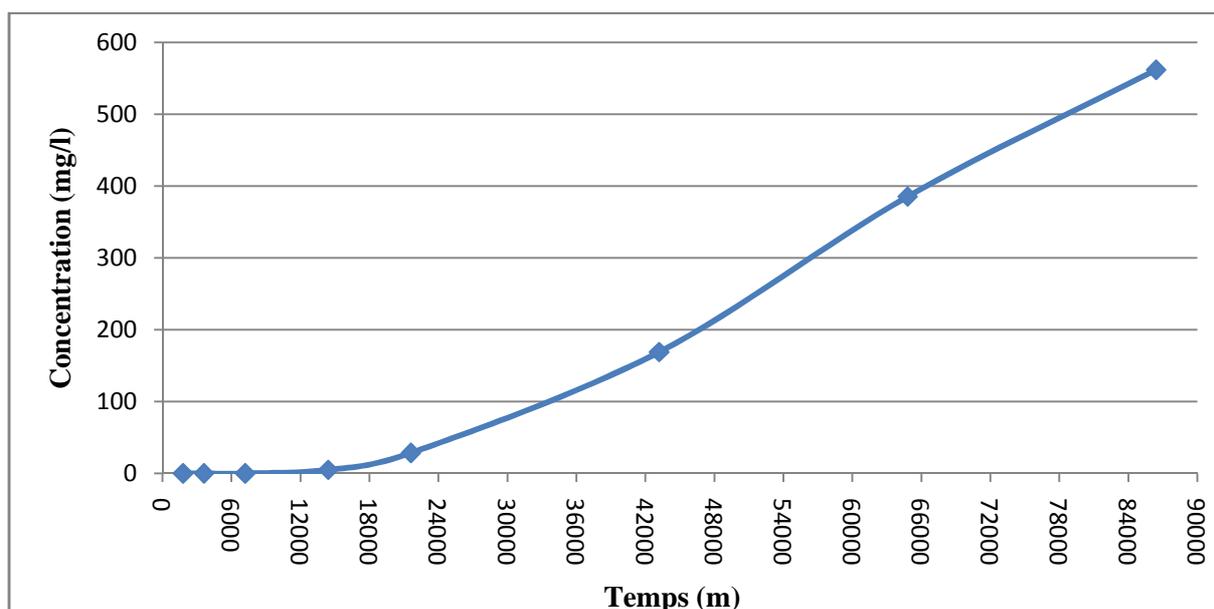
c) Variation temporelle du la DCO à l'entrée de la cuvette :

Les concentrations de la DCO transitant le barrage Hammam Bouhrara à partir des différentes stations, en chaque temps, sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau VIII.12: Variation temporelle du la DCO à l'entrée du barrage

T(s)	Mouillah amont	Ouardeffou	Barrage Hammam Bouhrara
1800	0.00	0.00	0
3600	0.00	0.00	0
7200	0.00	0.03	0.03
14400	0.00	5.05	5.05
21600	0.03	28.33	28.36
43200	30.11	138.94	169.05
64800	175.45	209.91	385.36
86400	318.48	242.99	561.47

La courbe représentée sur la figure (VIII.9) donne l'évolution de la variation des concentrations en différentes périodes, transitant au barrage Hammam Bouhrara :



Graphique VIII.9 : Variation temporelle du la DCO à l'entrée de La Cuvette

Nous remarquons que la concentration de la DCO à l'entrée de la cuvette est exponentiellement proportionnelle à la durée de dégradation. Pour des durées importantes les valeurs de la DCO dépassent la norme de 40 mg/l. Ainsi, vu l'importance des rejets le pouvoir épuratoire du bassin versant de l'Oued Mouillah est faible, sans conséquence sur la dégradation de la DCO, d'autant plus que le processus d'auto-épuration est de type anaérobie dont le rendement est plus inférieur à celui de l'auto-épuration aérobie.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Par ce travail, nous avons procédé à l'étude du transport des polluants rejetés dans l'oued mouillah et ses affluents, par la méthode de l'analyse spatio-temporelle.

Le transport des polluants dans un réseau hydrographique dépend de plusieurs facteurs, en l'occurrence, l'hydrodynamique du cours d'eau, sa forme, sa géologie et les caractéristiques physiques des polluants ainsi que les caractéristiques biologiques et chimiques des eaux.

Lors du transport des polluants, plusieurs autres phénomènes peuvent surgir, tel que, le transfert, les réactions chimiques, la décantation, la re-suspension, l'eutrophisation...etc., rendant le phénomène beaucoup plus complexe.

L'analyse spatio-temporelle s'est basée sur une banque de données des rejets groupant 27 éléments analysés à partir de 09 points de prélèvement dans le bassin versant de l'oued mouillah et à l'aval du barrage de hammam boughrara. La critique de la qualité des données d'analyse physico-chimiques des rejets, nous a permis de penser que les éléments étudiés sont fiables au vu de la quantité et la qualité des paramètres analysés, reflétant l'état des lieux du bassin versant.

Aussi une analyse structurale des différentes substances chimiques était nécessaire afin de mettre en évidence les groupes de paramètres ayant une même tendance, cependant, et à cause de la contrainte de temps et de moyens, il a été procédé dans la présente étude à un choix objectif des paramètres de pollution, dépendant :

- Du type de famille de pollution à laquelle appartenaient les éléments des analyses physico-chimiques disponibles
- De la similitude entre paramètres
- De leurs concentrations
- De leurs effets nuisibles sur le milieu.

Nous avons, donc, basé notre étude sur 12 éléments ; les débits des cours d'eau, la température du milieu, la DBO₅, la DCO, les MES, le PH, les bicarbonates (HCO₃), le phosphore total (P_{Total}), le sodium (Na²⁺), l'oxyde de soufre (SO₄²⁻), les nitrates (NO₃⁻), et l'ammonium (NH₄).

A souligner, toutefois, que sur les 09 points de prélèvements choisis, nous avons écarté les 05 points de prélèvements situés à la source de rejet, à savoir, les unités industrielles, du fait que le mélange total des rejets de ces industries est analysé au niveau du point de prélèvement de Oued Ouardeffou à l'aval et le point de prélèvement de la station d'épuration de Maghnia.

L'évolution temporelle des polluants étudiés montre que les éléments analysés à l'amont du barrage Hammam Boughrara, dépassent de loin les normes de rejets, montrant nettement l'existence d'une pollution nuisible, essentiellement composée d'éléments organiques et d'éléments à base d'azote et de phosphore auxquels s'ajoutent les matières en suspension. L'importance de cette pollution est surtout enregistrée à Mouillah amont, à la frontière Algéro-marocaine et à l'oued Ouedeffou, à quelques centaine de mètres, à l'aval des unités industrielles de la ville de Maghnia. Cet état de fait met en évidence, la source la plus importante de cette pollution, à savoir, les rejets urbains et industriels de la ville marocaine de Oujda et ceux de la zone industrielle de la ville de Maghnia

Conclusion générale

(charriés par les Oued El Abbes et Ouardeffou) risquent de polluer encore plus le barrage hammam boughrara , en raison de leur importance d'un coté, et des courts temps de réponses des polluants, dus aux courtes distances jusqu'au site en question, d'un autre coté.

Au niveau du barrage, les analyses montrent que la pollution enregistrée est largement réduite, probablement suite à une épuration naturelle de parcours d'une part, et au phénomène épuratoire naturel et biologique à l'intérieure de la cuvette du barrage, d'autre part. Néanmoins, la concentration des différents polluants augmente en profondeur, à cause du cumul des différents polluants dans la vase du barrage, avec le risque de re-suspension dans les eaux de la cuvette, suite au brassage par les eaux de crues.

L'analyse des eaux à l'aval du barrage justifie la réduction et l'épuration des paramètres de pollution au niveau de la retenue de l'ouvrage.

L'analyse spatiale à différentes périodes montre bien une auto-élimination naturelle et une dégradation progressive des différents polluants dans les cours d'eau, cette auto-épuration est beaucoup plus favorisée, en des laps de temps plus au moins réduits, avec l'augmentation du débit, notamment en période de crues, surtout lorsque le lit d'oued est important.

Ainsi, la diffusion et l'épuration des éléments de pollution à travers les cours d'eau du bassin versant de l'oued mouillah, dépend des paramètres hydrodynamiques d'écoulement (périodes de crues ou d'étiage), de la forme des Oueds, du temps de séjours et des caractéristiques des éléments rejetés. Pour confirmer ces résultats, nous avons utilisé un modèle mathématique permettant l'analyse spatio-temporelle, sur trois éléments importants de la pollution, à savoir le phosphore total (P_{total}), la DCO et la DBO_5 . Ce modèle s'appuyant sur des simplifications nécessaires et hypothèse de base, a permis une analyse spatio-temporelle des éléments, par diffusion- convection (pour le P_{total}) et par dégradation (pour la DCO et la DBO_5).

Les résultats confirment que la diffusion du phosphore, comme la dégradation de la DBO_5 et la DCO dépendent essentiellement des conditions d'écoulement (débit, vitesse, frottement), des caractéristiques au cours d'eau (morphologie, section transversale, longueur), des caractéristiques des polluants rejetés (diffusivité, coefficient de réaction, masse) et des temps de séjours (ou du transport).

Nous avons remarqué que la propagation du P_{total} est, pour un même débit, importante sur des courtes distances avec des faibles durées de transport ; par contre, avec l'augmentation de la distance et la durée, la concentration de cet élément tend vers la valeur de la concentration initiale. Quant à la dégradation de la DBO_5 , pour un même volume d'eau écoulé, elle est importante pour des courtes durées de transport et des faibles distances. Avec l'augmentation de la distance parcourue, la concentration tend vers la valeur zéro, c.à.d. vers la dégradation totale de l'élément. Par ailleurs, après d'importances durées de transport et de distance, la dégradation est faible et est proche de la concentration initiale.

Enfin, la complexité du problème de pollution du bassin versant de l'oued mouillah et les conséquences engendrées sur le milieu en générale et sur le barrage de Hammam Boughrara en particulier, nécessitent des approches par étapes allant du court, moyen et long terme pour la protection de cette ressource hydrique par :

Conclusion générale

- la neutralisation de la pollution locale (ville de Maghnia)
- la prise en considération de la pollution en provenance du Maroc
- Maîtriser la diffusion et le transport de la pollution le long du cours d'eau en simulant par des modèles mathématiques les différents paramètres entrant en jeu dans la pollution de ce bassin versant de l'oued Mouillah

On propose ainsi comme recommandations :

- Pousser les entreprises industrielles à fournir davantage d'efforts pour réduire la pollution.
- Essayer de réduire la pollution à sa source, en préconisant à chaque unité son propre traitement avec l'apprentissage d'une meilleure gestion, tout en maîtrisant les méthodes de récupération (recyclage) ;
- Encourager la création d'un laboratoire inter- entreprise pour l'auto surveillance et le suivi du fonctionnement des installations d'épuration.
- L'unification des rejets domestiques de la ville de Maghnia et les diriger vers la station d'épuration notamment la partie sud de la ville ;
- De concevoir une station de compostage (ou un centre d'enfouissement technique) pour le traitement contrôlé des déchets solides ménagères ;
- Une approche régionale du problème de pollution transfrontalière devrait être rapidement engagée en collaboration avec les institutions internationales pour identifier les solutions possibles visant la réduction de la pollution en provenance du Maroc sur le tronçon de l'oued Mouillah amont plus particulièrement en saison d'étiage.
- En attendant l'approche précitée, il faut d'essayer de trouver des solutions aux rejets charriés par l'oued Mouillah à partir de la frontière Algéro-marocaine, par l'augmentation du temps de séjour de la masse d'eau écoulée dans des bassins de neutralisation.

Bibliographie

Bibliographie

- 1- **Abderrazak BOUANANI, 2006**, « *Hydrologie, transport solide et modélisation. Etude de quelques sous bassins de la Tafna (NW – Algérie)* Thèse Pour L'obtention Du Titre De Doctorat D'état : Université ABOU BEKR BELKAID Tlemcen.
- 2-**Abdelkader KHALDI, 2005** « *Impacts de la sécheresse sur le régime des écoulements souterrains dans les massifs calcaires de l'Ouest Algérien " Monts de Tlemcen - Saida" »*, Thèse pour l'obtention du diplôme de doctorat d'état : université d'Oran.
- 3- **Agence de Bassin Hydrographique Oranie-Chott Chergui ,2009** « *Plan directeur d'aménagement des ressources en eau* » VERSION FINALE- Décembre 2009 » Coopération technique Algéro-Allemande (GTZ). Direction des Etudes et des Aménagements Hydrauliques ABH OCC.
- 4- **Agence De Bassin Hydrographique Oranie - Chott Chergui, Décembre 2006**, « *Cadastre Hydraulique Bassin Tafna Mission VI document de synthèse*».
- 5- **I. ABDOULAYE ARZAKE, 2007** , « *Simulation numérique de la dispersion d'un polluant actif dans un canal par le schéma explicite de MAC CORMACK* » , Mémoire de magister » Promotion : 2007. Ecole nationale polytechnique, département d'hydraulique, ENP
- 6-**A.N.R.H, 2009**, « *données hydrologiques du bassin versant et analyses physico-chimiques* »
- 7 - **BELHADJ MOHAMED ZINE,2006**, « *Etude de la pollution du Barrage de ZIT EMBA Commune de Bekkouche Lakhdar Wilaya de Skikda*», Mémoire de Magister, Université du Colonel - El Hadj Lakhdar -Batna-
- 8- **BENADDA L., 2004** « *Etude de la diffusion de la pollution dans le milieu hydrique du bassin versant de l'Oued Mouillah (Haute Tafna)* » , Thèse de Magister, UAB-Tlemcen.
- 9- **BENADDA L., FELLAH A.C. & ERRIH M., 2005**, « *Simulation mathématique de la variation spatiotemporelle de la pollution des eaux du bassin versant de l'oued mouillah (Haute Tafna)* ».
- 10- **B.LEMIERE et C.GUERN, 1999**, « *les Caractéristiques physico-chimiques de quelques polluants organiques* ». Guide sur le comportement des polluants.
- 11- **BUIL, N., (1989)**. « *Modélisation tridimensionnelle du transport de polluant dans un écoulement à surface libre*». Thèse Lyon I. 299 pages.
- 12- **BERNHARD, H. S., 2004**. « *Simplification in Longitudinal Transport Modeling: Case of Instantaneous Slug Releases*». Journal of Hydrologic Engineering, Volume 9, N°4, pp 319-324.
- 13- **CHIALI, 22 Mars 2010**, « *Influences des apports des oueds Mouillah et Tafna sur la qualité du barrage Boughrara*», Agence nationale des ressources Hydrauliques.
- 14- **CAUX KOFAYE DIOUF**, « *Détermination des coefficients de dispersion des solutés dans les sols de Donaye et du Ngalenka : expérimentation et modélisation* » Rapport de stage, Institut de recherche pour le développement.
- 15- **DHW de Tlemcen, 2009** « *Etude de l'unification des rejets des eaux usées et enquête sur les rejets industriels de Maghnia (W de Tlemcen)*.
- 16- **FARES, Y. R, 1998**, « *Transport of Pollutant Discharges in Reservoir and River Systems* ».Estuary and river quality, parallel session (parallel 113), 10 pages

- 17- **FERDI, L. H., 2005.** « *Measuring and Modeling Large – Scale Pollutant Dispersion in Surface Waters* ». Boston MA 02115, 24 pages.
- 18- **F. De SMEDT, W. BREVIS, P. DEBELS, 2005,** « *Analytical solution for solute transport resulting from instantaneous injection in streams with transient storage* » Journal of Hydrology 315 (2005) 25–39
- 19- **GRAF W. H., ALTINAKAR M.S., 2008** « *Hydraulique fluviale - Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple* », Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne, Volume 16, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR).
- 20- **GRABA, M, 2003,** « *Simulation de la dispersion de la pollution dans les écoulements à surface Libre* ». Mémoire de magister, l'Université Abderrahmane Mira de Bejaia, 92 pages.
- 21- **GRAF W. H., ALTINAKAR M.S., 2008** « *Hydraulique fluviale - Ecoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple* » Programmes et animations.
- 22- **HAMLAT ABDELKADER, 2005,** *Contribution à la gestion des ressources hydriques des bassins versants (bassin de la Tafna) par l'application du modèle « SWAT »*, Mémoire pour l'obtention du diplôme de magister en hydraulique, Université des sciences et de la technologie d'Oran -Mohamed Boudiaf-
- 23 - **HAZOURLI S., BOUDIBA L., ZIATI M, 2007** « *Caractérisation de la pollution des eaux résiduaires de la zone industrielle d'El-Hadjar, Annaba* ». Laboratoire de traitement des eaux et valorisation des déchets industriels, Département de chimie, Université Badji Mokhtar - Annaba.
- 24- **J. LESAVRE** « *Epuraton des eaux résiduaires urbaines-nature et paramètres de pollution* »
- 25- **Julien MOREL.** « *Coefficient de diffusion dans des systèmes à intérêt pour l'environnement, Polluants organiques et liquides ioniques dans l'eau* », Université Blaise PASCAL.
- 26- **Jean-luc CELERIER et Jean-Antoine FABY** « *La dégradation de la qualité de l'eau potable* ». Fonds national pour le développement des adductions d'eau (France) - Office international de l'eau.Snide
- 27- **JABBOUR, D, 2006,** « *Etude expérimentale et modélisation de la dispersion en champs lointain suite à un rejet accidentel d'un polluant miscible dans un cours d'eau. Application a la gestion de crise* ». Thèse Doctorat a l'Université de Provence (Aix – Marseille I), 246 pages.
- 28- **K. BLANCKAERT, 2008** « *Hydraulique fluviale et aménagement des cours d'eau – Transport de matière* »
- 29-**LAURENT MARTIN,** « *Fonctionnement écologique de la Seine à l'aval de la station d'épuration d'Achères : donnée expérimentales et modélisation bidimensionnelle* »
- 30-**MOULLA, B, 2007.** « *Simulation numérique du transport d'un polluant actif dans un écoulement à surface libre* ». Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique. 83 pages
- 31- **M-K. BOURAS, J-B. FAURE, N.BUIL,** « *3D simulation of pollutant dispersion in rivers* », Cemagref, hydrology-hydraulic division, Lyon, France.
- 32- **NAVED AHSAN, 2008** « *Estimating the coefficient of dispersion for a natural stream* » World Academy of Science, Engineering and Technology 44 2008.

- 33- **P. MEBINE and R. SMITH**, « *Effects of contaminant decay on the diffusion centre of a river* », Department of Mathematical Sciences, Loughborough University. United Kingdom
- 34- **Runkel, R.L., 1995**, « *Simulation models for conservative and nonconservative solute transport in streams, in Osterkamp* », W.R., editor, Effects of scale on interpretation and management of sediment and water quality, proceedings of the 1995 meeting of the International Association of Hydrological Sciences, Boulder, Colorado, July 3-14, 1995: IAHS publication no. 226, p. 153-159.
- 35- **Runkel, R.L., 1996**, « *Solution to the Advection-Dispersion Equation: Continuous Load of Finite Duration* », Journal of Environmental Engineering, v. 122, no. 9, p. 830-832.
- 36- **Runkel, R.L., 1998**, « *One dimensional transport with inflow and storage (OTIS): A solute transport model for streams and rivers* ». U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 98-4018.
- 37- **Runkel, R.L., 2000**, « *Using OTIS to model solute transport in streams and rivers* »: U.S. Geological Survey Fact Sheet FS-138-99, 4 p.
- 38- **ROBERT L. RUNKEL, 1998**, « *One-dimensional transport with inflow and storage (OTIS): a solute transport model for streams and rivers* », U.S. Geological Survey.
- 39- **Rodier** « *Analyse de l'Eau* » 8^{ème} Edition.
- 40- **SELKA. G, DEBBAL .Z, 2007**, « *Evaluation des effets environnementaux du oued Mouilah sur la Pérennité du Barrage Hammam Boughrara* », 25e rencontres de l'AUGC, 23-25 mai 2007, Bordeaux
- 41- **Y. Laidani G. Henini B. Khatmi A. Dellal, 2009**, « *évaluation de la pollution des eaux du sous bassin versant de l'oued mina* », Université Hassiba Ben Bouali, Chlef . Université Ibn Khaldoun, Tiaret (Algérie). 2ème colloque international de chimie -CIC2- du 1 au 3 décembre 2009
- 42- **Yoo, M. K. & Cho, S. W. & Jun, K. S., 2000**, « *unsteady dispersion of nonconservative pollutants in natural rivers* » Université de Sungkyunkwan, Corée du Sud.

Site Web

- 1- www.kfki.baw.de/conferences
- 2- www.co.water.usgs.gov/toxics/reports/index.html
- 3- www.water.usgs.gov/software/OTIS/download/
- 4- www.cnrs.fr
- 5- www.dx.doi.org
- 6- www.dutslc.wr.gov
- 7- www.smig.usgs.gov