



HAL
open science

L'impact environnemental du changement climatique, une corrélation avec le cycle hydrologique et la concentration de la pollution dans la région Litani

Ali Hayek

► **To cite this version:**

Ali Hayek. L'impact environnemental du changement climatique, une corrélation avec le cycle hydrologique et la concentration de la pollution dans la région Litani. Ingénierie de l'environnement. Université Paris-Est; Université Libanaise, 2021. Français. NNT : 2021PESC2027 . tel-03432354

HAL Id: tel-03432354

<https://theses.hal.science/tel-03432354>

Submitted on 17 Nov 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

En vue de l'obtention de

Titre de Docteur en

**Sciences, Ingénieur et Environnement (SIE)
Sciences de la Terre et de l'Environnement**

Délivrée par :

L'Université Libanaise et L'Université Paris-Est Créteil
(Cotutelle)

Présentée par :

HAYEK ALI

Le 28-01-2021

**Titre : L'impact environnemental du changement climatique, une
corrélation avec le cycle hydrologique et la concentration de la pollution
dans la région Litani**

Composition du Jury proposé :

Mme. Joumana TOUFAILY	Université Libanaise	Presidente
M. Tayssir HAMIEH	Université Libanaise	Directeur de thèse
Mme. Evelyne GARNIER-ZARLI	Université Paris-Est Créteil	Directrice de thèse
M. Samir ABBADANDALOUSSI	Université Paris-Est Créteil	Codirecteur de thèse
M. Thibault ROQUES-CARMES	Université de Lorraine	Rapporteur
Mme. Sarah DORNER	Université de Montréal	Rapporteur
M. Nabil TABAJA	Université Libanaise	Examineur
Mme. Sophie LARUELLE	Université Paris-Est Créteil	Examineur
M. Zaher KHRAIBANI	Université Libanaise	Invité

Remerciement

Je tiens à remercier Monsieur Tayssir HAMIEH et Mme. Evelyne GARNIER-ZARLI, qui m'ont encadré tout au long de cette thèse et qui m'ont fait partager leurs brillantes intuitions, leur disponibilité permanente et les nombreux encouragements. Je remercie Monsieur Samir ABBADANDALOUSSI le codirecteur de ma thèse.

Je remercie ensuite, Mme TOUFAILY, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury, et qui m'a fait l'honneur de bien vouloir examiner mon travail avec attention.

J'adresse tous mes remerciements à Monsieur Thibault ROQUES-CARMES, ainsi qu'à Mme Sarah DORNER, de l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'être rapporteurs de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Nabil TABAJA et à Mme Sophie LARUELLE qui ont bien voulu être examinateurs ainsi que Monsieur Zaher KHRAIBANI, membre invité de mon jury.

Je témoigne mon amitié à l'ensemble du personnel de MCEMA et LEESU pour les bons moments passés ensemble et les échanges scientifiques.

Je remercie sincèrement l'Autorité nationale de la rivière Litani, en particulier les travailleurs du laboratoire de Khirbet Qanfar, où j'ai travaillé et obtenu les résultats de l'analyse de l'eau, et les deux Ministères de l'Environnement et de l'Agriculture pour toutes les données et informations qui m'ont aidé à mener à bien mes recherches.

Je dois remercier ma famille : mon père, ma mère, ma marie et mes enfants et toute ma petite famille pour son encouragement, son soutien et sa patience.

Résumé

Dans cette thèse nous nous intéressons d'une part à modéliser l'impact des facteurs météorologiques (température, précipitation) sur la qualité et la quantité de l'eau de la rivière Litani au Liban, et d'autre part évaluer la pollution de l'eau de la rivière Litani sur plusieurs stations en se basant sur les paramètres physicochimiques. La question posée est de déterminer les sources de pollution de la rivière Litani et surtout du Lac Qaraoun. Pour cela nous avons construit et étudié des modèles statistiques pour répondre aux questions environnementales et en premier lieu par une approche d'optimisation (Shuffled complex method) et un modèle « lag » régression afin de modéliser la relation entre le débit et les deux facteurs (température, précipitation). Puis dans un cadre plus général, nous avons étudié les valeurs extrêmes de ces deux facteurs en se basant sur le processus de records et sur la théorie des valeurs extrêmes. Un autre intérêt de cette thèse réside dans le fait d'avoir étudié l'évolution de la pollution de l'eau au Lac Qaraoun. Nous avons ainsi utilisé des méthodes statistiques multivariées et spatio-temporelles dont l'objectif était d'étudier les paramètres physicochimiques sur plusieurs stations de la rivière Litani réparties sur plusieurs saisons. Ensuite nous avons évalué la pertinence des méthodes statistiques sur des applications basées sur les données réelles des paramètres physico-chimiques collectées sur 10 années, en comparant les sources et les causes de pollution de l'eau entre les différentes stations.

Enfin, nous avons motivé les méthodes utilisées dans cette thèse par des outils informatiques qui visent au développement des bases des données écologiques et environnementales des futurs travaux.

Mots clés : Rivière Litani, Pollution de l'eau, paramètres physico-chimiques, Facteurs Environnementales, Extrêmes, Records, Analyses Multi variées, Spatio-temporel.

Abstract

In this thesis, we are interested on one hand in modeling the impact of meteorological factors (temperature, precipitation) on the quality and quantity of water in the Litani River in Lebanon, and on the other hand in evaluating the pollution of water in the Litani River at several stations based on physicochemical parameters. The question asked is to determine the sources of pollution in the Litani River and especially in Lake Qaraoun. To do this, we build a statistical models to answer environmental questions first of all by an optimization approach (Shuffled complex method) and a “lag” regression model in order to represent the relationship between the flow and the two factors (temperature, precipitation), then in a more general framework, we study the extreme values of these two factors based on the process of records and the theory of extreme values. Another concern of this thesis is to study the evolution of water pollution in Lake Qaraoun. From there, we approach multivariate and spatio-temporal statistical methods whose objective is to study the physicochemical parameters on several stations of the Litani River spread over several seasons. Then we assess the relevance of the statistical methods on applications based on real data of physicochemical parameters collected over ten years by comparing the sources and causes of water pollution between the different stations.

Finally, we motivate the methods approached in this thesis by computer tools that aim to develop ecological and environmental databases in future work.

Keywords: Litani River, Water pollution, physicochemical parameters, Environmental factors, Extremes, Records, Multi-varied analysis, Spatio-temporal.

Liste des abréviations

ACP	Analyse en Composantes principales
AIC	Akaike Information Criterion
ANOVA	Analyse de la variance
BLUP	Best Linear Unbiased Predictor
BM	Block Maxima
CCE	Compétitive Complexe Evolution
CH ₄	Méthane
CO ₂	Dioxyde de carbone
DCO	Demande Chimique en Oxygène
DF	Degree of Freedom
EC	La conductivité
EVT	Extreme Value Theory
CCNUCC	Convention-Cadre des Nations-Unies sur les Changements Climatiques
GEV	Generalized extreme value
GIEC	Groupe d'Experts Intergouvernemental sur les Changements Climatiques
GPCP	Global Precipitation Climatology Project
GPD	Generalized Pareto Distribution
HAC	Analyse hiérarchique de la concentration
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LLB	Lower Litani Basin
LRA	Litani River Authority

LSM	Least square method
MANOVA	Multivariate Analysis Of Variance
nMDS	Non-metric multidimensional scaling
MEF	Mean Excess Function
MLLRM	Multiple linear lag regression model
MSE	Mean Square Error
N ₂ O	Oxyde nitreux
NH ₃	Ammonia
NH ₄	Ammoniaque
NO ₂	Nitrite
NO ₃	Nitrate
O ₂	Oxygen
PCA	Principal Component Analysis
PDSI	Indice de gravité de la sécheresse de Palmer
PH	mesure l'acidité ou l'alcalinité de l'eau
PNUE	Programme des Nations unies pour l'Environnement
PO ₄	Phosphate
POT	Peak over Threshold
RCP	Les voies de concentration représentatives
RMSE	root mean squared error
SCM	Shuffled Complex Method
SD	Standard Deviation
SO ₄ ²⁻	Sulfate
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences

TDO	Oxygène dissous
TDS	Total Dissolve Solides
TSS	Total Suspended Solids
TVE	Théorie des valeurs extrêmes
ULB	Upper Litani Bassin

Table de Figures.....	14
Table de Tableaux.....	16
Introduction Générale	17
Chapitre I Synthèses Bibliographiques	28
I.1 Changement climatique	29
I.1.1 Généralité.....	29
I.1.2 Impact du changement climatique sur la température :	31
I.1.3 Impact du changement climatique sur la précipitation :	33
I.1.4 Changement climatique et désertification :.....	38
I.1.5 Impact du changement climatique sur la fréquence des évènements extrêmes :	42
I.2 Paramètres physico-chimiques reliées à la qualité de l'eau	44
I.2.1 Température :	44
I.2.2 pH.....	44
I.2.3 Conductivité (EC)	45
I.2.4 TDS	46
I.2.5 DO (Oxygène Dissous)	46
I.2.6 SO_4^{2-} (Sulfate).....	47
I.2.7 NO_2^- et NO_3^- (Nitrite Et Nitrate)	47
I.2.8 PO_4^{3-} (Phosphate).....	47
I.2.9 Ammonia NH_3	48
I.2.10 Salinité	48
I.2.11 Méthodes analytiques de mesure des paramètres physico-chimiques étudiées	49
I.3 Pollution de l'eau	50
I.3.1 Etat général de l'eau.....	50
I.3.2 Définition de la pollution de l'eau	50
I.3.3 Sources de pollution de l'eau	51
I.3.3.1 Développement Démographique.....	51
I.3.3.2 Eaux usées domestiques.....	51
I.3.3.3 Les implantations industrielles.....	52
I.3.3.4 Activités agricoles.....	52
I.3.4 Natures des polluants :	55
I.3.4.1 Les pollutions accidentelles	57
I.3.4.2 Les pollutions diffuses	57
I.3.5 Les Types de pollution.....	58
I.3.5.1 La pollution chimique.....	58

I.3.5.2	La pollution physique	58
I.3.5.3	La pollution microbiologique.....	59
I.3.5.4	Les pesticides	60
I.3.5.5	La pollution urbaine	60
I.3.5.6	La pollution agricole	61
I.4	Cadre Géographique du Liban	61
I.5	La cadre géologique du Liban.....	63
I.5.1	La zone littorale	64
I.5.1.1	La côte.....	64
I.5.1.2	La plaine littorale	64
I.5.1.3	Le Mont Liban	64
I.5.2	La zone d'altitude moyenne	64
I.5.3	La plaine de la Bekaa	65
I.5.4	Le Liban sud	66
I.6	Le Climat du Liban	66
I.6.1	La température	67
I.6.2	L'humidité.....	68
I.6.3	Les précipitations	68
I.7	Description générale de l'état de l'eau fluviale au Liban :	70
I.8	Description de la rivière Litani	71
I.8.1	Caractéristiques du Lac Qaraoun:	76
I.8.2	Barrage de Qaraoun ou « Barrage Albert Naqash»:.....	77
I.9	Pollution de Litani.....	79
I.9.1	Bassin Supérieur	80
I.9.2	Les affluents du Litani :	80
I.9.3	Lac Qaraoun et Bassin Inférieur :	81
I.10	Population et utilisation des terres dans le bassin de la rivière Litani	81
I.10.1	Population	81
I.10.2	Utilisation des terres.	82
I.11	Principaux problèmes et risques menaçant l'eau du fleuve Litani	83
I.11.1	Exploitation anarchique et abus des ressources en eau	83
I.12	Description des sites de prélèvement	86
	86
I.12.1	Sélection des sites	86
I.12.2	Description de sites	87

I.13	Outils et méthodes statistiques.....	90
I.13.1	Méthodes Inférentielles.....	91
I.13.1.1	Analyse de la variance (ANOVA)	91
I.13.1.2	Analyse de variance multivariée (MANOVA)	91
I.13.1.3	Modèle de régression	92
I.13.2	Analyse en Composantes principales (ACP)	93
I.13.3	Théorie des valeurs extrêmes (TVE) et théorie des records.....	93
I.13.4	Logiciels Statistiques	94
I.13.5	Shuffled Complex Evolution Method	95
Chapitre II	Evaluation de la température et des précipitations : influences sur le débit de la rivière Litani	97
II.1	OBJECTIF ET INTRODUCTION	99
II.2	MOTIVATION	100
Article 1:	“Modeling of runoff as a function of temperature and precipitation: Application to the Litani River in Lebanon”	103
	ABSTRACT.....	103
	Introduction.....	104
	Materials and Methods.....	109
	Multiple Linear Regression Model (MLRM)	111
	Shuffled Complex Method (SCM).....	112
	Results and Discussion	114
	Multiple linear regression Model (MLRM)	114
	Coefficient of correlation	114
	Estimate of the parameters	115
	Multiple linear regression model with lag-differentiate (MLLRM)	118
	Image of the matrix of correlation coefficient	119
	Regression of variable Runoff (t).....	120
	Shuffled Complex Evolution (SCE)	123
	Validation of the model	125
	Validation of the SCM.....	128
	Conclusion	130
	Conclusion	133
Chapitre III	Analyse des valeurs extrêmes de température et de précipitation au Liban.....	134
III.1	Introduction.....	136
	Description :.....	136

Article 2: Analysis of the Extreme and Records Values for Temperature and Precipitation in Lebanon	139
Abstract.....	139
Introduction.....	139
Materials and methods	142
Extreme value and records theory	142
Fisher Tippett Theorem.....	143
Peak over Threshold- POT:	144
Record Value Theory:.....	145
Extreme Value for Temperature and Precipitation	147
Summary data statistics:	150
Return Level and Period:	152
Prediction Record Value for Temperature and Precipitation.....	153
Temperature:.....	154
Precipitation:.....	154
Prediction records temperature:	154
Prediction records Precipitation:.....	155
Extreme Records.....	155
Temperature Sporadic or Emergent	160
Conclusion	162
Conclusion	164
Chapitre IV Evaluation des propriétés physico-chimiques de l'eau dans la rivière Litani	165
IV.1 Introduction générale	167
IV.2 MOTIVATION.....	168
Article 3: Evaluation of the physicochemical properties of the waters on the Litani River Station	
Qaraoun.....	171
Abstract.....	171
Introduction.....	172
Materials and methods	174
Site Description.....	174
Sampling Test	174
Measurement Method	174
Results and discussions.....	176
Annual and quarterly variation of the parameters.....	176
Statistical study of physicochemical parameters	178
Annual variation.....	178

Seasonal variation	179
Multivariate Statistical Analysis	181
Correlations between the parameters	181
Principal Component Analysis PCA.....	184
Conclusion	187
Conclusion	189
Chapitre V Etude de la variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques dans la rivière Litani 190	
V.1 Introduction générale	191
V.2 Motivation.....	192
Article 4: Multivariate spatial and temporal analysis to study the variation of physico-chemical parameters in Litani River, Lebanon.	195
Abstract:.....	195
Introduction.....	196
Materials and methods	198
Site Selection	198
Site Description.....	198
Sampling Test	198
Measurement Method	199
Data Analysis: Results and discussions	200
Spatial and seasonal Analysis	201
MANOVA and PERMANOVA statistical method	201
Spatial statistical analysis	203
Seasonal statistical analysis	207
Physico-chemical parameters: correlations.....	210
Principal Component Analysis (PCA), Statistical method	210
Correlation between the different parameters, statistical analysis	212
Conclusion	215
Conclusion	216
Conclusion Générale et Perspectives	217
Références.....	225
ANNEXE I : (Logiciel R 3.5.3/ Théorie des valeurs extrêmes):	249
ANNEXE II : (Théorie des records)	253
ANNEXE III: Shuffled Complex Evaluation Method	258
ANNEXE IV : Publications	271

ANNEXE V : Conférence Et Journée Scientifique	272
ANNEXE VI : Les Points noirs de la pollution (Nord Litani + Lac Qaraoun)	274

Table de Figures

Figure I-1 L '« effet de serre ».....	32
Figure I-2 Sécheresse restrictions d'eau dans 87 départements, pas d'amélioration en vue © Maxppp - HU XUEJUN.....	37
Figure I-3 Les rives du lac Victoria près de Budalangi, dans le comté de Busia, au Kenya, le 3 mai 2020. Thomas Mukoya / REUTERS	38
Figure I-4 Carte Géographique du Liban (World Atlas,2020)[108]	62
Figure I-5 La température moyenne en Liban (1810-2018) [112].....	68
Figure I-6 la précipitation moyenne en Liban (1900-2018)[112]	69
Figure I-7 Carte de bassin de la rivière Litani - Liban.....	72
Figure I-8 Le bassin versant Litani dans une carte topographique du Liban	73
Figure I-9 Carte de Lake Qaraoun	77
Figure I-10 Bassin Versant de lake Qaraoun [113].....	77
Figure I-11 Barrage de Lake Qaraoun	79
Figure I-12 Barrage de Lake Qaraoun en enrochements (Profil type au milieu).....	79
Figure I-13 Déchets rejetés par les villes et les résidences dans Litani	84
Figure I-14 Eaux usées rejetés dans Litani	85
Figure I-15 Déchets rejetés par les usines dans la rivière Litani.....	86
Figure I-16 Travaux agricultures autour la rivière Litani	86
Figure I-17 Site.1 : Lake Qaraoun	87
Figure I-18 Site.2 : Jeb-Janine (Nord Litani).....	88
Figure I-19 Site.3 : Quasmieh (Sud Litani).....	88
Figure I-20 Schéma simplifié de l'algorithme de Shuffled Complex Evolution (SCE à gauche) associé à la méthode Compétitive Complexe Evolution (CCE à droite).	96
Figure II-1: Description of the SCM.....	113
Figure II-2 Coefficient correlation between the different factors at different time	119
Figure II-3 Time series of the runoff (observed vs predicted) value.	122
Figure II-4 Runoff by the SCE method.....	124
Figure II-5 (a) Observed and predicted runoff calculated with the MLLRM (1962-2000), (b) Observed and predicted runoff calculated with the MLLRM (2001-2017).	128
Figure II-6 Variations of each parameters by SCM (1962-2000).....	129
Figure III-1 Generalized Extreme Value Distributions.....	144
Figure III-2 Graph of Temperature (Bloc Maxima).....	147
Figure III-3 Graph of Precipitation (Bloc Maxima).....	148
Figure III-4 Graph of Temperature (POT).....	149
Figure III-5 Graph of Precipitation (POT).....	149
Figure III-6 Diagnostic Plot for the fitted GEV model for Maximum Temperature	150
Figure III-7 Diagnostic Plot for the fitted GEV model for Maximum Precipitation	151
Figure III-8 MEF of Temperature.....	157
Figure III-9 MEF of Precipitation.....	158
Figure IV-1 A representative map shows the two main basins of the Litani River separated by Qaraoun Lake.	173
Figure IV-2 Evolution of the annual means between 2008 and 2018.....	177
Figure IV-3 Quarterly evolution of the means of the physico-chemical parameters.	181

Figure IV-4 Correlation circle of the parameters.....	186
Figure V-1 Schematic diagram of geometric partitioning of the water quality parameters in the three stations ($g = 3$) for one-way PERMANOVA in two dimensional (bivariate, $p = 2$) Euclidean space.	202
Figure V-2 Stations variations likely physicochemical parameters.....	203
Figure V-3 Seasonal evolution of the different physico-chemical parameters.	209

Table de Tableaux

Table I-1 Classification des eaux d'après leur pH.....	45
Table I-2 Paramètres physico chimiques et leur Méthode d'analyse.....	49
Table I-3 Types, sources, impact et Paramètres indicatives de pollution de l'eau	55
Table I-4 Taux et type de pollution dans différentes stations du bassin supérieur de Litani	80
Table I-5: Taux et type de pollution dans différentes stations en affluents du Litani.....	80
Table I-6: Taux et type de pollution dans Lac Qaraoun et Bassin inférieur de Litani	81
Table I-7: Description de sites:(location, coordonnées, élévation et note).....	87
Table II-1: Descriptive statistics for the three factors.....	110
Table II-2 Correlation matrix (Pearson).....	114
Table II-3 ANOVA table (Fisher test)	115
Table II-4 Estimate parameters of MLRM	116
Table II-5 Significance test of the correlation between the factors at different time.....	118
Table II-6 Summary of the variables selection Runoff (t):	120
Table II-7 Estimate parameters of the Model	121
Table II-8 Analysis of variance (ANOVA) (Runoff(t)):.....	122
Table II-9 Coefficients and standard error of coefficients for the regression model.	125
Table II-10 Comparison between MLLRM and SCM.....	126
Table III-1 Descriptive Statistics	150
Table III-2 Estimated Parameters of the GEV	151
Table III-3 Return Level	152
Table III-4 Records: Times and Values	154
Table III-5 Estimated Parameters for POT	159
Table III-6 Extreme Quantiles	160
Table IV-1 Description Method of Sampling of Parameters	174
Table IV-2 Descriptive statistics for parameters.....	179
Table IV-3 Seasonal variation of the different physico-chemical parameters	180
Table IV-4 Correlation matrix between the parameters.....	183
Table IV-5 Total explained variance	184
Table IV-6 Component Matrix	185
Table V-1 Description Method of Sampling of Parameters.....	199
Table V-2 Kruskal Wallis test. Grouping variable: Station	201
Table V-3 Mann-Whitney test. Grouping variable: Season.....	201
Table V-4 Descriptive statistics for the parameters in the 3 different stations.	205
Table V-5 Wet season PCA: Total Variance Explained	210
Table V-6 Dry Season. Extraction Method: Principal Component Analysis.....	211
Table V-7 Wet Season. Extraction Method: Principal Component Analysis.	212
Table V-8 Correlation matrix of the water quality parameters in wet season.....	213
Table V-9 Correlation matrix of the water quality parameters in dry season	213

Introduction Générale

La pollution, de l'air, de l'eau et du sol, le changement climatique, l'abondance de l'eau, l'énergie...etc, sont des problèmes majeurs auxquels l'humanité est confrontée ces dernières décennies. En effet, ces problèmes ne sont pas séparés et s'influencent mutuellement. La consommation mondiale d'énergie en 1990 était d'environ 1 milliard de gigawatts, en 2020 elle s'approche des 10 milliards de gigawatts. Cette multiplication par dix en un siècle est liée à la croissance de trois fois la population mondiale et une augmentation d'environ trois fois en moyenne de l'utilisation de l'énergie par habitant. L'augmentation de l'utilisation de l'énergie par habitant est liée à la croissance de l'économie mondiale[1]. La consommation mondiale d'énergie projetée a augmenté de manière significative, passant de 13,6 milliards de tonnes d'équivalent d'huile (t.o.e.) en 2010 à 44,6 milliards t.o.e. d'ici à 2050. En ce qui concerne la production d'énergie importante et croissante de la Chine avec les marchés mondiaux de l'énergie, la demande mondiale de charbon augmente de 3,6 milliards de t.o.e. en 2010 à 12.9 milliards de t.o.e. en 2050, dont le gaz et l'électricité représentent une partie importante de la demande totale[2]. Le changement climatique est la conséquence directe de la consommation d'énergie en raison de l'émission de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, relative aux émissions de dioxyde de carbone. Les émissions mondiales de dioxyde de carbone liées à la consommation de l'énergie augmentent de 31,2 milliards de tonnes métriques en 2010 à 36,4 milliards de tonnes métriques en 2020 et à 45,5 milliards de tonnes métriques en 2040[3]. Le changement climatique et l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre sont des questions largement discutées dans la dernière décennie. Le climat a évolué rapidement en raison de la concentration de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Le changement ainsi que le réchauffement climatique résultent de l'émission de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre. Le changement climatique et la sécurité énergétique représentent les principaux problèmes des générations actuelles et futures[4]–[6]. L'influence de la pollution sur le changement climatique est représentée par des grandes évolutions des paramètres climatiques, surtout la

température et les précipitations. Par exemple, l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre, conduit à une augmentation de la température moyenne globale et influence le réchauffement climatique. Le réchauffement climatique est directement lié à l'augmentation de la concentration du CO₂ dans l'atmosphère. Une étude récente a montré qu'une augmentation de la concentration du CO₂ de 290 ppm à 420 ppm entre 1880 et 2018 a été accompagnée d'une augmentation de 1°C moyen de la température globale[7]. Ce changement en concentration du CO₂, a un effet direct sur la température globale, qui a à son tour, un effet sur les autres aspects météorologiques comme les précipitations et la fréquence des événements météorologiques extrêmes. Des modèles de prédiction estiment une augmentation de la variabilité de la température globale et régionale[8]. L'augmentation des températures intensifie le cycle de l'eau sur la terre en augmentant l'évaporation, ce qui entraîne plus de précipitation globale. Cependant, contrairement à la température, il y a moins d'accord entre les modèles de prédiction de la variation de la précipitation (pluie et neige) et la variation réelle[9]. Une approche multimodale prédit que le Pacifique tropical, les hautes latitudes, l'Inde, le Bangladesh et le nord de la Chine deviendront plus humides tandis que la région méditerranéenne, l'Afrique australe et certaines parties de l'Australie et de l'Amérique du Sud deviendront plus sèches[10]. Les modèles prédisent également qu'il y aura des différences saisonnières dans les précipitations régionales au cours du reste du 21^e siècle.

Le changement climatique n'entraînera pas seulement des changements des températures et des précipitations moyennes mondiales, mais aussi aux événements météorologiques extrêmes. Il y a un accord général parmi les modèles que le climat local deviendra plus orageux. Les zones touchées par ces tempêtes connaîtront des précipitations accrues et des risques d'inondations accrus, tandis que les zones éloignées des tempêtes auront globalement moins de précipitations et un risque accru de sécheresse. Le réchauffement terrestre est plus élevé que celui des océans, de sorte que l'élévation pourrait déjà être proche de 1,5°C dans certaines régions avec une augmentation entre 0.15 et 0.2°C

par décennie. Cela conduit à une fréquence croissante des événements météorologiques violents. La prévision globale est que les effets du changement climatique à long terme entraîneront des problèmes d'inondations qui deviendront plus graves en Asie et entraînera des situations de sécheresse plus grave dans les régions méditerranéennes d'Europe et d'Afrique, d'Amérique centrale, du sud-ouest des États-Unis et des régions subtropicales de l'hémisphère sud[11].

L'utilisation de l'eau domestique, y compris l'eau pour l'utilisation intérieure et extérieure, est essentielle pour maintenir la vie et la santé humaine. Les gens utilisent les systèmes d'eau douce de diverses manières pour répondre à leurs besoins domestiques en eau, surtout les eaux des rivières et des lacs. Cependant, la pression sur les systèmes d'eau douce a augmenté avec l'augmentation de la population humaine[12], [13]. De plus, le changement climatique n'affecte pas seulement les paramètres météorologiques, température et précipitation, mais aussi le réchauffement climatique affecte la température de l'eau de surface et par la suite la température des sources d'eau douce comme les rivières. En conséquence, la température des rivières augmente de 0,5°C par décennie[14]. Il existe un degré de confiance élevé, basé sur de nouvelles preuves substantielles, que les changements observés dans les systèmes biologiques marins et d'eau douce sont associés à la hausse des températures de l'eau, ainsi qu'aux changements dans la salinité, les niveaux d'oxygène et la circulation. L'absorption de carbone anthropique depuis 1750 a conduit l'eau de surface à devenir plus acide avec une diminution moyenne du pH de 0,1 unité[15]. Par conséquent, la pollution liée à l'utilisation des sources d'énergie fossiles est la raison principale du réchauffement et du changement climatique. Ce dernier influence les paramètres météorologiques, comme la température et les précipitations, qui sont liés directement à la santé et à la sécurité des êtres vivants et de l'homme à cause de leurs influences sur la qualité et la quantité de l'eau de surface, source d'eau douce, et sur la fréquence des événements climatiques extrêmes et violents.

Dans la présente thèse de recherche, une étude régionale a été effectuée pour mettre en évidence un modèle reliant les différents facteurs climatiques avec la qualité et la quantité de l'eau de surface. La recherche a été concentrée sur la région Bekaa, du bassin Litani, qui forme 20% de la surface totale du Liban. La rivière Litani a été prise comme un système hydrologique modèle dans notre étude. Cette rivière est la plus importante au Liban, pas seulement à cause de la présence du plus grand lac artificiel, le lac Quaroun, mais aussi parce qu'elle constitue le principal pilier des activités agricoles et industrielles de la région. Cette étude sert à mettre en évidence l'influence du changement climatique sur la qualité et la quantité de l'eau, qui est une issue importante dans la sécurité sociale et la santé humaine. L'étude a été effectuée sur trois axes, un axe concernant le changement climatique régional (exemple Liban) en particulier la température, les précipitations et le débit des cours d'eau (Rivière Litani comme modèle), un deuxième axe concernant le traitement de la qualité d'eau de la rivière Litani. L'évaluation de la pollution de la rivière Litani a été basée sur la mesure des paramètres physico-chimiques de l'eau de la rivière. Des prélèvements mensuels d'eau ont été effectués dans 3 stations sur la rivière Litani sur une période de dix ans (2008-2018). Et un troisième axe reliant les facteurs climatiques étudiés avec la qualité de l'eau superficielle. Nous résumons les principaux objectifs par les cinq points suivants :

- i) Proposer un modèle environnemental pour étudier l'impact des deux facteurs ; température et précipitation sur le débit de la rivière Litani, ce qui nous permet l'étude de la variation de changement climatique de la rivière ;
- ii) Détecter les valeurs extrêmes de la température et des précipitations ;
- iii) Etudier l'évaluation de la qualité de l'eau de la rivière durant les dix dernières années ;
- iv) Réaliser une évaluation de la pollution de la rivière Litani en se basant sur l'information spatio-temporelle (étude sur plusieurs stations et à différentes saisons) ce qui permet

d'évaluer l'effet des facteurs climatiques étudiés (température et précipitation) sur la qualité de l'eau de la rivière

- v) Identifier les impacts économiques du changement climatique sur le secteur agricole au Liban.

Les valeurs quotidiennes de température, de précipitation, du débit de la rivière Litani et du niveau du lac Quaroun, sur une grande période, entre 1962 et 2017, ont été collectées (Laboratoire de L'Office National Du Litani - LRA). Les mesures mensuelles de 11 paramètres physico-chimiques (Température, pH, Conductivité, Salinité, Total Dissolved Solid (TDS), Oxygène dissous (DO), Sulfate, Phosphate, Nitrate, Nitrite et Ammoniac), concernant la qualité de l'eau de la rivière Litani, sur trois différentes stations, sur une période de dix années, entre 2008 et 2018, ont été effectuées. Toutes ces valeurs forment une base de données très vaste et très diverse. Ces données qui sont utilisées pour réaliser les études effectuées peuvent être unidimensionnelles (mesurées au cours de temps sur une station) ou multidimensionnelles (mesurées sur plusieurs stations). L'analyse et l'étude de ces paramètres sont basées sur des méthodes statistiques qui vont dépendre, outre l'objectif visé, des informations environnementales (connaissances et observations) dont on dispose et des caractéristiques des phénomènes observés.

Les méthodes que nous proposons s'inscrivent dans le cadre général : d'une part sur des modèles de régression et d'optimisation et sur l'analyse multidimensionnelle et d'autre part sur la théorie de records qui est reliée aux valeurs extrêmes "méthodes de pics". Cette méthode consiste à étudier la loi limite du maximum d'une suite de variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées, qui fournit une modélisation adéquate non mécaniste de l'évolution des facteurs environnementaux comme la température et la précipitation. Or la théorie des records est efficace puisqu'elle traite d'une part les lois exactes d'une certaine statistique comme le nombre de valeurs de records qui ne dépendent pas de la loi des observations, d'autre part elle prend en compte la structure temporelle des paramètres physico-chimiques. De plus, cette méthode présente un intérêt particulier pour prédire la fréquence des valeurs extrêmes de la température et de la précipitation puisqu'elle représente l'impact de changement climatique sur le débit de la rivière Litani dans

l'avenir. Nous trouvons dans la littérature des applications dans divers domaines d'une part concernant des phénomènes naturels, par exemple rafales de vent[16], la pollution de l'air[17], les crues [18] et d'autre part, les émissions radioactives [19], le management des risques en économie ou en finance.[20]

Avant de présenter le descriptif de ce travail, nous signalons que les méthodes statistiques et les modèles utilisés dans cette thèse représentent une originalité et nouveauté dans le domaine des sciences environnementales et surtout sur le traitement de la qualité d'eau. De plus les méthodes d'analyse en composantes principales et l'analyse de la variance multivariée sont utilisées pour étudier l'évolution de la pollution d'eau et la répartition des paramètres physico-chimiques dans plusieurs stations sur la rivière Litani dans un cadre spatio-temporel. Ces méthodes peuvent également être appliquées pour étudier le degré et la variation de la pollution d'eau dans le cas où les informations se diffèrent d'une station à l'autre. Nous adapterons dans ce contexte la méthode basée sur la statistique inférentielle afin de tester la variabilité entre les stations Quaroun, Jeb-Jenine, Qasmieh. Parmi ces méthodes, il y a des modèles de régression classique qui visent à étudier la relation entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes. Ce modèle de régression a été utilisé dans plusieurs domaines afin de prédire un tel phénomène. Nous traitons dans cette thèse un modèle plus général basé sur le modèle linéaire multiple avec un décalage temporel et d'un modèle d'optimisation Suffled Complex Method (SCM) afin d'étudier l'impact de la température et de la précipitation sur le débit. Ensuite, nous analysons, à partir des moyennes annuelles des 11 paramètres physico-chimiques lors des prélèvements de la station Quaroun, la qualité d'eau. Pour cela nous utilisons des méthodes statistiques multivariées (analyse hiérarchique de la concentration HAC et de l'analyse en composantes principales (ACP) et la corrélation de Pearson pour déterminer l'influence des polluants dans le lac et la rivière. Enfin, une étude de la variabilité spatiale est nécessaire pour détecter l'intensité de la pollution sur la rivière. En plus, une variabilité temporelle

est aussi nécessaire pour évaluer les paramètres au cours des années. Notons que l'analyse statistique des paramètres physico-chimiques donne une vue globale du fonctionnement de la rivière Litani au cours des dernières années.

La thèse est structurée en cinq chapitres qui font l'objet de plusieurs articles :

Le chapitre 1 est une synthèse bibliographique mettant en évidence l'état de l'art des différents axes développés et étudiés dans la présente thèse. Cette synthèse a été concentrée sur les études antérieures concernant la pollution de l'eau et les caractéristiques de la rivière Litani, puis nous donnons une description détaillée du Lac Quaroun. Ensuite nous expliquons les paramètres physico-chimiques étudiés. Finalement, nous présentons un aperçu du changement climatique dans la région méditerranée et en particulier au Liban avec un survol sur des résultats connus et nouveaux sur les facteurs environnementaux (température, précipitation) et le débit.

Dans le chapitre 2 nous présentons des méthodes statistiques descriptives et graphiques afin de disposer des informations nécessaires sur les trois facteurs environnementaux étudiés (température, précipitation, débit). Après l'étude descriptive et analytique, nous nous intéressons à étudier la relation entre les trois facteurs en utilisant une méthode statistique « modèle de régression linéaire avec un décalage temporel » et la « méthode d'optimisation (SCM) » auquel nous considérons que le débit dépend de la température et des précipitations pendant différentes périodes années aux temps t et $t-1$. Les données utilisées vont de 1962 à 2017 et comprennent les moyennes annuelles du débit, de la température et des précipitations desquelles nous pouvons conclure qu'il est possible de prédire le débit avec les deux méthodes abordées sur différentes périodes, ces deux approches de modélisation offrent de bonnes performances pour prédire le débit de la rivière Litani.

Le chapitre 3 décrit les valeurs extrêmes et les records observés de la température et de la précipitation au Liban. Or, des phénomènes naturels extrêmes peuvent entraîner chaque année des pertes en vies humaines, des dommages aux infrastructures et des primes d'assurance très élevées. Ces phénomènes ont le potentiel de se reproduire fréquemment et / ou à une très grande échelle. Cela pourrait être, par exemple, beaucoup de pluie, de la neige et une hausse de la température. Il est donc important de connaître les occurrences et les probabilités de tels événements extrêmes. La théorie des valeurs extrêmes permet de décrire les propriétés statistiques de ces événements. Nous formalisons d'une manière mathématique l'hypothèse d'un phénomène émergent (i.e. température augmente au cours des années) et nous calculons la distribution de nombre de record que l'on veut utiliser comme une statistique de test sur une base de données ; la température et les précipitations au Liban, qui seront choisies comme facteurs météorologiques, ajustés par deux distributions de la famille extrême en utilisant le logiciel R: Weibull pour la méthode des maxima par blocs (BM) et la distribution générale de Pareto pour la méthode du choix d'un seuil (POT) afin de modéliser les distributions des queues des données de la température et des précipitations au Liban. À l'aide de la théorie de record, une étude est faite sur l'évolution de la température et des précipitations de 2003 à 2019. Ce chapitre permet de prédire l'intensité des futurs records de température et de précipitation « les plus élevées » en calculant la probabilité du temps d'attente d'atteindre un nouveau record. Afin de tester la croissance de la température la plus élevée, nous utilisons un test non paramétrique basé sur le nombre de records. Enfin, nous étudions l'impact de ces facteurs météorologiques sur le secteur agricole au Liban en utilisant le modèle VAR.

Puis, nous nous intéressons dans la seconde partie de la thèse qui se décompose en deux chapitres, à l'étude de la qualité d'eau et l'évolution de la pollution d'eau sur plusieurs stations de la rivière Litani.

Dans le chapitre 4 nous nous sommes intéressés à l'étude de la qualité d'eau du lac Quaroun. Au cours des dernières décennies, la qualité de l'eau du bassin supérieur du Litani s'est détériorée. Malheureusement, cette ressource est soumise à une forte pollution exercée par le développement urbain, industriel et agricole concentré dans ses zones côtières. Notre intérêt dans ce chapitre est d'étudier la qualité d'eau par l'estimation de sa qualité physico-chimique qui ne peut pas être mesurée d'une seule manière, mais, par un ensemble de paramètres de propriétés différentes. Des résultats anormaux du contrôle des paramètres peuvent détecter et évaluer les niveaux de pollution. D'abord nous présentons l'échantillonnage et les prélèvements de l'eau ainsi que les paramètres physico-chimiques. Ensuite nous analysons les paramètres physico-chimiques en vue globale du fonctionnement de la rivière Litani au cours des années. L'étude préliminaire du Litani, de 2008 à 2018, avait pour but de mettre en évidence les caractéristiques essentielles de la rivière et le mode de fonctionnement de son écosystème sur la station Quaroun. Nous étudions le développement des ressources polluantes dans la région et déterminons leurs types dont le plus important est la corrélation entre les différents paramètres. L'exploitation des données n'a été possible que par l'utilisation de méthodes statistiques, en calculant les coefficients de corrélations afin d'étudier la relation entre les paramètres physico-chimiques. En plus, en utilisant l'analyse factorielle des correspondances. L'analyse a été effectuée à partir des moyennes annuelles des 11 paramètres obtenus lors des prélèvements à la station Qaraoun.

Finalement nous abordons dans le chapitre 5, l'analyse multivariée de la variation spatio-temporelle de la qualité de l'eau dont l'objectif est d'améliorer le traitement des projets de gestion

de la qualité de l'eau. Nous analysons les variations spatio-temporelles des paramètres physico-chimiques de l'eau à partir de plusieurs échantillons sur plusieurs stations (Quaroun, Jeb-Jenine, Qasmieh) situés dans différentes zones de la rivière Litani à différentes saisons. Au total, 11 paramètres physico-chimiques ont été surveillés sur 12 mois durant l'année 2018. Nous utilisons des méthodes statistiques multivariées pour étudier l'évolution spatio-temporelle des paramètres ainsi que la corrélation entre les différents facteurs. En plus, nous appliquons l'analyse en composantes principales (ACP) sur les paramètres pour vérifier les variations de la qualité de l'eau pendant les périodes humides et sèches et dont l'objectif est d'extraire les différents facteurs qui réduisent la contribution des variables les moins significatives. Afin de comparer la différence entre les trois stations nous utilisons l'analyse multivariée de la variance (MANOVA) et PERMANOVA pour l'analyse spatio-temporelle qui montre une différence importante de qualité de l'eau entre les trois stations en se basant sur la statistique inférentielle pour tester si les paramètres physico-chimiques diffèrent significativement d'une station à l'autre.

Chapitre I Synthèses Bibliographiques

I.1 Changement climatique

I.1.1 Généralité

Les conditions météorologiques sont définies comme des processus à court terme qui entraînent des variations des conditions atmosphériques allant de quelques minutes à une saison. Les processus qui influencent l'atmosphère sur des périodes plus longues qu'une saison sont définis comme le climat. Il existe plusieurs facteurs qui contrôlent le climat et la météo en un seul endroit. Ces facteurs comprennent les variations du rayonnement solaire dues à la latitude, la distribution des continents et des océans, la pression atmosphérique et les systèmes éoliens, les courants océaniques, les principales caractéristiques du terrain, la proximité des plans d'eau et les caractéristiques locales, y compris la topographie. Comme le climat varie, le météo correspondant peut varier en valeur et en direction [21].

Le changement climatique est un risque majeur auquel l'humanité est confrontée. La « Convention-Cadre des Nations-Unies sur le Changement Climatique », FCCC, définit le changement climatique comme "un changement de climat qui est attribué directement ou indirectement à l'activité humaine, qui modifie la composition de l'atmosphère, et qui s'ajoute à la variabilité naturelle du climat sur une période de temps comparable". En revanche, le « Groupe d'Experts Intergouvernemental sur les Changements Climatiques » GIEC définit le changement climatique au sens large comme « tout changement climatique au fil du temps, qu'il soit dû à la variabilité naturelle ou à l'activité humaine » [22]–[24].

Le changement climatique mondial anthropique stimulé par la consommation de combustibles fossiles est un phénomène bien documenté qui a conduit à une augmentation des températures mondiales moyennes à environ 1°C au-dessus des niveaux préindustriels (1850-1900), avec des

écarts régionaux encore plus élevés dans certaines régions et une augmentation significative du réchauffement moyen dans les centres urbains densément peuplés et dans l'Arctique [7][25]. En 2018, le Groupe d'Expert Intergouvernemental des Nations Unies sur le Changement Climatique a fixé un seuil de 1,5°C de réchauffement moyen (au-dessus des niveaux de référence préindustriels), au-delà duquel notre planète deviendra beaucoup moins accueillante pour la vie humaine [26]. De nombreux changements climatiques à long terme ont été observés à l'échelle continentale, régionale et des bassins océaniques, y compris des changements dans les températures et les glaces de l'Arctique, des changements généralisés dans les quantités de précipitations, la salinité des océans, les régimes des vents et certains aspects des conditions météorologiques extrêmes, notamment les sécheresses, les fortes précipitations, la chaleur, vagues et l'intensité des cyclones tropicaux. Les projections des futurs changements climatiques indiquent par exemple [22]:

- L'augmentation des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone conduit à une acidification croissante des océans ;
- La couverture de neige devrait se contracter, augmentation généralisée de la profondeur de dégel dans la plupart des régions de pergélisol ;
- La glace de mer devrait rétrécir à la fois dans l'Arctique et dans l'Antarctique, et la glace de mer arctique de la fin de l'été pourrait disparaître presque entièrement à la fin du 21^{ème} siècle;
- Les extrêmes de chaleur, les vagues de chaleur et les épisodes de fortes précipitations continueront très probablement à devenir plus fréquents ;
- Changements dans les régimes de précipitations, l'augmentation étant très probable dans les hautes latitudes, tandis que des diminutions sont probables dans la plupart des régions terrestres subtropicales ;
- Le réchauffement anthropique et l'élévation du niveau de la mer se poursuivraient pendant des siècles en raison des échelles de temps associées aux processus climatiques et aux

rétroactions, même si les concentrations de gaz à effet de serre devaient être stabilisées. Certains impacts comprennent des températures extrêmes, des catastrophes naturelles puissamment destructrices, une élévation du niveau de la mer rendant les zones côtières actuelles inhabitables, une propagation et une émergence accrues de maladies et de graves pénuries alimentaires à mesure que les régions agricoles changent.

I.1.2 Impact du changement climatique sur la température :

Le lien entre le CO₂ et le réchauffement climatique a attiré l'attention des scientifiques et des politiciens, ainsi que du grand public, via le bien connu «effet de serre» Figure I-1

Le rayonnement solaire passe en grande partie sans entrave dans l'atmosphère, chauffant la surface de la Terre. À son tour, l'énergie est réémise sous forme d'infrarouge, dont une grande partie est absorbée par le CO₂ et la vapeur d'eau dans l'atmosphère, qui agit ainsi comme une couverture entourant la Terre. Sans cet effet de serre naturel, la température moyenne de la surface chuterait à environ -21°C [27], moins que la température moyenne agréable de 14°C que l'on connaît aujourd'hui. La concentration de CO₂ dans l'atmosphère augmente avec l'utilisation développée des combustibles fossiles, ce qui augmente l'effet de serre naturel et réchauffe la planète.

Lors de la Conférence des Nations Unies sur le changement climatique qui s'est tenue à Paris en 2015, 195 pays se sont mis d'accord sur un plan de réduction des émissions de CO₂ et d'autres gaz à effet de serre, visant à limiter l'augmentation de la température mondiale à bien en dessous de 2°C (climat préindustriel relatif, signifiant un réchauffement prédit de moins de 1,4°C car la température avait déjà augmenté de 0,6°C à la fin du XXe siècle).

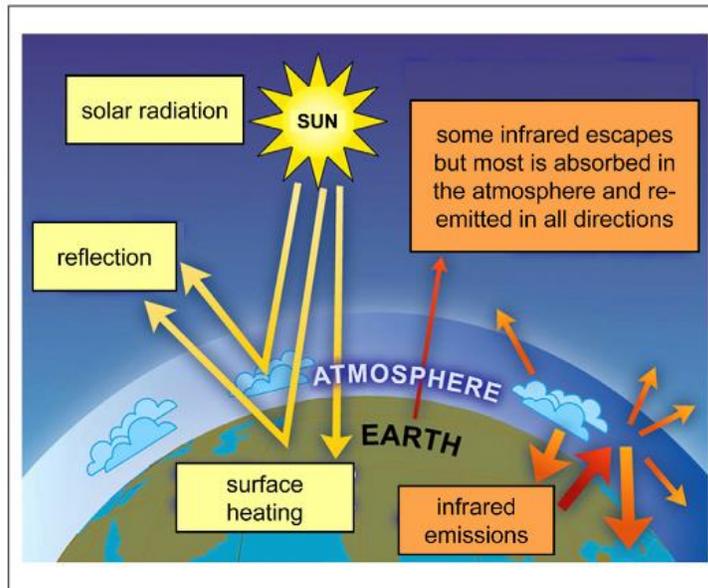


Figure I-1 L'« effet de serre ».

L'équilibre radiatif entre le rayonnement solaire entrant (flèches jaunes) et l'absorption du rayonnement infrarouge réémis par l'atmosphère (flèches orange) entraîne le réchauffement de la surface. Adapté de : GIEC, Climate Change 2007 ; The Physical Science Basis. Contribution du groupe de travail I au quatrième rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Cambridge : Cambridge University Press, 2007), 115

Le protocole de Kyoto réglemente les émissions de CO₂, de méthane (CH₄), d'oxyde nitreux (N₂O), d'hexafluorure de soufre et d'halo-carbures, qui s'appellent les gaz à effet de serre, avec l'équivalence en CO₂ en fonction de leurs rapports de forçage radiatif intégré dans le temps à celui du CO₂, suite à une émission d'impulsions sur une période de 100 ans. Les rapports utilisés dans le protocole de Kyoto et indiqués dans les évaluations du GIEC [28] supposent que le CO₂ restant dans l'atmosphère, suite à une émission d'impulsions, décroît de façon exponentielle.

La tendance au réchauffement linéaire sur 100 ans (1906-2005) était de 0,74°C, la majeure partie du réchauffement se produisant au cours des 50 dernières années. Le réchauffement pour les 20 prochaines années devrait être d'environ 0,2°C par décennie. La poursuite des émissions de gaz à

effet de serre aux taux actuels entraînerait un réchauffement supplémentaire et induirait de nombreux changements dans le système climatique mondial au cours du 21^{ème} siècle qui seraient, très probablement, plus importants que ceux observés au cours du 20^{ème} siècle. Les scientifiques postulent que les politiques mondiales sont actuellement en voie pour conduire à un réchauffement de 3°C d'ici 2100, bien au-dessus des meilleurs scénarios «encore catastrophiques», ce qui réitèrent notre nécessité de prendre des mesures plus strictes pour éviter de dépasser 1,5°C [29]. Les experts ont tenté de projeter notre trajectoire vers ces résultats en utilisant des modèles tels que les voies de concentration représentatives (RCP) et les voies socio-économiques partagées (SSP) qui prédisent le réchauffement moyen et les résultats d'ici 2100 en fonction de l'activité d'émissions actuelles et futures [29].

I.1.3 Impact du changement climatique sur la précipitation :

Les précipitations varient d'une année à l'autre et sur des décennies, et les changements de quantité, d'intensité, de fréquence et de type (neige ou pluie) affectent l'environnement et la société. Des pluies régulières et modérées pénètrent dans le sol et profitent aux plantes, tandis que les mêmes quantités de pluie sur une courte période de temps peuvent provoquer des inondations (Figure I-3) et des ruissellements locaux, laissant les sols beaucoup plus secs en fin de journée. Même avec des quantités identiques, le climat peut être très différent si la fréquence et l'intensité des précipitations diffèrent.

La base conceptuelle des changements dans les précipitations a été exposée par plusieurs chercheurs dans le domaine du changement climatique, ces études ont été effectuées sur des bases des données enregistrées au bout de plusieurs années au niveau régional et mondiale [30]–[37]. Les problèmes sont liés aux changements d'emplacement, de type, de quantité, de fréquence, d'intensité et de durée des précipitations, et en particulier aux changements des valeurs extrêmes. À mesure que le climat

varie ou change, plusieurs influences directes modifient la quantité de précipitations, ainsi que leur intensité, leur fréquence et leur type. La composante la plus prévisible du changement climatique à l'avenir est celle associée aux activités humaines (GIEC 2007). Santer et coll. (2007) ont identifié une forte influence humaine dans les récentes augmentations de vapeur d'eau [38]. L'utilisation des combustibles fossiles, croissant de manière significative, pour répondre aux besoins énergétiques du développement démographique et industriel, les humains induisent des changements majeurs dans la composition de l'atmosphère en ajoutant du dioxyde de carbone et des aérosols. D'autres activités, surtout industrielles, ajoutent du méthane et de l'oxyde nitreux, qui, avec le dioxyde de carbone, forment les gaz à effet de serre qui maintiennent la majorité de rayonnement infrarouge sortant et réchauffent la planète (GIEC 2007). L'effet est d'environ 1% du flux naturel d'énergie à travers le système climatique [39]. Les changements de forçage radiatif associés à l'augmentation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère produisent un réchauffement accru à la surface. La quantité réelle de chaleur dépend essentiellement de diverses rétroactions, y compris la rétroaction de la vapeur d'eau, la rétroaction glace-albédo et les effets des changements dans les nuages [39]. Une des conséquences de l'augmentation de la chaleur due à l'effet de serre anthropique est une augmentation de la température. Cependant, une autre conséquence est l'évaporation accrue de l'humidité de surface, modifiant ainsi le cycle hydrologique, à condition qu'une humidité de surface adéquate soit observée (comme c'est toujours le cas au-dessus des océans et autres surfaces humides) [40].

À mesure que le climat se réchauffe, la capacité de rétention d'eau augmente avec les températures plus élevées et, par conséquent, il est naturel de s'attendre à des augmentations des quantités de vapeur d'eau, car l'humidité relative est plus susceptible de rester à peu près la même. Les changements d'humidité sont évidents dans les observations. En surface, il y a des indications claires d'augmentation de l'humidité spécifique [41], [42]. Au-dessus des océans, les augmentations sont

compatibles avec une humidité relative constante, tandis que les augmentations sont un peu plus faibles sur les terres, en particulier là où la disponibilité de l'eau est limitée. La vapeur d'eau dans la haute troposphère a également augmenté à un rythme compatible avec une humidité relative assez constante [43]. Les augmentations observées de la vapeur d'eau affectent à la fois l'effet de serre, fournissant ainsi une rétroaction positive au changement climatique, et le cycle hydrologique, en fournissant plus d'humidité atmosphérique pour toutes les tempêtes. En conséquence, il a des ramifications pour les précipitations.

En l'absence des changements dans les vents, l'augmentation de l'évaporation et de l'humidité signifie que plus d'humidité est transportée des régions de divergence (subtropicales) vers les zones de convergence sous les tropiques et vers les trajectoires des tempêtes aux latitudes plus élevées, de sorte que les zones humides deviennent plus humides et les zones sèches deviennent plus sèches [34]–[36]. Mais il y a une augmentation de l'énergie statique humide et une instabilité humide brute, ce qui permet une convection plus forte et des pluies plus intenses. La branche ascendante de la circulation Hadley devient de plus en plus étroite [44]. Celles-ci modifient également la stabilité statique qui se traduit par un «ante supérieur» pour que les précipitations se produisent, ce qui entraîne des diminutions sur les bords des zones de convergence, car il faut plus d'instabilité pour déclencher la convection [34].

Par conséquent, il y a des changements dans les vents qui modifient ce phénomène où les zones humides deviennent plus humides, et ainsi les zones de convergence se rétrécissent. Les tropiques alors s'élargissent et les trajectoires des tempêtes se déplacent vers les pôles [45]. Les changements des vents modifient les températures de surface de la mer et, sous les tropiques, cela a des effets profonds sur les endroits où la convergence de l'humidité est favorisée. Par conséquent, la zone de convergence intertropicale et la zone de convergence du Pacifique Sud se déplacent [46], et des structures dipolaires se produisent souvent dans des anomalies de précipitations.

Étant donné que les transports d'humidité déplacent l'énergie latente en tant qu'élément clé des transports d'énergie, avec une humidité accrue, les vents peuvent être moins forts tout en réalisant le même transport nécessaire pour équilibrer le budget énergétique. Par conséquent, la circulation divergente est susceptible d'être affaiblie [36], [47]. Il y a aussi un changement de neige en pluie, surtout au début et à la fin de la saison froide. Le couvert neigeux fond plus rapidement et, par conséquent, diminue à la fin du printemps [48], ce qui entraîne une moindre humidité du sol en été et un risque accru de sécheresse, de vagues de chaleur et d'incendies de forêt.

Un résumé complet des changements observés dans les précipitations est présenté dans la quatrième évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) [49]. Gu et coll. (2007) ont documenté les changements des précipitations mondiales et tropicales à l'aide du Global Precipitation Climatology Project (GPCP), et ont trouvé des changements mondiaux proches de zéro, mais avec une grande variabilité et des changements sur la terre qui sont largement compensés par des changements opposés sur les océans [50].

Sur terre, le record de précipitations s'étend tout au long du 20^{ème} siècle, et de grandes variations se produisent d'une année à l'autre et sur des échelles de temps décennales. Néanmoins, certains modèles à grande échelle de changement systématique sont évidents [49]. En général, il y a diminution des précipitations dans les régions subtropicales et tropicales en dehors du creux de la mousson, et augmentation des précipitations terrestres aux latitudes plus élevées, notamment en Amérique du Nord, en Eurasie et en Argentine. Les diminutions sont particulièrement évidentes en Méditerranée, en Asie du Sud et dans toute l'Afrique. Dans les régions plus au nord, plus de précipitations tombent sous forme de pluie plutôt que de neige [48], [51]. La saison des précipitations liquides s'est allongée jusqu'à 3 semaines dans certaines régions des hautes latitudes boréales au cours des 50 dernières années [49], en raison notamment d'un début plus précoce du printemps. Des changements similaires peuvent être déduits au-dessus des océans à partir des

modèles à grande échelle de changement de la salinité entre les années 1950 et 1960 par rapport aux années 1990-2000 (GIEC 2007). Des salinités plus élevées des océans aux basses latitudes et un rafraîchissement aux hautes latitudes des deux hémisphères sont évidents.



Figure I-2 Sécheresse restrictions d'eau dans 87 départements, pas d'amélioration en vue © Maxppp - HU XUEJUN



Figure I-3 Les rives du lac Victoria près de Budalangi, dans le comté de Busia, au Kenya, le 3 mai 2020. Thomas Mukoya / REUTERS

I.1.4 Changement climatique et désertification :

Selon le PNUE (1992) [52], toutes les régions dans lesquelles le rapport entre les précipitations annuelles totales et l'évapotranspiration potentielle varie de 0,05 à 0,65 devraient être considérées comme vulnérables à la désertification. Ces régions constituent environ 40% de la superficie terrestre mondiale, qui totalise environ 130 millions de km². Les régions arides, semi-arides et sèches subhumides du monde occupent 12,1, 17,1 et 9,9% de la superficie totale du monde respectivement [53]. Les zones relativement sèches couvrent une grande partie de l'Afrique du Nord, de l'Afrique du sud-ouest, de l'Asie du sud-ouest, de l'Asie centrale, du nord-ouest de l'Inde et du Pakistan, du sud-ouest des États-Unis et du Mexique, de l'ouest de l'Amérique du Sud et d'une grande partie de l'Australie. Les régions arides et semi-arides couvrent plus d'un quart de la

superficie terrestre mondiale et abritent près d'un sixième de la population mondiale [54]. Les écosystèmes des régions semi-arides et arides du monde entier semblent subir divers processus de dégradation communément appelés désertification.

Les activités humaines - principalement la combustion de combustibles fossiles et les modifications de la couverture terrestre - modifient la concentration de constituants atmosphériques ou les propriétés de la surface de la Terre qui absorbent ou diffusent l'énergie radiante. En particulier, les augmentations des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols sont fortement impliquées comme contributeurs aux changements climatiques observés au cours du XXe siècle et devraient contribuer à d'autres changements climatiques au XXIe siècle et au-delà. Ces changements dans la composition atmosphérique sont susceptibles de modifier les températures, les régimes de précipitations, le niveau de la mer, les événements extrêmes et d'autres aspects du climat dont dépendent l'environnement naturel et les systèmes humains [55].

Selon le Groupe d'Experts Intergouvernemental sur les Changements Climatiques [56], les écosystèmes sont soumis à de nombreuses pressions (par exemple, changement d'utilisation des terres, demande de ressources, changements de population). Ces écosystèmes sont de plus en plus détériorés et leur étendue et leur mode de répartition changent. Le changement climatique constitue une pression supplémentaire qui pourrait changer ou mettre en danger les écosystèmes et les nombreux bénéfices qu'ils fournissent. Les propriétés et les processus du sol - y compris la décomposition de la matière organique, le lessivage et les régimes hydriques du sol - seront influencés par l'augmentation de la température. L'érosion et la dégradation des sols sont susceptibles d'aggraver les effets néfastes d'une élévation de la température de l'air sur les rendements des cultures. Le changement climatique peut accroître l'érosion dans certaines régions, en raison de fortes pluies et d'une augmentation de la vitesse du vent. Le changement climatique induit par le CO₂ et la désertification sont liés en raison des rétroactions entre la dégradation des

terres et les précipitations. Le changement climatique pourrait aggraver la désertification en modifiant les modèles spatiaux-temporels de température, de précipitations, d'isolement solaire et de vents. Plusieurs modèles climatiques suggèrent que le réchauffement climatique futur pourrait réduire l'humidité du sol sur de vastes zones de prairies semi-arides en Amérique du Nord et en Asie [57]. Ce changement climatique est susceptible d'exacerber la dégradation des terres semi-arides qui sera causée par l'expansion rapide des populations humaines au cours de la prochaine décennie. La superficie mondiale des terres désertiques sera augmentée de 17% pendant les changements climatiques attendus avec un doublement de la teneur en CO₂ atmosphérique [58]. Tout déplacement vers une zone plus étendue de terres arides représente potentiellement une perte permanente de la capacité de production de la biosphère dont dépend toute vie.

Les ressources en eau sont inextricablement liées au climat, de sorte que la perspective du changement climatique mondial a de graves implications pour les ressources en eau et le développement régional [59]. Le changement climatique - en particulier les changements dans la variabilité du climat dus aux sécheresses Figure I-2 et aux inondations Figure I-3 rendra la résolution de ces problèmes plus complexe. Le plus grand impact continuera d'être ressenti par les pauvres, qui ont l'accès le plus limité aux ressources en eau. L'impact des changements dans les précipitations et de l'évaporation accrue pourrait avoir des effets profonds sur certains lacs et réservoirs. Des études montrent que, dans le paléoclimat de l'Afrique et dans le climat actuel, les lacs et les réservoirs réagissent à la variabilité climatique par des changements prononcés dans le stockage, conduisant à un assèchement complet dans de nombreux cas. En outre, ces études montrent également que sous le régime climatique actuel, plusieurs grands lacs et zones humides présentent un équilibre délicat entre les flux entrants et sortants, de sorte que des augmentations de l'évaporation de 40%, par exemple, pourraient entraîner une réduction des flux sortants [55]. En Afrique, tous les grands bassins versants sont affectés par le réchauffement climatique [60], [61].

Bien que la tendance soit à l'assèchement dans la plupart des localités, il existe des différences significatives dans les réponses au niveau des bassins versants, selon le moment et la distribution des précipitations, ainsi que la capacité de rétention d'eau du sol. La capacité de rétention d'eau du sol est modifiée par le degré de dégradation du sol.

Les sols exposés à la dégradation en raison d'une gestion mauvaise des terres pourraient devenir stériles en raison du changement climatique. Les augmentations de température auraient des effets négatifs sur la végétation naturelle dans les zones désertiques. Les plantes dotées de systèmes racinaires superficiels, qui utilisent principalement l'humidité des précipitations, seront vulnérables. De nombreux bassins versants en Asie sont déjà affectés par une utilisation intensive des terres et d'autres ressources et par un climat inhospitalier (en particulier dans les régions arides et semi-arides en Asie), au-delà de leur capacité à fournir de l'eau de manière adéquate, à prévenir les inondations et à fournir d'autres services. En l'absence de stratégies d'adaptation appropriées, ces bassins versants sont très vulnérables aux changements climatiques.

La fréquence du transport épisodique par le vent et l'eau à partir des terres arides est également susceptible d'augmenter en réponse aux changements anticipés du climat mondial [57]. De plus, l'augmentation de l'érosion éolienne augmente la poussière minérale soufflée par le vent, ce qui peut augmenter l'absorption du rayonnement dans l'atmosphère [62].

Néanmoins, il est urgent de surveiller les interactions entre la désertification et le climat. Les terres arides joueront probablement un rôle important dans la fonction biogéochimique mondiale à l'avenir, car la superficie des terres arides devrait augmenter, parallèlement au transport épisodique et à longue distance des ressources du sol [63]. Il est important d'adopter des critères et des méthodes uniformes pour évaluer la désertification et encourager la surveillance de la dégradation des terres arides dans toutes les régions du monde. Pour mieux comprendre les interactions entre le climat et

la désertification, il est également important d'effectuer des études régionales de surveillance du climat. Ces réseaux pourraient également aider à améliorer l'application des prévisions climatiques saisonnières pour une gestion plus efficace des zones arides. De ce fait, il vient l'importance de notre travail d'étude des paramètres climatiques, surtout la température et la précipitation, dans une région agricole très importante au Liban.

I.1.5 Impact du changement climatique sur la fréquence des événements extrêmes :

Les événements hydrologiques extrêmes sont généralement définis comme des inondations et des sécheresses. Les inondations sont associées à des précipitations extrêmes (tempêtes tropicales, orages, pluies orographiques, cyclones extratropicaux généralisés, etc...), tandis que les sécheresses sont associées à un manque de précipitations et souvent à des températures extrêmement élevées qui contribuent au séchage. Les inondations sont souvent assez locales et se développent sur de courtes échelles de temps, tandis que les sécheresses sont étendues et se développent sur des mois ou des années. Les deux peuvent être atténués ; inondations par de bons systèmes de drainage et sécheresse par irrigation, par exemple. Néanmoins, les manchettes des journaux quotidiens sur les inondations et les sécheresses reflètent l'importance critique du cycle de l'eau, en particulier des précipitations, dans les affaires humaines. Les estimations des dommages causés par les inondations dans le monde se chiffrent en milliards de dollars par an, avec des milliers de vies perdues ; tandis que les coûts de la sécheresse sont d'une ampleur similaire et entraînent souvent des incendies de forêt dévastateurs et des vagues de chaleur. La perte de vies due aux événements hydrologiques extrêmes a donc amené la société à se concentrer sur les causes et la prévisibilité de ces événements.

La sécheresse a également augmenté de manière générale tout au long du 20^{ème} siècle [49], [64], telle que mesurée par l'indice de gravité de la sécheresse de Palmer (PDSI). Dai et coll. (2004) montrent que les zones de terres très sèches à travers le monde ont plus que doublé depuis les années

1970 [64]. L'augmentation de la sécheresse est associée à la redistribution des précipitations et à plus de précipitations sur l'océan que sur la terre pendant l'oscillation décennale du Pacifique, mais aussi avec l'augmentation de la température de surface et l'augmentation de la demande atmosphérique en humidité associée, ce qui augmente l'évapotranspiration.

Le caractère des précipitations change également. Des études montrent que pour de nombreuses régions du monde, il a été constaté qu'une augmentation des précipitations totales moyennes se traduit de manière disproportionnée par une augmentation des taux de fortes précipitations. Ainsi, étant donné les schémas de variation des précipitations totales moyennes au cours du 20^{ème} siècle, on pourrait prévoir qu'en général, pour les régions où les précipitations totales moyennes ont augmenté, le pourcentage d'augmentation des taux de précipitations abondantes devrait être beaucoup plus important [65], [66]. D'autres études régionales, effectuées dans différentes régions du monde, aux Etats-Unis, Canada, Japon, UK, Brésil, Afrique du Sud, Russie, Suisse...etc confirment cette caractéristique d'une réponse amplifiée pour les événements lourds et extrêmes [31], [39], [67]–[70]. En particulier, des augmentations des fortes pluies se produisent généralement dans la plupart des endroits, même lorsque les précipitations moyennes n'augmentent pas [70]–[73]. Une grande partie de cette augmentation s'est produite au cours des 3 dernières décennies du siècle. Bien que les inondations aient augmenté dans certaines régions, et en association avec les cyclones tropicaux et les ouragans, le changement d'affectation des terres modifie les risques, et les projets d'atténuation des inondations sont omniprésents pour réduire les risques d'inondations. Néanmoins, les inondations extrêmes ont augmenté au 20^{ème} siècle [74]. Plusieurs études ont remarqué un lien distinct entre les extrêmes de précipitations plus élevées et les températures [39], [75].

La distribution et le moment des inondations et des sécheresses sont les plus profondément affectés par le cycle hydrologique, en particulier sous les tropiques et sur une grande partie des latitudes moyennes des pays riverains du Pacifique [76].

Les cyclones tropicaux ont généralement le plus grand nombre de dommages matériels parmi tous les événements extrêmes et sont donc d'un grand intérêt pour les organisations nationales et locales de préparation aux catastrophes, ainsi que pour le secteur des assurances [77]. La disparité entre l'augmentation de l'humidité et le changement beaucoup plus faible de la quantité de précipitations totales garantit qu'il y aura un changement dans la nature des événements de précipitations vers des pluies plus intenses et moins fréquentes [30], [33].

I.2 Paramètres physico-chimiques reliées à la qualité de l'eau

I.2.1 Température :

La température de l'eau de surface varie en fonction de la température ambiante d'une part et celle de la saison d'autre part. La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyses dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau. La température doit être mesurée sur le site et dans le laboratoire. Les appareils de mesure de la conductivité ou du pH possèdent généralement un thermomètre intégré.

I.2.2 pH

Le pH mesure l'acidité ou l'alcalinité de l'eau Table I-1 Classification des eaux d'après leur pH Table I-1. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibres physico-chimiques et

dépend de facteurs multiples, dont l'origine de l'eau. L'eau pure a un pH de 7, mais les sources d'eaux ont tendance à être légèrement acides à cause des précipitations et des polluants contenus dans l'eau. Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par une colorimétrie.

Table I-1 Classification des eaux d'après leur pH

pH < 5	Acidité forte => présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles
pH = 7	pH neutre
7 < pH < 8	Neutralité approchée => majorité des eaux de surface
5,5 < pH < 8	Majorité des eaux souterraines
pH = 8	Alcalinité forte, évaporation intense

I.2.3 Conductivité (EC)

La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats de mesure doivent donc être présentés en terme de conductivité équivalente à 20 ou 25°C. Les appareils de mesure utilisés sur le terrain effectuent en général automatiquement cette conversion.

Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. La procédure est simple et permet d'obtenir une information très utile pour caractériser l'eau.

Comme la température, des contrastes de conductivité permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélanges ou d'infiltration. La conductivité est également l'un des moyens de valider les analyses physico-chimiques de l'eau : la valeur mesurée sur le terrain doit être comparable à celle mesurée au laboratoire.

La conductivité de l'eau fournit une indication de la qualité et de la quantité de matières dissoutes dans l'eau. La mesure de conductivité de l'eau dépend d'une large variété de substances ou de matières inorganiques solides dissoutes dans les solutions d'eau (sodium, chlorure, sulfates, calcium, bicarbonates, nitrates, phosphates, fer, et magnésium). Tous ces matériaux à certaines concentrations ont la capacité d'induire un courant électrique. Ce paramètre doit être mesuré sur le terrain et validé aussi au laboratoire.

I.2.4 TDS

Le TDS (Total Dissolve Solides) signifie la totalité des solides dissous et représente la concentration totale des substances dissoutes dans l'eau. Le TDS est composé de sels inorganiques et de quelques matières organiques. Les sels inorganiques communs trouvés dans l'eau incluent le calcium, le magnésium, le potassium et le sodium qui existent sous forme de cations et d'autres sous forme d'anions comme les carbonates, les nitrates, les bicarbonates, les chlorures et les sulfates. Ces minéraux peuvent provenir d'activités humaines. Les eaux de ruissellement agricoles et urbaines peuvent provoquer un surplus de minéraux dans les sources d'eaux comme les bassins d'eaux usées, eaux usées industrielles et le sel qui est utilisé pour dégivrer les routes. La méthode normalisée pour déterminer le TDS consiste à faire évaporer une quantité connue d'un échantillon d'eau en le chauffant à 180 °C. Il suffit ensuite de peser le résidu de solide obtenu.

I.2.5 DO (Oxygène Dissous)

DO pour oxygène dissous, c'est la quantité d'oxygène (O₂) dissous dans l'eau. Elle dépend de la température, l'activité bactérienne, la photosynthèse et la présence de nutriments dans l'eau. Une faible teneur en O₂ est nocive pour la vie aquatique et généralement reflète une eau polluée.

I.2.6 SO₄²⁻ (Sulfate)

Les sulfates peuvent être trouvés dans toutes les eaux naturelles. L'origine de la plupart des composés sulfatés est l'oxydation des minerais de sulfites. D'autres origines sont l'érosion des roches et l'eau de mer. Une haute teneur en sulfate (sulfate de cuivre par exemple) peut causer des troubles digestives (irritation gastro-intestinale, diarrhée), des toxicités hépatiques et rénales.

I.2.7 NO₂⁻ et NO₃⁻ (Nitrite Et Nitrate)

Les nitrites (NO₂⁻) et les nitrates (NO₃⁻) sont des ions provenant du cycle naturel de l'azote. Des concentrations élevées en nitrate proviennent des engrais agricoles, des effluents domestiques, et des rejets industriels et des eaux usées.

En plus des risques de cancer, une exposition importante aux nitrates et nitrites pourraient causer une maladie rare dans le sang nommée méthémoglobine. Cette maladie entraîne la destruction des globules rouges.

I.2.8 PO₄³⁻ (Phosphate)

Les phosphates existent dans la nature, souvent en complexes couplés à des composés organiques. La plus grande partie du phosphore que l'on retrouve dans les eaux provient des rejets d'eaux résiduaires et des activités agricoles.

Une teneur très élevée en phosphate dans l'eau, entraîne une augmentation énorme des algues et des plantes aquatiques et par suite l'utilisation d'une large quantité d'oxygène. Cela affecte la vie aquatique en diminuant la teneur en oxygène dissous. Les phosphates ne sont pas toxiques pour l'homme ou l'animal sauf s'ils se présentent à des concentrations très élevées. Des problèmes digestifs peuvent être causés dans ce cas.

I.2.9 Ammoniaque NH₃

L'ammoniac est un composé gazeux (NH₃) qui donne, par dissolution dans l'eau, une base organique : l'ammoniaque (NH₄). L'ammoniaque est le premier composé qui se forme au cours de la décomposition des matières organiques azotées.

Normalement, ce produit est rapidement oxydé par des bactéries du sol (*Nitrosomas sp.*) au cours des processus de nitrification.

I.2.10 Salinité

La salinité des rivières peut être naturelle, liée à la géologie du milieu environnant. Des couches de sel peuvent ainsi être les témoins d'une mer présente à un endroit donné des milliers d'années plus tôt. L'érosion des sols libère alors le sel dans les rivières. L'implication de l'Homme se traduit par le rejet de déchets industriels, par l'activité minière (l'extraction de la potasse dans les mines libère notamment des sels de potassium que l'on retrouve ensuite dans les rivières) ou encore par les déchets agricoles et fermiers. En fonction de la nature du sol, l'irrigation intensive peut également être un véritable fléau.

I.2.11 Méthodes analytiques de mesure des paramètres physico-chimiques étudiées

Le Table I-2 illustre les paramètres physico-chimiques testés dans chaque site de prélèvement et leur méthode d'analyse.

Table I-2 Paramètres physico chimiques et leur Méthode d'analyse

Paramètres	Method de l'analyses
pH	pH meter, La Motte
Conductivity/TDS/Salinity	Conductivity/TDS/Sal Portable meter, La Motte
Dissolved Oxygen	Dissolved Oxygen Gauge, La Motte
Phosphate as PO_4^{3-} (0 to 5 mg/l)	Spectrophotometry. Method H3035-QNT, Phosphorous, reactive, PhosVer 3, Test N tube procedure. Hach 8048 Cat number 2106069
Sulfate as SO_4^{2-} (0 to 70 mg/l)	Spectrophotometry. Method H3450-QNT. Powder pillows Hach8051 Cat number 2106769
Nitrate as N-NO_3^- (0 to 0.5 mg/l)	Spectrophotometry. Method H2520. QNT Nitrate, Mid range, Cadmium reduction method, powder pillows. Hach method 8171 Nitra Ver 5.
Nitrite as N-NO_2^- (0 to 0.3 mg/l)	Spectrophotometry. Method H2610. FXD Nitrite, low range, Diazotisation method, powder pillows. Hach 8507. NitriVer 3.

Ammonium	Ammonia Ionic strength adjuster, powder pillows. Cat 2980699. Ion selective electrode.
----------	---

I.3 Pollution de l'eau

I.3.1 Etat général de l'eau

Or, l'eau est le principal constituant des êtres vivants. Elle couvre environ les trois quarts de la planète dont 97% est de l'eau salée (océan, mer...) et 3% seulement est de l'eau douce consommable (rivières, ruisseaux, eau souterraine...). La majorité des eaux douces sont immobilisées dans les glaces et les neiges. L'eau intervient dans la plupart des activités des êtres vivants et surtout dans les activités humaines (nouritures, les boissons, les activités industrielles, le transport, refroidissement ...)[78]. En plus, l'eau est une ressource naturelle essentielle à la vie dans tout écosystème[79]. Le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour la société qui doit répondre aux besoins croissants en eau avec le développement rapide de l'économie moderne et l'expansion continue de la population [80]. En fait, les facteurs naturels et les activités humaines telles que l'irrigation, les activités industrielles et les eaux usées introduisent une quantité élevée de polluants chimiques et biologiques, directement ou par ruissellement, dans les eaux de surface. En conséquence, les propriétés physico-chimiques des rivières et autres caractéristiques de surface sont affectées [81],[82],[83]. Ces influences entraînent de nombreuses perturbations du milieu naturel et un écosystème dégradé [84].

I.3.2 Définition de la pollution de l'eau

La pollution peut être définie comme une modification des propriétés physiques, biologiques et chimiques de l'eau. A cause du développement démographique, les besoins en eau sont en expansion. Ils sont accompagnés par la pollution de l'environnement et surtout de l'eau à cause de l'utilisation de grandes quantités de produits chimiques minéraux (métaux lourds) et organiques (colorants et solvants industriels, dérivés pharmaceutiques, pesticides introduits par l'agriculture) qui sont rejetés dans la nature et conduits au travers des courants d'eau vers les eaux souterraines par les écoulements naturels [85]. La pollution peut être aussi d'origine biologique (microorganismes, virus, protozoaires). Les causes principales de la pollution de l'eau sont :

I.3.3 Sources de pollution de l'eau

I.3.3.1 Développement Démographique

Au fur et à mesure que la population augmente, les pressions résultant de l'expansion urbaine, faite aveuglement au Liban et dans le bassin de la rivière Litani, augmentent ainsi que l'augmentation incontrôlée de la consommation d'eau. Les données basées sur l'analyse des images satellitaires en 2010 montrent que la superficie fertile agricole a diminué au cours de 10 ans de 55 900 hectares à cause de l'expansion urbaine.

L'urbanisation, en l'absence de projets d'eau et d'assainissement, entraîne une forte pression sur les ressources en eau, ce qui augmente la quantité d'eau non traitée dans les cours d'eau qui alimentent la rivière Litani, ses affluents et ses eaux souterraines [86].

I.3.3.2 Eaux usées domestiques

Le débit des eaux usées domestiques dans la Bekaa est estimé à 45,4 millions m³ et devrait atteindre 62,9 millions m³ d'ici 2030. Cette eau est considérée comme dangereuse et nocive et a un impact

significatif sur la pollution des eaux de surface et des eaux souterraines et conduit à la concentration et à l'intensification de substances polluantes telles que les nitrates et les phosphates [86].

1.3.3.3 Les implantations industrielles

Les implantations industrielles sont situées dans de nombreuses régions du bassin de Litani, en particulier le bassin supérieur de la rivière. Ces usines produisent des déchets liquides chargés de polluants organiques biodégradables, provoquant des déséquilibres dans l'environnement. En plus des déchets solides et des déchets de métaux dangereux, certaines usines utilisent la fabrication humide, Grandes quantités d'eaux usées contaminées chargées de matières organiques et inorganiques telles que les abattoirs, les élevages de volailles, les implantations d'emballage végétal et les industries du papier.

L'analyse des échantillons de la rivière Litani montre que le zinc, le nickel et le chrome s'accumulent au-delà du niveau global admissible. La pression industrielle affecte la qualité de l'eau dans le bassin supérieur de la rivière Litani, où des composés de métaux lourds tels que le baryum, le chrome et le zinc sont déposés dans le lac Qaraoun.

Notons que le nombre d'usines et d'établissements dont les activités ont causé divers dommages sur la rivière Litani a atteint 215 selon un rapport publié par le Ministère de l'Industrie en République du Liban le 3 mai 2017 [86].

1.3.3.4 Activités agricoles

Les principaux composants du ruissellement de surface des terres agricoles sont des composés chimiques agricoles tels que les pesticides non biodégradables, les engrais riches en nitrate et le phosphate qui atteignent les cours d'eau avec un excès d'eau d'irrigation et de dérive de surface. Des études antérieures ont montré une forte concentration de produits chimiques pendant la période

estivale. Ce secteur est une mauvaise utilisation des pesticides car la plupart d'entre eux utilisent deux fois le montant recommandé et le nombre d'utilisations successives varie de 3 à 5 fois par saison [86].

L'agriculture est à l'origine d'une quantité non négligeable de contaminants des eaux, en particulier à cause de l'utilisation excessive d'engrais, qui ne sont pas consommés par les plantes et sont souvent des produits azotés et phosphatés très récalcitrants à la décomposition. Ce sont ces grandes quantités d'azote et de phosphore qui sont apportées par le ruissellement vers les cours d'eau et sont à l'origine du phénomène d'eutrophisation dans les eaux stagnantes. Dans ce phénomène, des algues se développent rapidement à la surface et provoquent une diminution de la luminosité et de la quantité d'oxygène dilué qui est nécessaire pour la survie des espèces aquatiques. L'eutrophisation a un impact négatif sur la biodiversité[87]. Ces algues peuvent par la suite provoquer des problèmes au niveau des stations d'épuration qui peuvent être construites à proximité des cours d'eau et des barrages.

En conséquence, la concentration des composants comme les métaux lourds, des anions nitrates et phosphates, pesticides, colorants, molécules pharmaceutiques... augmente dans l'eau de surface comme celle des fleuves[88].

Un échange ionique entre l'eau et les sédiments aura lieu, ce qui introduit un changement de la concentration de ces ions dans les deux milieux (aquatique-sédiment)[89]. L'échange ionique qui se fait à l'interface eau-sédiment, dépend de plusieurs facteurs. La nature des sédiments influence le taux de diffusion, de fixation et d'échange des ions dans les deux sens de l'interface. Les concentrations des composées ioniques, le pH du milieu, le complexe microbiologique de l'interface qui introduit une quantité supplémentaire de quelques anions (nitrates, phosphates...) venant de la dégradation des matières organiques et d'autres facteurs, influencent les échanges ioniques eau-

sédiment. La détermination du taux d'échanges ioniques eau-sédiment est importante dans le choix des méthodes de dépollution[90].

L'émission énorme des gaz à effet de serre, surtout le dioxyde de carbone et la diminution des espaces verts, sont les causes principales du changement climatique. C'est ainsi que des perturbations climatiques et une diminution de la quantité de précipitation et du ruissellement ont été observées. En plus, le développement démographique et industriel est accompagné par une consommation développée des eaux superficielles et souterraines. En conséquence, on observe dans les dernières années, une diminution dans les niveaux des eaux superficielles et souterraines. Cette diminution, est accompagnée par une concentration supplémentaire des polluants dans les courants d'eau[91].

La pollution, le changement climatique et les problèmes qui les accompagnent, ont un impact environnemental remarqué surtout sur la diversité animale et végétale dans les courants d'eaux et dans ces environs[92].

La contamination des eaux est un souci majeur pour la protection des écosystèmes et des ressources en eaux[93]. Elle est l'objet de beaucoup d'études aussi bien au niveau des eaux superficielles que souterraines. Boschet (2002), concluait que la contamination par tous les intrants peut s'exprimer de manières différentes selon l'eau et son emplacement. Pour l'eau superficielle, elle peut être :

1- Directe et volontaire par une utilisation normale des produits phytosanitaires et autres produits à des fins de la vie courante (lutte anti- acridienne, utilisation des pesticides ou engrais dans l'agriculture, eaux usées des usines, etc...).

2- Indirecte par ruissellement ou transfert des produits suite à leur épandage dans le milieu ou drainage des eaux usées.

I.3.4 Nature des polluants :

La qualité de l'eau joue un rôle essentiel dans le cycle de l'eau[94]. Les eaux polluées peuvent être impropres à la plupart des types d'utilisations, de la boisson à l'irrigation et aux sports nautiques, et ne peuvent être utilisées qu'après des coûts de traitement coûteux. Il existe différents types de pollution qui menacent tous la santé publique[95] Table I-3, soit directement (en buvant ou en étant en contact avec l'eau), soit indirectement (les eaux souterraines et les sols sont également pollués, l'eau d'irrigation de mauvaise qualité contamine les cultures, puis les êtres humains, conduisant à carences et maladies à long terme).

Table I-3 Types, sources, impact et paramètres indicatives de pollution de l'eau

Water Pollutions	Causes/Sources	Impacts	Indicative Paramètres
Biological (bacteriological)	<ul style="list-style-type: none"> • Untreated Sewage from Urban Areas • Fertilizers from Agriculture 	<ul style="list-style-type: none"> • Threatened public health—dysentery and water-borne diseases • Deteriorated/decreasing aquatic life & vegetation • Algae growth 	<ul style="list-style-type: none"> • Fecal Coliforms, Total Coliforms • Dissolved Oxygen (DO) • Nitrogen and Phosphorous
Chemical	<ul style="list-style-type: none"> • Leaching from Dumpsites 	<ul style="list-style-type: none"> • Threatened public health – water-borne and chronic or long-term diseases Degraded aquatic life & vegetation 	<ul style="list-style-type: none"> • Total Dissolved Solids (TDS) • Nitrogen and Phosphorous

	<ul style="list-style-type: none"> • Untreated Sewage from Industries • Fertilizers & Pesticides from Agriculture 	<ul style="list-style-type: none"> • Accumulation of contaminants in soils and fish • Algae growth 	<ul style="list-style-type: none"> • Metals (cadmium, manganese, mercury, etc.)
Physical	<ul style="list-style-type: none"> • Garbage dumping • Quarries • Untreated Sewage • Infringements and lack of river maintenance 	<ul style="list-style-type: none"> • Turbidity (unclear water) • Poor smell and taste, repulsive visual aspect • Deteriorated aquatic life • Unstable river banks 	<ul style="list-style-type: none"> • Total Suspended Solids (TSS) • Odor & Color

La surveillance de la qualité de l'eau est essentielle pour protéger la santé publique [96], localiser les sources de pollution, identifier les tendances au fil du temps, construire et exploiter des installations de traitement, développer et mettre en œuvre des activités de prévention et d'atténuation de la pollution et évaluer leur impact.

Malheureusement, peu d'activités de surveillance de la qualité de l'eau sont actuellement menées au Liban en général et en particulier dans le bassin du fleuve Litani, en raison du manque de personnel et de ressources au sein des organismes gouvernementaux, d'une coordination inadéquate entre ces

derniers ainsi que de rôles et de responsabilités peu clairs. Les efforts de surveillance de la qualité de l'eau les plus récents dans le bassin du fleuve Litani étaient des efforts uniques sans suivis ni répétitions, et généralement financés par des donateurs [97]. Étant donné que les lieux et les méthodes d'échantillonnage variaient, la comparaison entre ces résultats est difficile. De nos jours, seule la LRA a une activité de surveillance soutenue (mais limitée) avec environ 20 spots de surface et puits échantillonnés chaque mois dans le bassin supérieur de la rivière Litani

Toutes ces contaminations peuvent être classées en trois types de pollutions liés aux modes de propagation : les pollutions accidentelles, pollutions diffuses et pollutions anthropiques.

1.3.4.1 Les pollutions accidentelles

Le plus souvent les pollutions ponctuelles se trouvent liées aux grandes activités industrielles ou agricoles. Elles peuvent aussi résulter d'un accident de transport ou d'une catastrophe naturelle sur des usines ou stockages des produits qui vont engendrer cette pollution.[98]

1.3.4.2 Les pollutions diffuses

Elles résultent de la propagation de l'agent responsable de la pollution par différents vecteurs de transport, qu'il soit utilisé de façon habituelle pour des usages courants ou non. Le lessivage des pesticides du sol et le transport des matières actives par le vent dans les zones parfois même inaccessibles en sont des exemples concrets et très inquiétants (présence de la pollution de certains pesticides au pôle Nord). Pollution peut être définie comme une conséquence d'une cause bien précise : la pollution agricole, la pollution urbaine et la pollution industrielle. Cette classification donne l'origine de la pollution qui pourra sous-entendre pour les spécialistes du domaine l'ensemble des intrants dans le milieu en fonction de la zone en question, du mode de vie de sa population et de son développement. Ainsi la pollution agricole est responsable de l'augmentation des nitrates dans les eaux de surfaces en grande partie.[99]

I.3.5 Les types de pollution

La pollution de l'eau est l'ensemble des nuisances auxquelles peut être exposé son usager et les organismes aquatiques[100]. La pollution engendrée peut être d'ordre physique (radioactivité, élévation de la température...), chimique (rejets agricoles, industriels et urbains) et microbiologique (rejets urbains, élevage...). Pour mieux évaluer la pollution, il existe des paramètres qui permettent d'estimer l'ampleur de celle-ci en fonction de son type.

I.3.5.1 La pollution chimique

Elle est due à l'entrée d'un élément (ou plusieurs) indésirable dans la composition chimique de l'eau initialement destinée à un usage bien précis.

Deux types de paramètres permettent d'évaluer l'état de cette pollution :

- Les paramètres globaux : ils résultent de la juxtaposition des effets de plusieurs substances en même temps, exemple : pH, conductivité, turbidité, Demande Chimique en Oxygène (DCO), etc...

La DCO d'une eau représente l'ensemble de toutes les espèces chimiques oxydables, organiques et minérales, dissoutes ou en suspension.

Les paramètres spécifiques qui caractérisent un composé particulier ou plusieurs de propriétés chimiques semblables.[101]

Le choix le plus difficile reste incontestablement la définition des paramètres à suivre en vue d'évaluer cette pollution ; en effet le but de tout ce travail est de pouvoir qualifier et quantifier la pollution en vue de mettre en place les solutions appropriées ou mieux de pouvoir la prédire à temps pour mettre en place les dispositions préventives qui s'imposent.

I.3.5.2 La pollution physique

La pollution physique est liée aux facteurs influents sur l'état physique de l'eau [102] tels que la température, le pH, la conductivité (Ec) le solide total dissous (TDS), la présence des particules ou mousses et le changement de l'effet réfractaire de l'eau.

1.3.5.3 La pollution microbiologique

La pollution microbiologique résulte de la présence dans l'eau de microorganismes qui sont véhiculés par l'eau et sont responsables de beaucoup de maladies hydriques [103]. L'eau peut être un milieu favorable aux développements des bactéries et virus nuisibles à la santé humaine des populations qui l'utilisent pour leurs besoins. Les bactéries pathogènes sont responsables des principales maladies hydriques. Les parasites sont eux aussi la cause de plusieurs autres maladies (hépatite infectieuse, méningite, etc...).

Même si les ressources en eau (de surface et souterraine) dans le bassin du Litani sont fortes, plus de 70% de ces ressources sont sous stress de la pollution.

De toute évidence, le cours du fleuve principal dans la plaine de la Bekaa est contaminé. Par exemple, en tenant compte des niveaux de bactéries et des métaux à partir des sites sélectionnés, plus de 90% de sa longueur est contaminé. La pollution affecte le cour de l'eau et les sédiments. La situation de la pollution de l'eau dans la zone côtière est meilleure que celle dans la Bekaa. Cela peut être attribué à ce qui suit :

1. La taille de la population est plus petite dans la zone côtière (sous-unité), les activités agricoles de ce fait sont diminuées (avec une agriculture extensive dans la Bekaa).
2. La probabilité de l'effet de moins de boues et les effluents d'eaux usées déversés dans la rivière, en raison de stations d'épuration des grandes villes dans la région.
3. Le gradient de pente douce dans la plaine de la Bekaa diminue l'énergie de l'eau courante, réduit ainsi la turbulence de l'eau et l'augmentation de la sédimentation.

4. L'existence de systèmes de fractures dans la zone côtière à forte intensité a donné lieu à de nombreuses sources pour évacuer l'eau directement dans le cours d'eau, ce qui contribue à accélérer la vitesse de l'eau et de renouveler sa qualité.

1.3.5.4 Les pesticides

Il est difficile de déterminer l'origine exacte de l'ensemble des pesticides utilisés dans la partie supérieure de Litani pour la simple raison qu'ils sont d'origines multiples et qu'ils ne sont pas déclarés le plus souvent à leur arrivée dans le pays. Les pesticides sont utilisés essentiellement dans l'agriculture et la lutte anti acridienne; cependant l'usage dans les foyers n'est pas négligeable et expose davantage les personnes aux méfaits des produits phytosanitaires. Les pesticides qui peuvent se retrouver dans les trois compartiments de l'environnement (l'air, l'eau et le sol) sont aujourd'hui responsables d'une gamme très variée de cancers affectant diverses parties de l'organisme humain. Dans l'agriculture, les pesticides trouvent leur emploi dans la culture du blé, la culture des légumes et des arbres fruitiers [104]. Durant cette étude, on met en considération les effets indirects des pesticides et la source d'augmentation des pollutions. Les pratiques culturelles jouent un rôle très important dans le devenir des pesticides dans l'environnement. Dans la partie supérieure du Litani la majorité des aménagements des terrains agricoles sont effectués par l'agriculteur lui-même. De ce fait, ils sont à la base de beaucoup de problèmes entre les agriculteurs, dont le plus apparent reste l'irrigation et fait oublier le problème de pollution diffuse que ce désordre peut entraîner

1.3.5.5 La pollution urbaine

Les déchets continuent à être rejetés dans la nature sans aucun traitement. Ce comportement menacera la vie de tous et peut-être assiste-t-on déjà aux conséquences de cette attitude car la nouvelle génération en a pris conscience. Les rejets urbains par temps de pluie sont susceptibles de

modifier considérablement les conditions hydro-biologiques du milieu récepteur selon deux mécanismes [105] :

- impact volumique dû aux apports importants en milieu urbain et à la rapidité de ces apports ;
- impact qualitatif par pollution massive et subite du milieu récepteur : apport d'une charge importante, dégradation bactériologique du milieu et introduction de micro-polluants (fraction pluviale).

1.3.5.6 La pollution agricole

La rive du fleuve est à vocation agricole [106]. En effet, différents types de cultures essentiellement céréalières, en particulier les pommes des terres sont pratiquées dans la région pour parvenir à l'autosuffisance alimentaire de la population.

Les agriculteurs utilisent divers produits phytosanitaires et engrais pour améliorer leur rendement ou du moins pour subsister pour la majorité. L'usage de ces produits engendre une pollution chronique toxique (organochlorés, organophosphorés et organométalliques) et diffuse tout le long du fleuve. Les rejets de périmètres irrigués vont directement dans le fleuve ou sont évacués à côté de ce dernier. Cette attitude ne permet pas de protéger le fleuve car le lessivage est important en période de pluie et le transport des particules du sol par le vent après leur assèchement paraît comme une autre source potentielle de contamination du fleuve [107]. Bien sûr le lessivage et le transport par le vent sont conditionnés par plusieurs paramètres dont notamment la nature physico-chimique du sol et la présentation de la formulation du pesticide.

I.4 Cadre géographique du Liban

Le Liban est situé sur les côtes est de la Méditerranée, avec une superficie de 10452 Km², est le second plus petit pays du Proche- Orient et du monde arabe avec coordonnées (39°00" et 40°65") de longitude et (36°70") de latitude nord, s'étend sur environ 180 km du nord au sud et sur 50 km de l'ouest à l'est. Cette surface, présente une grande diversité géographique et humaine.

De part sa position géopolitique, le Liban a toujours été au carrefour de trois continents et le passage obligé entre l'Occident et le monde arabe, bénéficiant au surplus d'un accès vers l'Asie centrale et la Russie.

Figure
Carte



I-4

Géographie du Liban (World Atlas,2020)[108]

Il englobe plusieurs zones géographiques extrêmement différentes :

- La région côtière de 220 km, très étroite et découpée, rassemble les villes principales.

- À l'intérieur, la chaîne du mont Liban comprend une série de hauts plateaux et sommets où culmine le Qurnat al-Sawda à plus de 3000 m.
- Plus à l'est, la chaîne redescend à pic sur la plaine de la Beqaa, qui longe la côte en parallèle sur 150 km à une altitude de 1000 m.

Le Liban compte plus de 6.5 millions d'habitants au début de 2020[109]. La population du Liban équivaut à 0,09% de la population mondiale totale. Le Liban occupe la 109 place dans la liste des pays (et dépendances) par population. La densité de population au Liban est de 667/km² (1 728 habitants par km²).

78,4% de la population est urbaine (5,353,116 personnes en 2020). L'âge médian au Liban est de 29,6 ans.

I.5 La cadre géologique du Liban

Le littoral a une longueur de 225 kilomètres et les frontières terrestres du Liban totalisent 454 kilomètres.

Le Liban est divisé en huit gouvernorats (Muhafazat):

Beyrouth, Mont-Liban, Nord-Liban, Sud-Liban, Nabatieh, la Beqaa, Baalbek-Hermel et Akkar.

Chaque gouvernorat est dirigé par un Muhafiz (gouverneur) et est divisé en districts (cazas ou aqdiya).

Il existe cinq régions importantes :

- 1- La zone littorale qui comprend la côte, la plaine littorale et les contreforts de la chaîne Occidentale).
- 2- Les zones de moyenne et de haute altitude du Mont Liban.
- 3- La plaine de la Beqaa
- 4- L'Anti Liban
- 5- Le Liban sud

I.5.1 La zone littorale

I.5.1.1 La côte

La côte libanaise s'étend sur 220 km entre Arida (au nord) et Ras El-Naquoura (au sud), et caractérisée par des falaises profondément incisées qui donnent la preuve d'une érosion accélérée et récente. Au pied des basses falaises, s'étendent des plages de graviers souvent bordées par des plages de sable au côté du large, dont les longueurs varient et qui constituent 20% de la côte entière.[97]

I.5.1.2 La plaine littorale

La plaine littorale est très étroite sur une grande partie de sa longueur (7 km en moyenne), mais s'élargit pour former la plaine sédimentaire du Akkar au nord jusqu'à l'embouchure du fleuve Nahr el Kabir où elle peut atteindre 30 km de large et une altitude de 500 m. La plaine se rétrécit entre Tripoli et Jabal Terbol, et devient éventuellement très étroite (3 km en moyenne) interrompue par des crêtes de la chaîne du Mont Liban. Cette bande étroite s'élargit légèrement vers Beyrouth et la plaine de Choueifat, puis dans la plaine de Saida d'où elle s'étend ininterrompue avec une largeur moyenne de 7 km jusqu'à la plaine de Tyr. Cette plaine est ensuite interrompue par une série de crêtes jusqu'à la frontière sud.

I.5.1.3 Le Mont Liban

La chaîne du Mont Liban s'étend du Nord de Jabal Akkar jusqu'au Sud, atteignant les altitudes de 3088 m (Kornet el Saouda) à 1809 m (Jabal Niha) après lequel les montagnes cèdent leur place aux collines de Jabal Amel. La longueur totale de la chaîne est de 160 km, et sa largeur varie de 25 km dans la partie centrale à 40 km au nord

I.5.2 La zone d'altitude moyenne

La zone d'altitude moyenne de la chaîne du Mont Liban est la partie la plus diversifiée du pays. Après une élévation raide des contreforts, un nombre de petits plateaux forment une graduation

intermédiaire entre la mer et le sommet. La face Ouest de la chaîne est découpée par une série de vallées étroites et parallèles qui s'inclinent vers la mer emportant fleuves et rivières.

Les pentes du côté Est dominant la plaine de la Beqaa et sont généralement plus raides que celles de l'Ouest. Elles contiennent un nombre limité de rivières saisonnières formées en hiver par la fonte des neiges.

Le Mont Liban est divisé latéralement par le col naturel de Dahr el Baidar (1500m), en direction Est-Ouest. La subdivision au nord forme une région extrêmement large qui comprend les plus hautes élévations, elle est facilement remarquée par ses sommets tabulaires qui permettent d'avoir un grand nombre de sources dans les altitudes moins élevées. Vers le sud de Dahr el Baidar, la chaîne est en quelque sorte plus étroite et élongée, offrant - par ce fait - une moindre résistance à l'érosion.

I.5.3 La plaine de la Bekaa

La plaine de la Bekaa est une dépression située à une altitude de 900 m en moyenne, et mesure 120 km (N-S) sur 8-12 km en moyenne (E-O), avec 25 km de largeur au niveau de Hermel.

Les pentes sont très douces, avec une crête située près de Baalbek à 1100 m. où la plaine se mêle aux contreforts de l'Anti - Liban. La plaine contient les sources de deux fleuves, l'Assi et le Litani, qui coulent respectivement vers le nord et le sud.

I.2.3- L'Anti-Liban

Cette chaîne de montagnes est moins élevée que celle du Mont Liban, mais leurs traits sont en général identiques. La zone de haute altitude est un haut plateau desséché dont la largeur est de 30 km avec une altitude moyenne de 2300 m (dont le maximum est de 2616m à Tallat Moussa). Le plateau s'incline en pente vers le sud atteignant une haute plaine (1400 m) qui crée une division naturelle entre la partie Est et Jabal Al-Cheikh. L'Anti Liban ne jouit pas de vallées profondes, comme celles qui caractérisent la chaîne du Mont Liban. Les chaînes montagneuses Jabal Al-Cheikh s'étendent sur quelques 100 km, de la région de Yanta au nord jusqu'à Chebaa au Sud. Ses crêtes et

pentent forment un bassin versant qui nourrit les fleuves coulant vers la Beqaa (Ouest), le lac Houla (Sud) et la plaine de Aaouej en Syrie (Est).

I.5.4 Le Liban sud

Le plateau sud est situé au sud de la chaîne du Mont Liban, et est une masse de terre traversée par un grand nombre de fleuves coulant de l'Est à l'Ouest. Le relief est tabulaire dans sa partie Ouest, rond au milieu, raide vers l'Est où il rejoint Jabal Al-Cheik.

I.6 Le Climat du Liban

Le climat du Liban est typique de la région méditerranéenne avec quatre saisons distinctes qui englobent une période pluvieuse qui dure généralement de novembre à mars, suivie d'une sécheresse période au cours de laquelle très peu de précipitations se produisent. Précipitations annuelles sur le littoral plaine varie entre 600 mm et 800 mm. Le Mont Liban peut recevoir jusqu'à 2000 mm de précipitations par an, mais une plage typique va de 1000 mm à 1400 mm. Central et le nord de la Bekka reçoit environ 200 mm à 600 mm de précipitations par an, tandis que pour les parties sud de la plaine, il est de 600 mm à 1000 mm. Dans son dernier rapport d'évaluation, le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) déclare que la fréquence et l'intensité de la sécheresse dans la région méditerranéenne augmenteront probablement au début et à la fin du XXI^e siècle (GIEC 2013)[110]. Le même rapport prédit que les précipitations en Méditerranée orientale de la période 1986–2005 à 2081–2100 diminueront probablement en moyenne entre 20% et 30%, couplé avec une augmentation de la température de 2°C à 3°C. Selon les prévisions climatiques du modèle PRECIS, d'ici 2040, la température augmentera d'environ 1°C sur la côte libanaise à 2°C sur son continent ; d'ici 2090, ces températures seront respectivement de 3,5°C à 5°C plus élevées.

Les précipitations sont également diminuées de 10 à 20% d'ici 2040 et de 25 à 45% d'ici 2090, par rapport aux valeurs actuelles. Cette combinaison de beaucoup moins de précipitations et de des conditions plus chaudes se traduiront par un climat chaud et sec prolongé. Température et les précipitations extrêmes s'intensifieront également. Les périodes de sécheresse, dans tout le pays, deviendront neuf jours de plus d'ici 2040 et dix-huit jours de plus d'ici 2090.[111]

I.6.1 La température

La moyenne annuelle de température sur le littoral entre 19,5°C et 21,5°C ; Le mois le plus froid est janvier (moyenne de température journalière tombant jusqu'à -4°C dans les montagnes et 7°C sur la côte) la température diminue environ 3°C pour chaque 500m d'altitude, atteignant 15°C à 1000m et 9°C à 2000m. Les mois les plus chauds sont juillet et août (moyenne de température journalière augmente jusqu'à 28°C dans les montagnes et 33°C sur la côte).

D'après La Figure I-5 ci-dessous qui représente la variation de la température moyenne au Liban entre 1810 et 2018. La courbe représentant les groupes des moyennes des températures de chaque 10 années groupée (10-year moving average) montre une augmentation de 2,5 °C en 200 ans. Ce graphique montre que la hausse thermique se poursuit au fil du temps et augmentera encore dans les années à venir et que la pente devient plus importante dans les dernières années.

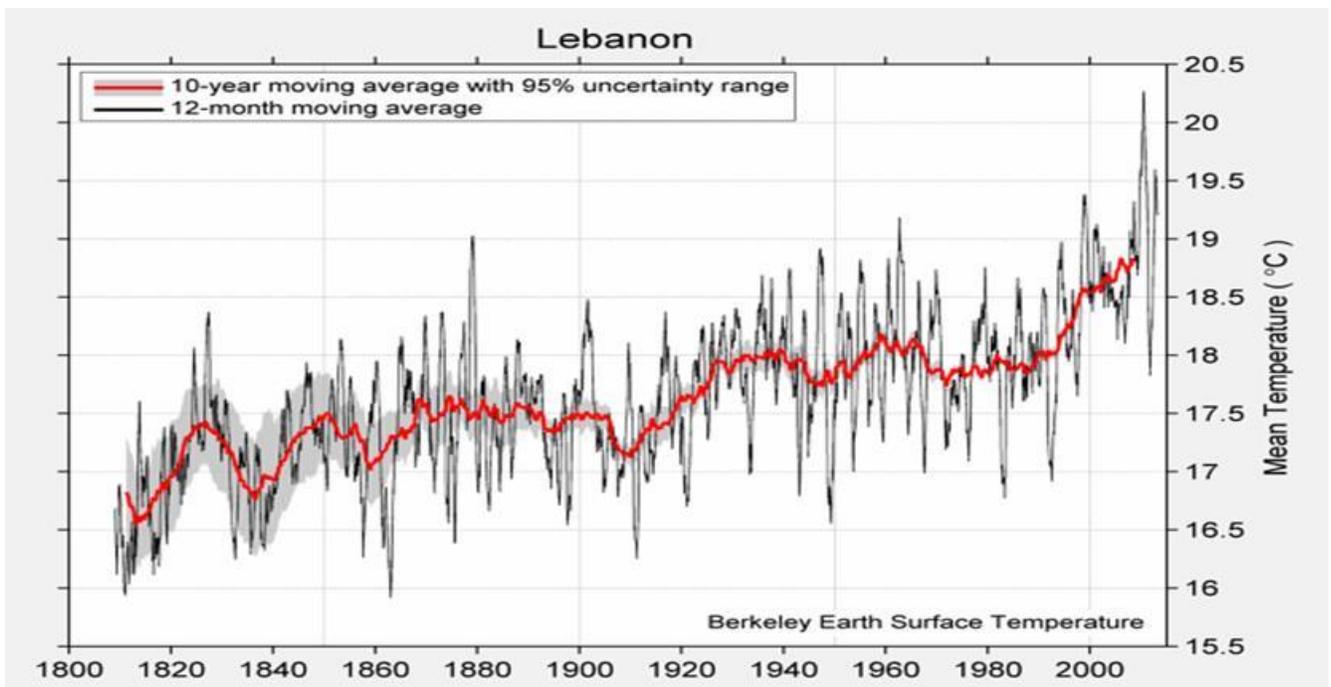


Figure I-5 La température moyenne en Liban (1810-2018) [112]

I.6.2 L'humidité

L'humidité relative présente une moyenne d'environ 70%. Les fluctuations sont importantes dans les montagnes et varient entre 70-75% en hiver à 50-60% en été, à la Bekaa, les valeurs de l'humidité en hiver sont plutôt élevées (environ 80%) mais elles diminuent nettement en été pour atteindre la valeur moyenne de 48% au nord de la Bekaa

I.6.3 Les précipitations

Le Liban a une moyenne élevée de pluie 840 mm par an, sa topographie provoque de grandes variations de précipitations en fonction des régions.

Ainsi, la moyenne annuelle de pluie sur le littoral varie entre 700-1000 mm et augmente vers la direction sud-nord. Le Mont Liban forme une barrière contre les mouvements de la pluie et les précipitations peuvent atteindre plus de 1400 mm par an (2000 mm à Bcharré) dont la majorité est sous forme de neige. Les chutes de pluie diminuent rapidement dans les versants EST de la chaîne

du Mont Liban et atteint seulement 600mm. Les précipitations dans la plaine de la Bekaa varient entre 800 mm dans la Bekaa du sud (Karaoun), à moins de 200 mm à l'extrême nord-est de la plaine (Arsal, Qaà). Les précipitations dans les chaînes de l'Anti-Liban sont environ 600 mm, et s'élèvent jusqu'à plus de 1000 mm à Jabal Al-Cheikh.

La Figure I-6 est une représentation du volume des précipitations moyennes par année entre 1900 et 2017. Cette figure montre, qu'au cours des 100 dernières années, le volume moyen annuel de précipitation dans la région de Litani diminue de manière significative avec les années. On observe une diminution de 100 mm de précipitation moyenne entre 1900 et 2017. Cette diminution est due à la diminution du nombre des années riches en précipitation et de son volume dans ces années d'une part et une augmentation remarquable du nombre des années sèches qui arrive jusqu'à 4 années successives

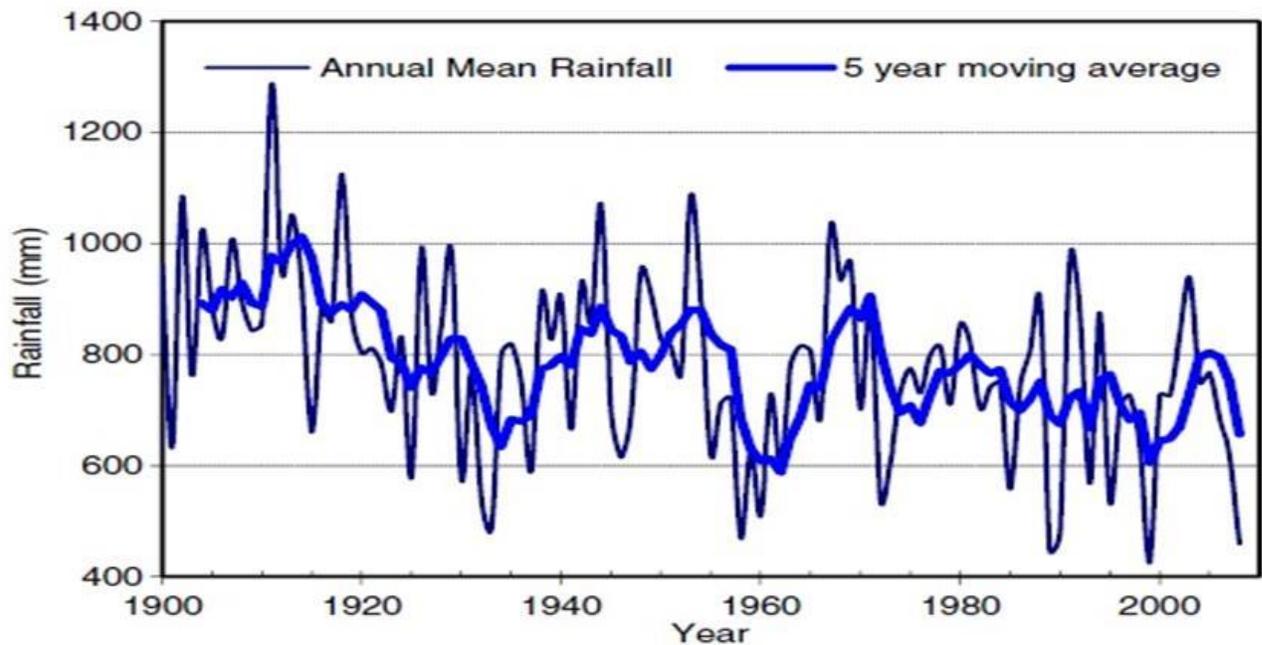


Figure I-6 la précipitation moyenne en Liban (1900-2018)[112]

I.7 Description générale de l'état de l'eau fluviale au Liban :

Le Liban se trouve dans la zone de la Méditerranée orientale. Son climat est caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers courts et humides. La majeure partie de la pluie du pays se situe entre décembre et février, et la saison sèche se produit entre juin et août. Le volume annuel moyen des précipitations est estimé à 700 à 1 100 mm dans la zone côtière, 200 à 800 mm dans la vallée de Beqaa et près de 2000 mm dans les montagnes. La précipitation annuelle est capable de générer un débit annuel moyen de 8600 millions de m³, qui alimentent 40 principaux cours d'eau et rivières (dont 17 rivières vivaces) et plus de 2000 ressorts.[113]

La rivière Litani est la plus longue rivière au Liban, elle forme proche de 30% du débit total de l'eau de surface dans le pays. Au cours des dernières décennies, la qualité de l'eau du bassin supérieur du Litani s'est détériorée [114]. Malheureusement, cette ressource est soumise à une forte pollution exercée par le développement urbain, industriel et agricole concentré dans ses zones côtières. L'étude du problème environnemental lié à la pollution de l'eau de cette rivière, notamment du lac Quaroun n'est pas nouvelle. Les origines de la pollution, ses effets sur le milieu naturel ainsi que ses conséquences sur la qualité de l'eau sont désormais bien documentés. L'importance du lac Quaroun réside dans sa contribution à l'irrigation des terres agricoles dans le sud du Liban et dans la région de la Bekaa [115].

Bien que les aspects environnementaux au Liban soulèvent des problèmes divers, une base commune repose principalement sur la pollution d'eau au Liban. Depuis plusieurs décennies, la pollution de l'eau de la rivière Litani occupe une place centrale dans le domaine de recherche au Liban. Plusieurs auteurs ont récemment développé des modèles et des algorithmes avancés pour l'analyse et le traitement de la pollution des rivières dans différents pays au monde tandis qu'au Liban des études préliminaires ont été effectuées récemment. D'où notre principal objectif dans cette

thèse est d'étudier la qualité de l'eau de la rivière Litani qui est considérée comme source d'eau principale au Liban et qui reflète des caractéristiques particulières incluant des spécificités relatives à la dimension spatiale du développement économique et agricole, en particulier à la région Bekaa. Plusieurs travaux dans la littérature ont été effectués sur la qualité de l'eau en mesurant plusieurs paramètres tels que les solides dissous totaux, la concentration de sulfate de phosphate, l'ammoniac et d'autres paramètres. Plusieurs chercheurs ont étudié l'effet des facteurs saisonniers sur la concentration de polluants dans les eaux de surface, en particulier le ruissellement pendant les périodes d'inondation [116],[117],[118],[119]. Nous présentons dans la suite une vue générale sur les caractéristiques de la rivière Litani ainsi de la région Bekaa et du Lac Quaroun, et ensuite nous abordons les détails et la structuration des chapitres.

I.8 Description de la rivière Litani

La rivière Litani est la plus grande et la plus longue rivière au Liban Figure I-7, générant environ 30% du débit total d'eau de surface de toutes les rivières qui circulent dans les territoires libanais. Elle provient de la vallée de Beqaa, à 10 km à l'ouest de la ville de Baalbeck, des sources d'Al Oleic à Hosh Brada (altitude 1000 m) et s'écoule vers le sud pour se déverser dans la Méditerranée, à 7 ou 8 km au nord de la ville de Tyr, dans le sud du Liban. Les plaines de Beqaa, où coule le lituanien supérieur, se situent entre le pied des pentes du Liban et les montagnes anti-Liban. La superficie totale de drainage du bassin est d'environ 2175 km² avec une longueur de canaux d'environ 170 km et un débit annuel de 750 millions de m³[113].

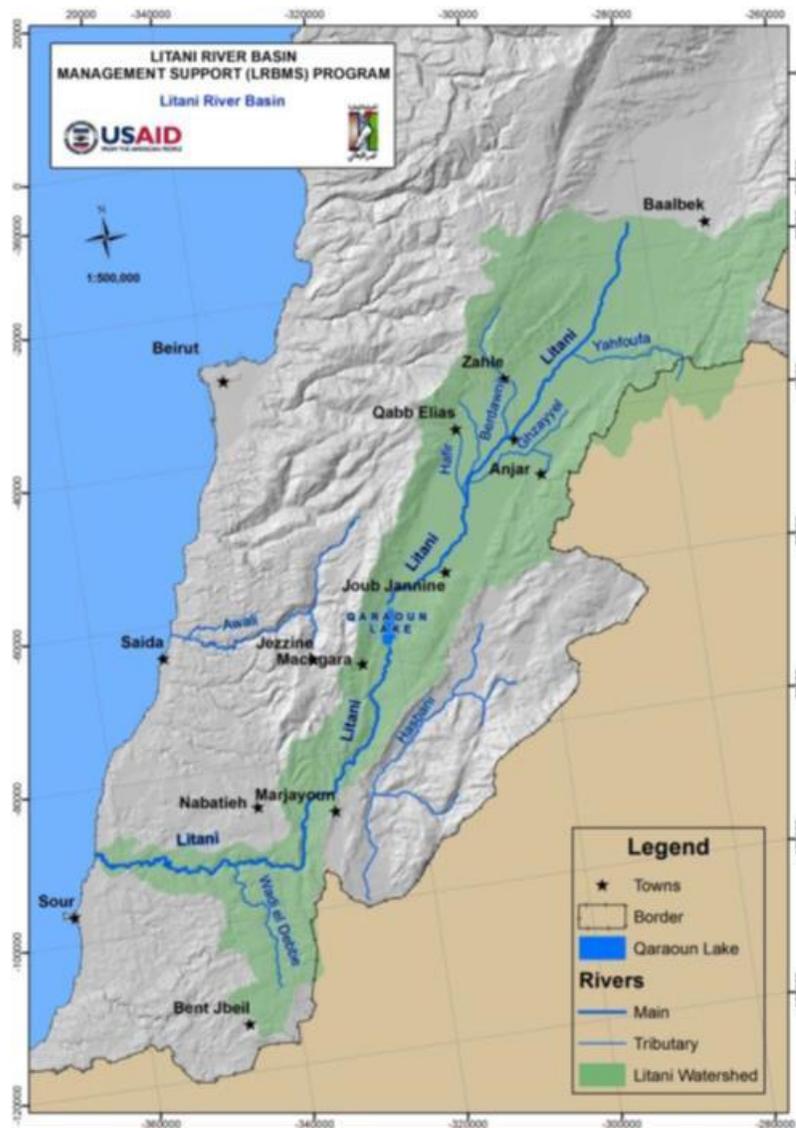


Figure I-7 Carte de bassin de la rivière Litani - Liban

Le bassin de Litani est divisé en deux parties

Figure I-8, Le bassin supérieur et le bassin

inférieur (et compte neuf affluents, l'affluent le plus important est la rivière Ghozail, qui comprend six affluents supplémentaires [120]).

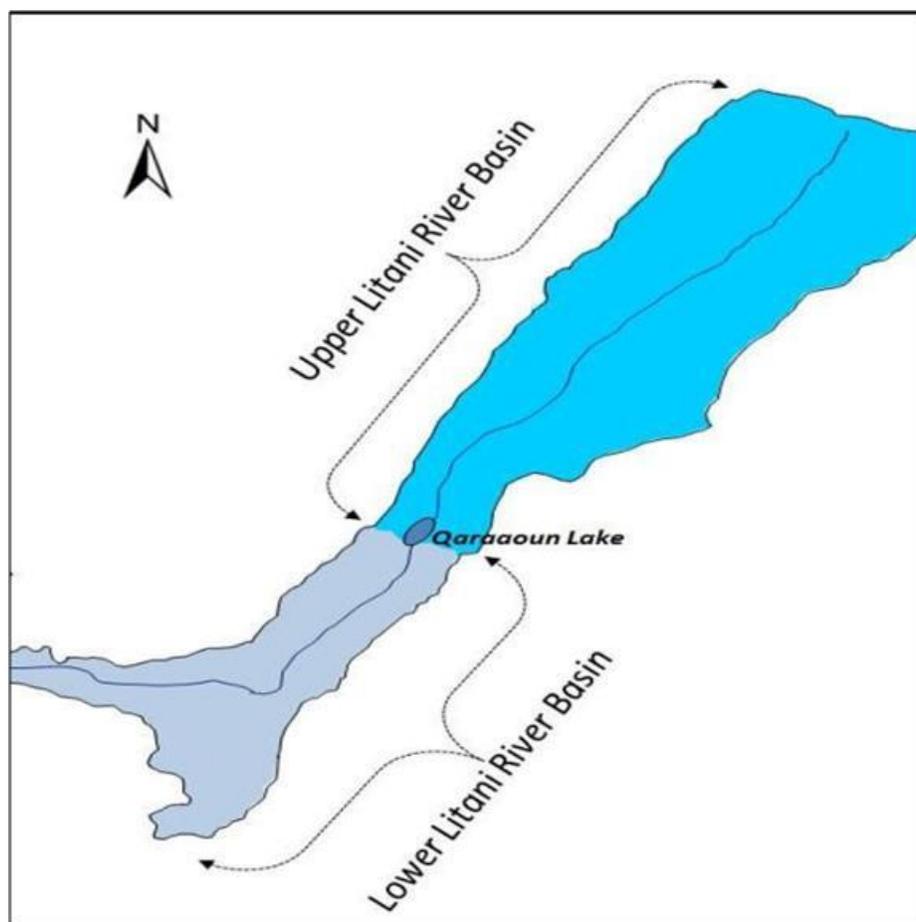


Figure I-8 Le bassin versant Litani dans une carte topographique du Liban

1- Le bassin supérieur couvre environ 1500 km² et occupe environ la moitié sud de la vallée de la Bekaa ; il se place entre les chaînes du mont Liban et anti-Liban (les deux culminant plus de 2000 m) et le fond de la vallée se situe entre les altitudes 800 m et 1000 m, il occupe environ 70% du bassin total de la Litani dans cette zone, la rivière Litani reçoit plusieurs affluents mineurs qui sont :

- La Hala / Yahfoufa et Ghzayel au nord-est, traversant respectivement Rayak et Anjar / Bar Elias;
- Les Berdaouni et Hafir au nord-ouest, traversant respectivement la ville de Zahleh et Qabb Elias;

2- Le bassin inférieur couvre environ 500 km²; il ne fait que quelques kilomètres de large et est contraint entre la pointe sud du mont Liban et les collines Marjayoun qui le séparent du bassin versant de Hasbani à l'Est; le Litani inférieur est rejoint par un seul affluent important, Wadi el Debbe; la rivière y présente une pente plus raide et descend à moins de 60 km d'une altitude de 800 m jusqu'à son débouché au niveau de la mer.

Les ressources en eau du bassin du fleuve Litani ont été exploitées dans les années 1960 avec la construction du barrage de Qaraoun, une structure en enrochement de 60 mètres de haut qui barre la vallée de la Bekaa à son extrémité sud, où se rencontrent le mont Liban et les montagnes anti-Liban[121]. Le réservoir de Qaraoun stocke les apports annuels du fleuve Litani et permet leur détournement à travers une cascade de trois centrales hydroélectriques (Markabe-Joun-Awali) qui produisent ensemble environ 8% des besoins énergétiques du Liban. Les volumes détournés sont ensuite libérés vers l'ouest dans la rivière Awali-Bisri.

Notons que la plupart des activités humaines sont situées dans le bassin supérieur, avec les principales villes de Baalbeck (située sur la ligne de partage des eaux avec la rivière Assi), Zahleh, Anjar, Bar Elias, Joub Jenine, Machghara et Qabb Elias. La rivière et les aquifères associés fournissent de l'eau à 60 000 hectares irrigués ainsi que de l'eau potable à près d'un demi-million d'habitants. En aval du réservoir, très peu d'activités humaines se situent dans le bassin du fleuve même, même s'il existe des détournements pour alimenter de petites zones irriguées et éventuellement plusieurs milliers d'hectares de terres irriguées dans la plaine côtière (zone de Kasmieh, au sud).

Le réservoir Qaraoun divise le bassin en deux entités distinctes avec des conditions climatiques contrastées : Le bassin supérieur est considérée comme montagneuse, et le bassin inférieur est presque en zone côtière. Cela donne l'occasion d'étudier et de comparer les réponses hydrologiques

du changement climatique d'un bassin hydrographique divisé en deux caractéristiques orographiques hétérogènes, et qui illustre parfaitement l'importance du contrôle des caractéristiques locales.

Par conséquent, puisque le bassin supérieur est dominé par une zone d'élévation relativement forte, il devrait connaître des précipitations et des taux de neige plus élevés, qui affectent la durabilité du flux et la saisonnalité, alors que le bassin inférieur côtier devrait être plus exposé à des températures plus élevées et à des précipitations plus faibles [122].

Le bassin du fleuve Litani supérieur peut être divisé en plusieurs zones en termes de morphologie et d'interférence humaine [113] :

- 1- De Haouch Barada à Rayak, traversant les villages de Haouch Barada, Chmistar, Hizzine, Haouch Sneid, Nabi Chit, Haouch el Rafqa, Bednayel, Temneen, Nabi Ayla et Ablah. Cette zone présente principalement des terres agricoles avec quelques zones urbaines et des bâtiments industriels isolés.
- 2- De Rayak à l'autoroute de Damas à Bar Elias, traversant : Housh Sneid, Fourzol, Delhamiye, Saadnayel, Haouch El Omara. Cette zone présente également principalement des terres agricoles, mais avec une urbanisation croissante et des petites et moyennes industries. Un affluent, le Yahfoufa, rejoint le Litani au sud de Rayak.
- 3- De Bar Elias à Mansoura et Ghazze, traversant Marj, Tell El Hakhdar, Haouch El Harime. Cette zone est principalement urbaine avec moins d'activités agricoles. Trois affluents rejoignent le Litani: le Ghzayel rive gauche, le Berdaouni et Hafir rive droite
- 4- De Ghazze au lac Qaraoun, traversant Joub Jenine, Lala, Baloul, Kherbet Kanafar, Saghbine et Qaraoun. Cette zone est principalement agricole.

- 5- Le lac Qaraoun représente une zone différente, ainsi que la rivière Litani inférieure où le bassin versant est limité aux gorges de la rivière (à l'exception de Wadi el Debbe un affluent sud venant de Bent Jbeil au sud).

I.8.1 Caractéristiques du Lac Qaraoun:

Citons quelques caractéristiques du Lac Quaroun (

Figure I-9,

Figure I-10)

- Le plus grand lac artificiel du Liban
- Situé dans la Bekaa occidentale à 800 mètre d'altitude
- Fondé sur le barrage de Qaraoun (rivière Litani) en 1959
- La superficie du lac est d'environ 11.800.000 m² au-dessus du niveau de la mer 858 m (stockage 222 Mm³) et 5.000.000 m² au-dessus du niveau de la mer 838 m (stockage 53 Mm³)
- La capacité statique de stockage du lac est d'environ 220 millions m³[123].



Figure I-9 Carte de Lake Qaraoun



Figure I-10 Bassin
Versant de lake Qaraoun [113]

I.8.2 Barrage de Qaraoun ou « Barrage Albert Naqash»:

- Le barrage mesure 60 mètres de haut, 1090 mètres de long et 162 mètres de large au maximum[124].Figure I-11,
- Figure I-12

- La taille globale du barrage est d'environ 2 millions de m³ ;
- Structure : il s'agit d'un barrage en enrochement constitué de débris rocheux empilés avec une couche de rochers pavés ;
- Tuiles étanches : en béton armé dans la façade avant du barrage, avec une épaisseur variant entre 50 cm dans la partie inférieure du barrage et 30 cm dans la section supérieure de celui-ci. Ces tuiles occupent une superficie de 47000 m² et elles sont liées les unes aux autres par un matériau en caoutchouc appelé WATER STOP (épaisseur 10 mm). Les espaces laissés entre les carreaux sont remplis par des matériaux isolants à base d'asphalte[125][86], [126].



Figure I-11 Barrage de Lake Qaraoun

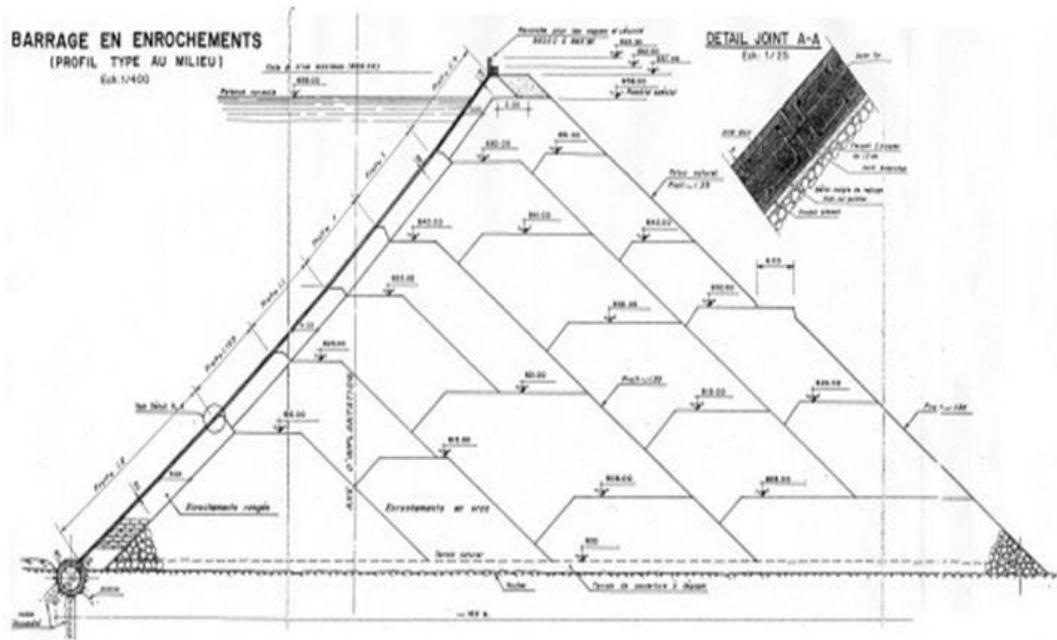


Figure I-12 Barrage de Lake Qaraoun en enrochements (Profil type au milieu)

I.9 Pollution de Litani

Au cours des dernières décennies, la qualité de l'eau du bassin supérieur du Litani s'est détériorée [114]. Malheureusement, cette ressource est soumise à une forte pollution exercée par le développement urbain, industriel et agricole concentré dans ses zones côtières. L'étude du problème environnemental lié à la pollution de l'eau de cette rivière, notamment du lac Quaroun n'est pas nouvelle. Les origines de la pollution, ses effets sur le milieu naturel ainsi que ses conséquences sur la qualité de l'eau sont désormais bien documentés. L'importance du lac Quaroun réside dans sa contribution à l'irrigation des terres agricoles dans le sud du Liban et dans la région de la Bekaa[115].

Le taux et le type de pollution dans différentes stations sont présentés dans les Tableaux (Table I-4, Table I-5, Table I-6) ci-dessous [113] :

I.9.1 Bassin Supérieur

Table I-4 Taux et type de pollution dans différentes stations du bassin supérieur de Litani

Types de pollution	Zone 1:	Zone 2:	Zone 3:	Zone 4:
	Ain el-Sawda -- - Rayak	Rayak --- Bar Elias	Bar Elias --- el-Marj	el-Marj --- Qaraoun Lac
Eaux usées	élevé - très élevé	très élevé	très élevé	faible
Déchets solides	élevé	très élevé	très élevé	moyenne
Agriculture ruissellement	moyenne - élevé	moyenne - élevé	moyenne	élevé
Déchets industriel	très élevé	élevé - très élevé	moyenne	faible

I.9.2 Les affluents du Litani :

Table I-5: Taux et type de pollution dans différentes stations en affluents du Litani.

Types de pollution	Berdawni	Ghzayyel	Yahfoufa (Hala)	Hafeer
Eaux usées	Moyenne - élevé	Faible - élevé	Faible – élevé	Faible - élevé
Déchets solides	Faible - élevé	moyenne	Élevé	moyenne

Agriculture Ruissellement	Faible - Moyenne	Moyenne	Moyenne	Faible - élevé
Déchets industriel	Moyenne - élevé	Faible	Faible – élevé	Faible - Moyenne

I.9.3 Lac Qaraoun et Bassin Inférieur :

Table I-6: Taux et type de pollution dans Lac Qaraoun et Bassin inférieur de Litani

Types de pollution	Qaraoun	Bassin Inférieur
Eaux usées	Moyenne - élevé	Faible
Déchets solides	Moyenne - élevé	Faible
Agriculture Ruissellement	Moyenne	Faible
Déchets industriels	Moyenne - élevé	Faible

I.10 Population et utilisation des terres dans le bassin de la rivière Litani

I.10.1 Population

Le bassin du fleuve Litani supérieur couvre la majeure partie du Mohafazat de la Bekaa[97], c'est-à-dire la plupart, sinon la totalité, des Cazas de la Bekaa occidentale et de Zahleh, ainsi qu'un tiers du Caza de Baalbeck et une petite partie du Caza de Rachaya. Le bassin inférieur du fleuve Litani couvre des zones mineures des cazaas de Bent Jbeil, Jezzine, Hasbaya, Marjayoun, Nabatiye, ainsi que Saida et Sour au sud. Il existe environ 250 villages et petites

viles dans le bassin du Litani, dont les principales villes sont: Zahleh, Anjar, Bar Elias, Joub Jenine et Qabb Elias, ainsi que la banlieue sud-ouest de Baalbeck.

Le dernier recensement complet au Liban a été effectué en 1932 et les chiffres actuels de la population sont des estimations qui diffère d'une publication à l'autre. La population du bassin du Litani est ainsi estimée à environ 414 500 habitants en 2010, avec une augmentation annuelle prévue de 1%. La quasi-totalité de cette population réside dans le bassin supérieur du Litani, tandis que le bassin inférieur du Litani ne présente aucune zone urbaine à l'exception de quelques villages et de la ville de Bent Jbeil dans le bassin versant de Wadi El Debbe.

La population du bassin du Litani présente une prévalence de la pauvreté supérieure à la moyenne nationale, la région se classant au troisième rang après les régions de Tripoli-Akkar et Sour. Environ 25% de la population est caractérisée comme pauvre ou très pauvre. Le taux d'emploi est inférieur à 40% (65% pour les hommes, 10% pour les femmes), les principales activités étant les services, le commerce, l'agriculture et les industries [127].

I.10.2 Utilisation des terres.

L'utilisation des terres dans le bassin supérieur de la rivière Litani comprend[86] :

- 1- 50% de terres naturelles, avec des terres rocheuses dénudées, des bois isolés, notamment sur les coteaux du mont Liban et d'Anti-Liban ;
- 2- 40% de terres agricoles, principalement dans la vallée, qui se subdivisent environ en 20% des cultures pluviales (principalement le blé d'hiver), 15% des cultures pérennes (vignobles, oliviers et fruitiers), 5% des cultures d'été (légumes, pommes de terre, pastèques) , tabac, etc.) ;

- 3- 10% zones urbaines et périurbaines, zones industrielles, carrières, routes / autoroutes et autres structures artificielles.

L'utilisation des terres dans le bassin inférieur de la rivière Litani est principalement des terres naturelles, à l'exception de :

- 1- La zone côtière autour de Qasmiye, qui présente une irrigation intensive (notamment des bananes).
- 2- Le bassin versant de Waddi el Debbe, dans lequel il y a quelques villages clairsemés et une agriculture traditionnelle (fruits et oliviers, un peu de tabac).

Le bassin contient deux zones humides importantes (Aammiq et Kfar Zabad) et la partie orientale de la réserve naturelle d'Al Shouf Cedar. La vallée de la Bekaa, dont une grande partie se situe dans le bassin, est considérée comme un couloir biologique important, particulièrement important pour les espèces d'oiseaux migrateurs migrant entre l'Afrique et l'Europe.

I.11 Principaux problèmes et risques menaçant l'eau du fleuve Litani

Les principaux problèmes et dangers affectant l'eau dans le bassin du Litani en particulier et au Liban en général sont :

I.11.1 Exploitation anarchique et abus des ressources en eau

Cette exploitation anarchique est représentée par l'existence de milliers de puits d'eau souterraine dans les bassins liés à l'Autorité ; ces puits consomment la capacité des aquifères par une exploitation excessive de l'eau stockée. Ce phénomène dangereux a nui à de nombreuses sources et

a entraîné une baisse alarmante des niveaux des eaux souterraines suivie d'une baisse des niveaux des eaux de surface.

En raison du manque de contrôle et de l'absence de primauté du droit, des centaines de stations de pompage d'eau ont été établies le long des cours d'eau et des points d'eau ; ces stations ont contribué à la disparition de nombreuses sources et à la détérioration et au rétrécissement de nombreuses rivières permanentes.

Les principaux polluants sont :

- Les eaux usées Figure I-14 et les déchets Figure I-13 rejetés par les villes et les résidences dans les cours d'eau.
- Effluents et déchets rejetés par les usines de production de produits agricoles et animaux (fromageries / conserves / papiers hygiéniques / sucreries / avicoles / abattoirs...).Figure I-15
- L'utilisation excessive de pesticides, d'engrais et de médicaments agricoles qui contribue directement à l'augmentation des niveaux d'azote et de métaux lourds dans les aquifères.

Figure I-16



Figure I-13 Déchets rejetés par les villes et les résidences dans Litani



Figure I-14 Eaux usées rejetés dans Litani



Figure I-15 Déchets rejetés par les usines dans la rivière Litani



Figure I-16 Travaux agricoles autour la rivière Litani

I.12 Description des sites de prélèvement

.

I.12.1 Sélection des sites

Trois sites ont été sélectionnés dans le bassin du Litani pour l'échantillonnage afin de réaliser l'étude spatiale, la station Jeb-Jenine, le lac Quaroun et Quasmieh. La sélection de ces sites est due à deux facteurs principaux ; le premier est la répartition stationnée des zones, à la partie supérieure (station Jeb-Jénine), au milieu (lac Quaroun) et au fond (Quasmieh) de la rivière. Le deuxième facteur est dû à l'importance géodémographique des trois zones : la gare de Jeb-Janine est située dans la zone des industries complexes et concentre une forte population, le second est le lac de Quaroun, le seul lac du Liban et l'a divisé en deux parties, et la dernière est la gare de Quasmieh située près de la mer, qui est une zone de restaurants et d'activités agricoles.

I.12.2 Description de sites

Table I-7: Description de sites:(location, coordonnée, élévation et note)

Site	Location	Coordonnée	Elévatio n	Notes
Jeb-jenine	Nord Litani	N33° 38' 331" E35° 46' 79"	920 m	la ville la plus grande et la plus peuplée de son quartier
Lake Qaraoun	Milieu de Litani	N 33° 32' 918" E 35° 41' 765"	864 m	le plus grand lac du Liban avec une capacité totale de 220 millions m ³
Quasmieh	Sud Litani	N 33°19' 773" E 35°15' 613"	4 m	A l'interface avec la mer, fin de la rivière Litani

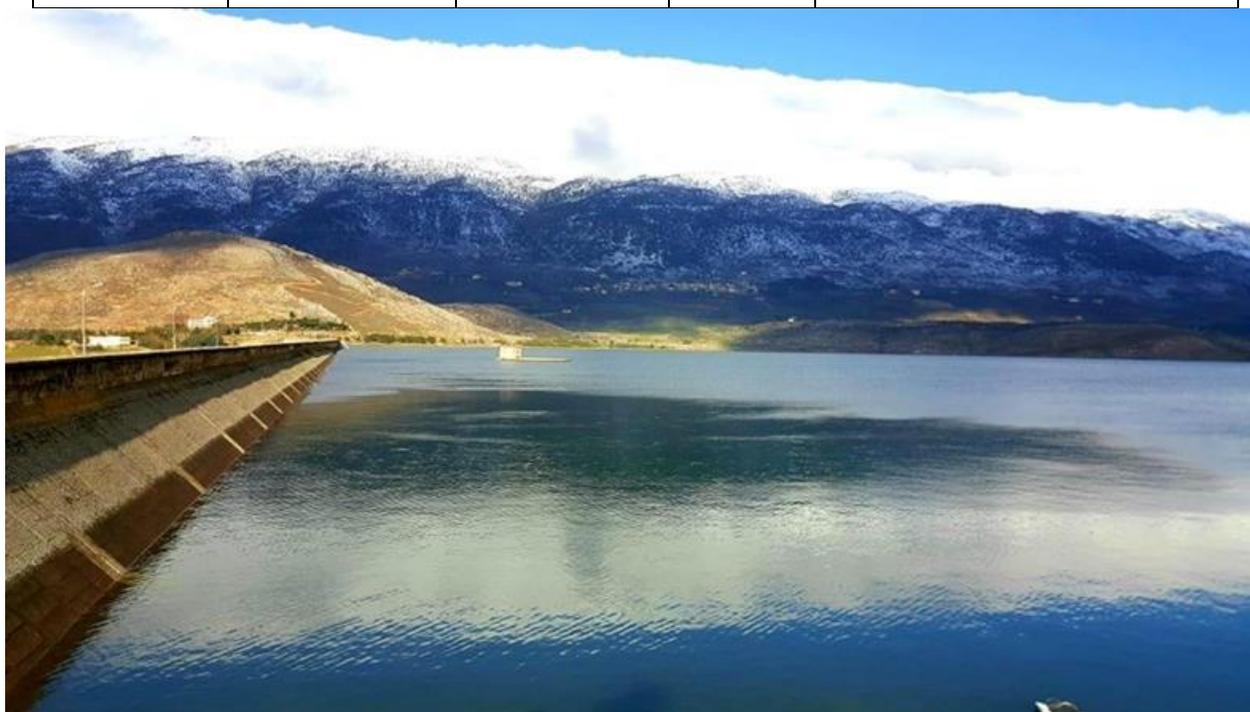


Figure I-17 Site.1 : Lake Qaraoun



Figure I-18 Site.2 : Jeb-Janine (Nord Litani)



Figure I-19 Site.3 : Quasmieh (Sud Litani)

I.13 Outils et méthodes statistiques

En général, les méthodes statistiques sont des outils mathématiques utilisés afin de prendre des décisions et pour bien comprendre et mieux faire ressortir tous les aspects environnementaux des données collectées d'une part sur le changement climatique et d'autre part sur la qualité d'eau de la rivière Litani au Liban. Les méthodes utilisées dans cette thèse se répartissent en méthodes univariées et multivariées ainsi que par des méthodes probabilistes (théorie des valeurs extrêmes) et différentielles (tests statistiques) et d'optimisation (Suffled Complex Evaluation Method).

D'abord nous donnons un aperçu général de l'intérêt de chaque méthode utilisée ainsi que quelques outils descriptifs de ces méthodes dans les sciences de l'environnement. Nous commençons par les méthodes inférentielles. Ces méthodes sont abordées dans ce travail car il considère une ou plusieurs hypothèses statistiques (hypothèse nulle et hypothèse alternative) et cela à partir des données collectées. En plus, les méthodes inférentielles sont classées en méthodes paramétriques et non-paramétriques. Les méthodes paramétriques sont abordées dans cette thèse dans le but de créer des hypothèses qui sont souvent liées à la distribution des observations (loi normal par exemple) ainsi qu'à la variabilité des données collectées. Par contre les méthodes non-paramétriques ne considèrent aucune hypothèse sur nos échantillons. Bien entendu, les méthodes descriptives sont aussi utilisées dans cette recherche, contrario aux méthodes inférentielles ces méthodes ne posent pas d'hypothèse mais fournissent des techniques pour résumer les informations essentielles de notre base de données.

I.13.1 Méthodes Inférentielles

L'objectif est de présenter et décrire les méthodes statistiques inférentielles les plus utilisées dans cette thèse en faisant abstraction des formalismes mathématiques.

I.13.1.1 Analyse de la variance (ANOVA)

L'analyse de la variance (Analysis Of Variance) est une méthode statistique de comparaison des moyennes des paramètres physicochimiques mesurés sur plusieurs stations de la rivière Litani. Dans ce travail, nous avons été amené parfois à faire certains types de comparaisons suivant la nature des paramètres considérés, comme à titre d'exemple de tester plusieurs paramètres en même temps dans une ANOVA. Dans ce cas nous utilisons l'analyse de la variance à plusieurs facteurs (ANOVA à 2 facteurs) qui donne l'avantage de tester l'effet de l'interaction entre les deux facteurs étudiés. Bien entendu afin d'appliquer cette méthode nous validons d'abord les conditions d'applications en utilisant le logiciel R 3.5.1 (la normalité, l'homogénéité des variances).

I.13.1.2 Analyse de variance multivariée (MANOVA)

L'analyse de variance multivariée (MANOVA) utilise le même cadre conceptuel que l'ANOVA. Il s'agit d'une extension de l'ANOVA permettant de prendre en compte une combinaison de variables dépendantes plutôt qu'une variable dépendante unique. Dans le cadre de la MANOVA, les variables explicatives sont souvent appelées facteurs. L'avantage d'utiliser MANOVA dans cette recherche réside dans le fait qu'elle prend en compte les corrélations entre les paramètres physicochimiques sur plusieurs stations ce qui nous permet une meilleure utilisation des informations provenant des données collectées.

Notons que cette méthode teste les effets de facteurs sur plusieurs variables réponses, ce qui nous permet de tester conjointement toutes les hypothèses testées par une série d'ANOVAs avec plus de chance d'observer un effet significatif. La MANOVA est surtout utilisée pour effectuer des tests multivariés dont le but est de vérifier si les paramètres correspondant aux différentes modalités d'un facteur sont significativement différentes ou non. Cette méthode a été illustrée par le logiciel XLSTAT et R3.5.1.

1.13.1.3 Modèle de régression

Nous savons que la régression linéaire est une technique statistique permettant de modéliser la relation linéaire existant entre une variable à expliquer (dépendante) et une ou plusieurs variables explicatives (indépendantes). Lorsque le modèle de régression est satisfaisant, prédire les valeurs de la variable dépendante en fonction des valeurs des variables explicatives. Les conditions d'application sont les mêmes que celles liées à la régression linéaire simple. Nous utilisons dans cette thèse le modèle de régression multiple avec un opérateur de retard afin de modéliser la relation entre les trois facteurs environnementaux : précipitation, température et débit. En plus un test d'adéquation globale du modèle (ANOVA) nous permet de tester la qualité de l'ajustement du modèle global de régression, ainsi en calculant le coefficient de détermination pour vérifier la qualité du notre modèle. De plus, pour valider le modèle nous regardons les résidus soient normaux, de moyenne nulle et de variance résiduelle constante.

Finalement nous calculons la corrélation linéaire simple pour étudier la relation entre les paramètres physico-chimiques sur plusieurs saisons. Ce coefficient représente le degré d'association ou de liaison linéaire entre deux paramètres. Ce coefficient prend des valeurs comprises entre -1 et +1. Ces valeurs extrêmes indiquent une corrélation linéaire parfaite entre les deux variables, tandis que les valeurs voisines de 0 indiquent l'absence d'une liaison linéaire entre les deux variables.

I.13.2 Analyse en Composantes principales (ACP)

L'ACP fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles qui permettent d'explorer statistiquement des données quantitatives. Nous utilisons cette méthode qui nous fournit des représentations graphiques afin de synthétiser les informations utiles dans notre base de données et qui nous permet de traiter et d'interpréter la répartition des paramètres physico-chimiques d'une manière géométrique en projetant les variables sur deux axes principaux. La représentation graphique ou (nuage de point) par rapport à ces facteurs ou composantes principales sous formes d'axes. Ces axes résument au mieux l'ensemble des variables initiales. Ils constituent des *combinaisons linéaires* des *variables* initiales, hiérarchisées et indépendantes les unes des autres. Pour réaliser cette méthode statistique nous utilisons le logiciel SPSS et R3.5.1.

I.13.3 Théorie des valeurs extrêmes (TVE) et théorie des records

La théorie des valeurs extrêmes (TVE) est une méthode mathématique et probabiliste rigoureuse dont le principal but est de créer des modèles statistiques pour prévoir la taille et la fréquence des phénomènes extrêmes. Par définition une valeur extrême est une valeur observée d'une variable aléatoire notée X beaucoup plus grande (ou petite) que celles observées autour de la médiane de la loi de probabilité de X ; ce sont des événements rares aux conséquences parfois désastreuses. La Théorie classique des Valeurs Extrêmes (TVE) a pour but d'obtenir ou d'approcher la loi du maximum (ou minimum) d'une suite des variables aléatoires indépendantes et identiquement distribuées (i.i.d.) Réelles positives $|\mathbb{R}^+$. Dans ce travail nous utilisons deux théorèmes qui capturent l'essentiel du comportement des valeurs extrêmes : celui de Fisher- Tippet et celui de Pickands.

La TVE permet d'obtenir le comportement asymptotique des valeurs extrêmes. Plus précisément, elle donne les lois asymptotiques du maximum d'un échantillon de données convenablement normalisé. Ces lois limites sont appelées les lois des valeurs extrêmes.

Le Théorème de Pickands en 1975, lui, est utile lorsqu'on travaille avec des observations qui dépassent un seuil fixé et assure que la loi de ces "excès" peut être approchée par une loi de Pareto généralisée. Nous appliquons ces deux approches sur une base de données collectées sur une longue période d'années de la température et des précipitations. Nous identifions la distribution des deux facteurs (température, précipitation) décrivant l'évolution du nombre de périodes séparant deux phénomènes extrêmes (période de retour) ainsi la probabilité d'apparition d'un tel phénomène.

La Théorie des records est relativement nouvelle et son existence se justifie en dehors de l'étude des extrêmes d'un échantillon. Mais on s'est rapidement rendu compte de son utilité pour étudier les valeurs extrêmes. En effet, la théorie des records est parfois plus avantageuse que la TVE car d'une part elle traite les lois exactes d'une certaine statistique (nombre de records, valeurs de records et instants de records) qui ne dépendent pas de la loi des observations, d'autre part elle prend en compte la structure de la suite des maximum des observations en considérant l'information sur les instants de sauts qui correspondent aux instants de records, contrairement à la théorie des valeurs extrêmes où on s'intéresse seulement à l'étude de la loi limite du maximum. Nous utilisons un test non-paramétrique basé sur le nombre de records afin de tester la croissance de la température au cours de temps.

I.13.4 Logiciels Statistiques

Dans cette thèse nous utilisons plusieurs logiciels statiques pour traiter notre base des données qui sont liées aux facteurs environnementales et aux paramètres physico-chimiques. Nous expliquons les deux groupes de logiciels utilisées dans cette thèse ; d'abord les logiciels à menu (plus facile d'utilisation) avec fenêtre graphique comme le SPSS, XLSTAT, et les logiciels qui exigent la

maitrise des langages de programmation ; le logiciel libre R et Matlab qui sont fortement recommandés pour l'analyse des données environnementales, surtout son module R commander.

I.13.5 Shuffled Complex Evolution Method

La détermination de paramètres par une méthode d'optimisation consiste à rechercher le minimum d'une fonction cout, dépendant des paramètres recherchés. Mais la démarche n'est pas forcément fiable si le problème est mal posé ou difficile si le nombre de paramètre est grand. Le temps de calcul peut être long s'il faut appeler souvent le modèle physique. De plus une convergence vers un minimum local est possible donnant une solution dégradée.

La méthode SCE repose sur une stratégie d'optimisation globale, qui combine plusieurs concepts des théories d'évolution, la méthode de Nelder-Mead ('downhill simplex procedure'), un tirage aléatoire sur des populations, le 'complex shuffling' et une évolution des populations 'Compétitive Complex Evolution'. Globalement cela se traduit par une démarche à deux étapes représentées dans la figure ci-dessous

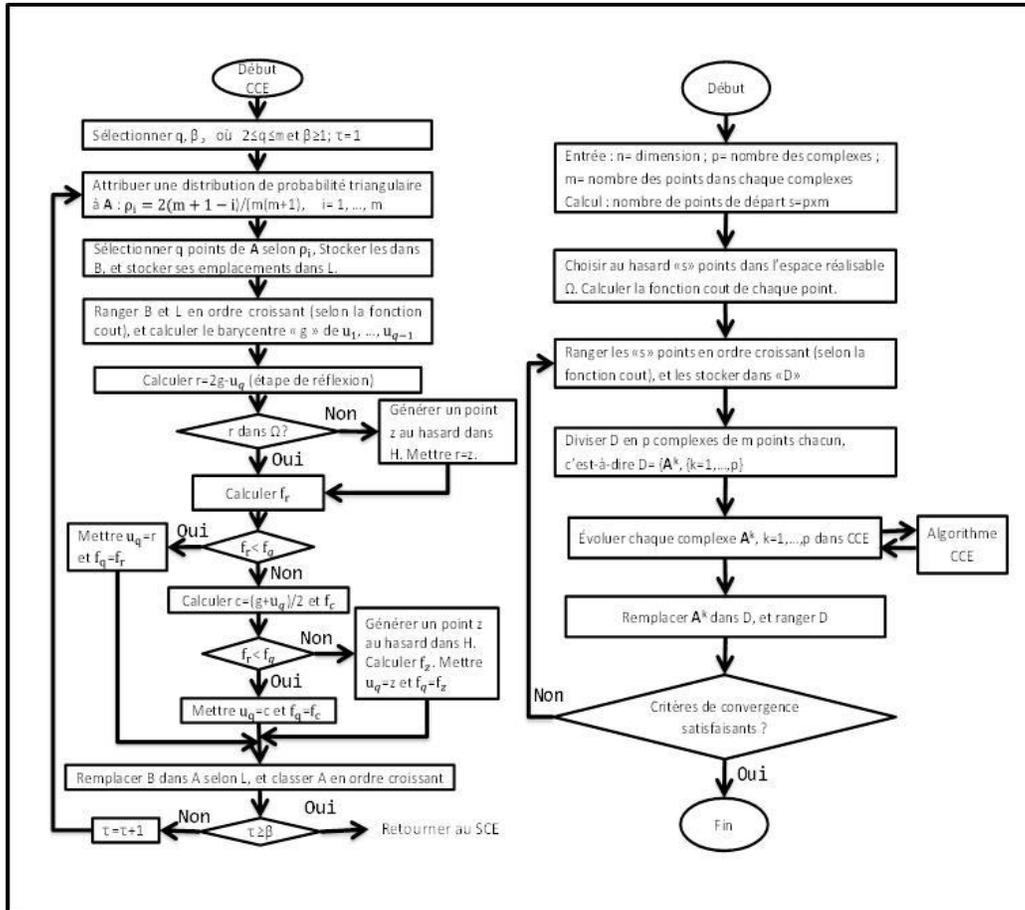
Figure I-20, avec

- n: nombre des paramètres à optimiser (la dimension du problème)
- p: nombre de complexes utilisés ($p \geq 1$)
- m: nombre de points dans chaque complexe ($m \geq n+1$)
- s: nombre de points de départ ($s = p * m$)
- x_i : vecteur de dimensions « n », représentant une valeur i des paramètres;
- D: matrice de dimensions $[s][n+1]$
- A^k : matrice de dimensions $[m][n+1]$ et $1 \leq k \leq p$
- Ω : l'espace réalisable

La fonction $f(x)$ est la fonction cout que l'on cherche à minimiser. Dans notre cas, elle est définie par le débit calculé comparé par le débit mesuré au cours du temps.

Le critère d'arrêt $f(x) < \varepsilon$, est à définir en fonction du problème étudié. Dans notre cas, il est choisi suffisamment faible pour que la fonction cout ne varie plus même s'il n'est pas atteint. Avec la méthode SCE (partie gauche de la

Figure I-20), il est possible de choisir entre un seul complexe et avec un nombre de point m grand, ou plusieurs complexes avec un nombre plus faible dans chaque complexe. Dans ce travail, soit un



ou plusieurs complexes ont été testés et comparés.

Figure I-20 Schéma simplifié de l'algorithme de Shuffled Complex Evolution (SCE à gauche) associé à la méthode Competitive Complex Evolution (CCE à droite).

Nous présentons à présent nos résultats.

Chapitre II Evaluation de la température et des précipitations : influences sur le débit de la rivière Litani

Nous signalons que ce chapitre fait partie d'un article publié dans

« Journal of Earth Science & Climatic Change ».



Modeling of Runoff as a Function of Temperature and Precipitation: Application to the Litani River in Lebanon

All Hayek^{1,2,3}, Nabih Tabaja^{1,2}, Zaher Khraibani⁴, Samir Abbad Andaloussi⁵, Joumana Toufaily^{1,2}, Mohamad Mrad⁶, Evelyne Garnie-Zarifi⁶, Taysir Hamieh^{1,2*}

¹Laboratory of Materials, Catalysis, Environment and Analytical Methods (MCEMA), EDST, Lebanese University, Hadath, Lebanon

²Laboratory of Applied Studies for Sustainable Development and Renewable Energy (LEADER), EDST, Lebanese University, Hadath, Lebanon

³Laboratoire Eau Environnement Systèmes Urbains (LEESU), Université Paris Est, France

⁴Faculty of Science, Department of Applied Mathematics, Lebanese University, Hadath, Lebanon

⁵Faculty of Science, Department of Physics, Lebanese University, Nabatieh, Lebanon

Abstract

Runoff is critically important for humans in their ecological and economic activities; hence, the ability to estimate the possible runoff change in response to changes in precipitation and temperature is highly desirable. In this article, two advanced methods are used to evaluate and quantify the relation and the impact of the runoff, precipitation and temperature in the Litani river in Lebanon. Firstly, the classical regression linear model method showed the relationships and the correlation between the factors; also, the regression lag linear model was used to evaluate the dependency of these factors at different times. Secondly, the advanced optimization shuffled complex method is a general method which can be used during the absence of the nonlinearity data in order to evaluate the impact of the temperature and precipitation data on the runoff data of the Litani river at different period.

Keywords: Litani river; Precipitation; Runoff; Regression model; Shuffled complex method; Temperature

Introduction

Water resources are a main component of natural systems that might be affected by climate change; several series hypothetical scenarios are imposed with regard to the precipitation and temperature data in order to make a hydrological model relating to the climate change. The Middle East and the adjacent Mediterranean region have been identified as a hot spot for climate change, projected with strong decrease in precipitation and increase in temperature for the near future [1]. Lebanon is in the Eastern Mediterranean area; the climate is characterized by hot dry summers and short wet winters. The rainy season of the Lebanese country is between December and February and the dry season occurs between June and August. This article focuses on the study of the relation between three climatology factors on the Litani river in Lebanon. The Litani river is the largest and longest river in Lebanon, generating about 30% of the total surface of water runoff in all the rivers that runoff in the Lebanese territories [2]. The total drainage area of the basin is about 2,175 km² with a channel length of about 170 km and an annual runoff of 750 million m³. The Litani basin is divided into two parts, the Upper Litani basin (ULB) and the Lower Litani basin (LLB) and has nine tributaries. The ULB is located between altitudes 615 and 800 m and drains to the Qaraoun reservoir. It occupies about 70% of the total Litani basin with a length of 5.4 km and a width of 2.1 km in which the total water capacity is 220 Million m³. The Qaraoun reservoir divides the basin into two distinct entities with contrasting climatic conditions: the ULB is considered mountainous, and the LLB is almost in the coastal zone; this provides an opportunity to study and compare the hydrological responses of climate change in a watershed divided into two heterogeneous orographic features, illustrating the importance of controlling local characteristics. Therefore, since the upper basin is dominated by a relatively large elevation zone, it is expected to be subject to higher precipitation and snow rates thus affecting the runoff sustainability and seasonality while the lower coastal basin should be more exposed to higher temperatures and lower precipitation.

Runoff, the most important component of the hydrological cycle, is subject to variation that should be influenced by climate change and human activities [3,4]. The runoff of Litani river in a given period, which is affected by the current meteorological factors and the meteorological and fluvial factors of the preceding periods have major influences on the precipitation and the temperature.

The average global temperature on Earth has increased by about 1.1°C since 1880. In addition, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) predicts an increase of 2° to 4 °C over the next 100 years. According to the World Bank studies in Lebanon, the cost of damage caused by climate change to its economy would exceed 80 billion dollars in 2040. As such, the economic cost in the agricultural sector will therefore be 300 million dollars in 2020. In recent decades, the temperature in Lebanon is increasing from year to year, the precipitations have become radically different and the level of the snowfall is decreasing gradually.

The average annual precipitation value is estimated to be between 700 and 1100 mm in the coastal zone, 200 to 800 mm in the Beqaa Valley and around 2000 mm in the mountains. The annual precipitation is capable of generating an average annual runoff of 8600 million cubic meters, which feeds the 40 main rivers and streams (including 17 perennial rivers) and more than 2000 springs.

Most runoff modeling studies on the rivers have focused on the application of deterministic and stochastic models which require

*Corresponding author: Taysir Hamieh, Laboratory of Materials, Catalysis, Environment and Analytical Methods (MCEMA), EDST, Lebanese University, Hadath, Lebanon; E-mail: taysir.hamieh@ul.edu.lb

Received September 07, 2019; Accepted October 13, 2019; Published October 19, 2019

Citation: Hayek A, Tabaja N, Khraibani Z, Andaloussi SA, Toufaily J, et al. (2019) Modeling of Runoff as a Function of Temperature and Precipitation: Application to the Litani River in Lebanon. J Earth Sci Clim Change 10: 526

Copyright: © 2019 Hayek A, et al. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

II.1 OBJECTIF ET INTRODUCTION

Dans ce chapitre nous nous intéressons à étudier deux facteurs environnementaux (température et précipitations) datés de l'année 1962 à 2017. Nous définissons l'influence de ces facteurs sur le facteur débit (volume d'eau de la rivière Litani). Or, les augmentations de température auront une incidence sur le cycle hydrologique en augmentant directement l'évaporation des sources d'eau de surface. Par conséquent, les changements dans les précipitations auront un impact indirect sur le flux et le stockage de l'eau dans les réservoirs de surface (par exemple, les lacs, l'humidité du sol, les eaux souterraines, etc.). En outre, Le changement climatique a des impacts directs sur l'eau de surface et le contrôle du stockage dans les rivières, les lacs et les réservoirs, qui contrôlent indirectement le processus de recharge des eaux souterraines. L'impact principal et direct du changement climatique sur les eaux souterraines est l'évolution du volume et de la répartition de la recharge des eaux souterraines. Plusieurs études dans la littérature ont traité d'une manière descriptive le développement de facteurs climatiques au Liban. Notre principal objectif est d'étudier la liaison entre les trois facteurs, d'abord entre les deux facteurs (température) et (précipitation) en utilisant un modèle de régression auquel nous considérons que la précipitation dépend de la température, ensuite nous utilisons la méthode d'optimisation « Shuffled Complex Method (SCM) » pour valider notre modèle.

II.2 MOTIVATION

Le changement climatique et l'activité humaine sont deux facteurs majeurs qui modifient les processus du cycle hydrologique et entraînent des changements dans la répartition spatio-temporelle de la disponibilité de l'eau. Le flux, la composante la plus importante du cycle hydrologique subit une variation qui devrait être influencée par le changement climatique et les activités humaines. Le changement climatique est un défi mondial qui touche toutes les régions du monde, perturbe les économies nationales et affecte les communautés. D'abord, il est utile de signaler la distinction entre la pollution environnementale et le changement climatique. Le premier est une situation "locale" à laquelle chaque pays est confronté localement et dont les effets varient d'un pays à un autre. Le deuxième est un problème mondial qui affecte tous les pays. Or, les pays les plus pauvres du monde sont les plus affectés du changement climatique, malgré qu'ils soient ceux à causer le moins de dommages climatiques. Les événements extrêmes tels que les tempêtes, les pluies abondantes, les inondations, les canicules et les sécheresses deviennent de plus en plus fréquents. Ce sont tous des signes de changement climatique au Liban. Pour toutes ces raisons nous nous intéressons dans ce chapitre à étudier l'impact des 3 facteurs environnementaux (température, précipitation, débit de l'eau) datés de 1962 à 2017 à la rivière Litani sur le changement climatique au Liban.

Le Liban se trouve dans la zone de la Méditerranée orientale. Son climat est caractérisé par des étés chauds et secs et des hivers courts et humides. La période pluviale du pays se situe entre décembre et février, et la saison sèche se produit entre juin et août. La valeur annuelle moyenne des précipitations est estimée entre 700 à 1100 mm dans la zone côtière, de 200 à 800 mm dans la vallée de Beqaa et près de 2000 mm les montagnes. La précipitation annuelle est capable de générer un flux annuel moyen de 8600 millions de m³, qui alimentent les 40 principaux cours d'eau et rivières (dont 17 rivières vivaces) et plus de 2000 ressorts.

La rivière Litani est la plus grande et la plus longue rivière au Liban, générant environ 30% du débit total d'eau de surface de toutes les rivières qui circulent dans les territoires libanais. Il provient de la vallée de Beqaa, à 10 km à l'ouest de la ville de Baalbeck, des sources d'Al Oleic à Hosh Brada (altitude 1000 m) et s'écoule vers le sud pour se déverser dans la Méditerranée, à 7 ou 8 km au nord de la ville de Tyr, dans le sud du Liban. Les plaines de Beqaa, où coule le lituanien supérieur, se situent entre le pied des pentes du Liban et les montagnes anti Liban. La superficie totale de drainage du bassin est d'environ 2175 km² avec une longueur de canaux d'environ 170 km et un débit annuel de 750 millions de m³. Le bassin de Litani est divisé en deux parties, le bassin de Upper Litani (ULB) et le bassin de Lower Litani (LLB) et compte neuf affluents ; l'affluent le plus important est la rivière Ghozail, qui comprend six affluents supplémentaires. L'ULB se situe entre les altitudes de 615 et 800 m et draine vers le réservoir de Qaraoun. Elle occupe environ 70% du bassin total de Litani avec une longueur de 5.4 km et une largeur de 2.1 km, dans lequel la capacité total d'eau est 220 Million m³. Le LLB s'écoule d'environ 800 m vers la Méditerranée. Les deux sous-bassins représentent deux paramètres climatiques et physiques distincts. Le réservoir Qaraoun divise le bassin en deux entités distinctes avec des conditions climatiques contrastées : l'ULB est considérée comme montagneuse, et la LLB est presque en zone côtière. Cela offre l'occasion d'étudier et de comparer les réponses hydrologiques du changement climatique d'un bassin hydrographique divisé en deux caractéristiques orographiques hétérogènes, ce qui illustre l'importance du contrôle des caractéristiques locales. Par conséquent, parce que le bassin supérieur est dominé par une zone d'élévation relativement importante, il devrait connaître des précipitations et des taux de neige plus élevés, ce qui affecte la durabilité du flux et la saisonnalité, alors que le bassin inférieur côtier devrait être plus exposé à des températures plus élevées et à des précipitations plus faibles.

La plupart des études de modélisation du ruissellement fluvial se sont concentrées sur l'application de modèles déterministes et stochastiques. Il existe d'autres approches efficaces plus simples seront

considérées dans ce chapitre, à savoir le modèle de régression linéaire multiple (MLRM) et la méthode complexe mixte (SCM) qui sont adoptées dans cette étude sur la rivière Litani. Nous étudions l'évolution de la relation entre les trois facteurs climatologiques (débit, température et précipitations) tout en notant que les données annuelles pour les trois variables enregistrées de 1962 à 2017. Ces données sont collectées auprès de la Banque mondiale, de l'Autorité nationale du Litani et de l'Autorité libanaise de recherche agricole. La sélection de ces données repose sur deux critères, à savoir la disponibilité des données et la corrélation accrue entre ces paramètres. Les données utilisées sont des moyennes annuelles couvrant la période 1962 à 2017. Pour tester la validité des deux modèles, les ensembles de données ont été divisés en étalonnage (1962-2000) et séries d'évaluation (2001-2017).

Ce chapitre est structuré en plusieurs parties :

Nous commençons tout d'abord par une introduction générale sur la définition du changement climatique au Liban en expliquant le choix des facteurs environnementaux. Ensuite nous présentons les méthodes statistiques descriptives et graphiques pour avoir les informations nécessaires sur les 3 facteurs environnementaux (température, précipitation, débit) et de l'évolution de chaque facteur au cours du temps. Après l'étude descriptive et analytique, nous nous intéressons à étudier la liaison entre les 3 facteurs, d'abord entre les deux facteurs (température) et (précipitation) en utilisant un modèle de régression et en considérant que la précipitation dépend de la température, ensuite nous utilisons la méthode SCM afin de valider le modèle entre les 3 facteurs.

Article 1: “Modeling of runoff as a function of temperature and precipitation: Application to the Litani River in Lebanon”

ABSTRACT

The liability of natural systems in the rapid evolution of climate patterns is considered as one of the most challenging issues in recent years. Water resources are a main component of natural systems that might be affected by climate change; several series hypothetical scenarios are imposed with regard to the precipitation and temperature data to make a hydrological model relating to the climate change.

This article presents the runoff modeling at Litani in order to show the impacts of temperature and precipitation on runoff in the Litani River in Lebanon using the multiple linear regression model (MLRM) and the shuffled complex method (SCM) to optimize the hydrological model. The analysis of data for the period of 1962–2017 showed the annual mean of runoff, temperature and precipitation; for the period of 1962-2000 for training or calibration of the model; for the period of 2001-2007 for model validation. This article, focuses first on statistical modeling of hydrometeorology timing; various linear regression and timing series models were developed to study the relation between the runoff of the river and the development of both the temperature and precipitation which are then compared to each other. Secondly, we use the shuffled complex method to evaluate at different periods the impact of the temperature and precipitation on the water runoff of the Litani River. The analysis shows that there is a link between the increase in temperature and reduction in precipitation which cause the largest fall of the basin's runoff. We show that the simple regression models and shuffled complex method are more suitable for scenario analysis and planning whereas time series in particular

autoregressive model are primarily applicable to improve our understanding in the operational purposes that will be useful to study in future work.

Introduction

Water is the living environment of most living inhabitants on earth. Water covers three quarters of the earth's surface, 97% of which is salt water (ocean, sea, etc.) and only 3% is consumable fresh water (rivers, streams, groundwater, etc.). Two-thirds of this water is immobilized in a solid state in icecaps and glaciers. Water is involved in most activities of living beings and especially in human activities (food, drinks, industrial activities, agriculture and other).

Climate change is a global challenge that affects all regions of the world, disrupts national economies and affects communities (Rothstein et al., 2011). In this regard, it is useful to point out the distinction between environmental pollution and climate change. Environmental pollution is a "local" situation that each country faces locally wherein the effects of which vary from one country to another whereas the climate change is a global problem that affects all countries. Climate change or increased climatic variability are expected to alter the timing and magnitude of runoff, and can therefore threaten global water resources, with strong implications for ecosystem health and human security [129] ,(Milly et al., 2005) , (Vörösmarty et al., 2010). The average global temperature on Earth has increased by about 1.1 °C since 1880. In addition, the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) predicts an increase of 2° to 4 °C over the next 100 years (S. Solomon et al., 2007). According to the World Bank studies in Lebanon, the cost of damage caused by climate change to its economy would exceed 80 billion dollars in 2040. As such, the economic cost in the agricultural sector will therefore be 300 million dollars in 2020. In recent decades, the temperature in Lebanon is increasing from year to year, the precipitations have become radically different and the level of the snowfall is decreasing gradually. Extreme events such as storms, heavy rains, floods, heat waves and droughts

are becoming increasingly common; these are all signs of climate change in Lebanon. Climate change and human activity are two major factors that alter hydrological cycle processes and result in changes in the spatial and temporal distribution of water availability. Runoff, the most important component of the hydrological cycle, is subject to variation that should be influenced by climate change and human activities (Arnell, 1999).

The Middle East and the adjacent Mediterranean have been identified as a hot spot for climate change, with strong precipitation decrease and temperature increase projected for the near future (F. Giorgi and Lionello, 2008). Lebanon is in the Eastern Mediterranean area; the climate is characterized by hot, dry summers and short, wet winters. The rainy season of the country is between December and February, and the dry season occurs between June and August. The average annual precipitation value is estimated to be between 700 and 1100 mm in the coastal zone, 200 to 800 mm in the Beqaa Valley and around 2000 mm in the mountains. The annual precipitation is capable of generating an average annual runoff of 8600 million cubic meters, which feeds the 40 main rivers and streams (including 17 perennial rivers) and more than 2000 springs. The Litani River is the largest and longest river in Lebanon, generating about 30% of the total surface water runoff of all the rivers that runoff in the Lebanese territories [134]. It comes from the Beqaa Valley, 10 km west of the city of Baalbeck, from Al Oleic springs at Hosh Brada (altitude 1000 m) and runoffs south to spill into the Mediterranean Sea (7 or 8 km north of the city of Tyre in southern Lebanon). The plains of Beqaa, where the upper Litani runoffs, lie between the foot of the slopes of Lebanon and the mountains of Lebanon. The total drainage area of the basin is about 2175 km² with a channel length of about 170 km and an annual runoff of 750 million m³. The Litani Basin is divided into two parts, the Upper Litani Basin (ULB) and the Lower Litani Basin (LLB) and has nine tributaries; the most important tributary is the Ghozail River, which includes six additional tributaries. The ULB is located between altitudes 615 and 800 m and drains to the Qaraoun reservoir. It occupies about 70% of the total Litani

basin with a length of 5.4 km and a width of 2.1 km, in which the total water capacity is 220 Million m³. The LLB runoff is about 800 m to the Mediterranean. The two sub-basins represent two distinct climatic and physical parameters. The Qaraoun reservoir divides the basin into two distinct entities with contrasting climatic conditions: the ULB is considered mountainous, and the LLB is almost in the coastal zone; this provides an opportunity to study and compare the hydrological responses of climate change in a watershed divided into two heterogeneous orographic features, illustrating the importance of controlling local characteristics. Therefore, since the upper basin is dominated by a relatively large elevation zone, it is expected to be subject to higher precipitation and snow rates thus affecting the runoff sustainability and seasonality while the lower coastal basin should be more exposed to higher temperatures and lower precipitation.

In general, the hydrological models are important and essential tools for water and environment resources management. The climatic change in the world gives a particular interest in relation to the predictive models and the importance of enhancing such existing models and even of developing new theories.

Hydrological models can be classified into three types as follows:

- 1) Empirical models (black-box models)
- 2) Conceptual models
- 3) Physical models

In order to address the inquiry of how climate change affects the hydrological and environmental functioning, the model must contain an adequate description of the dominant physical processes. Following the plan proposed by (Freeze et al., 1969) , a number of distributed and physics-based models have been developed, including the well-known SHE (Abbott et al., 1986a),(Abbott et al.,

1986b), MIKE SHE(Refsgaard et al., 1995), IHDM (Calver et al., 1995) and THALES (Grayson et al., 1992).

In particular, the aim of the physically models is to predict the effects of land-use change. However, there have been many debates about the advantages and disadvantages of these models, along with the research and applications of these models (see, for example;[141] , (Grayson et al., 1992), (Refsgaard et al., 1996), [143]. In general, such models use a lot of data and take a lot of time when applied in a fully distributed manner

In Lebanon, the variation of the mean annual temperature between 1810 and 2017 increase about 2.5°C in 200 years. Also, the mean annual precipitation during 1900-2017 in the Litani region has decreased significantly over the years of about 100 mm in average precipitation. This decrease is due to the decrease in the number of years rich in precipitation and its volume in these years on the one hand and a noticeable increase in the number of dry years that arrives until 5 successive years. For this we interest to study the evolution of the hydrometeorology factors (Runoff, Temperature, and Precipitation) and their impact in the change climate in the River Litani in Lebanon. We note that the annual data are available for the three variables (Temperature, Precipitation, Runoff) recorded from 1962 to 2017 (n = 56) in the Litani River in Lebanon, noting that the measurement of water runoff is performed at the entrance of the Qaraoun lake from the upper basin (Coordinates: 33° 33' 48" N, 35° 43' 19" E, Altitude 792 m). Data are collected from the World Bank (World Bank 2017), the Litani National Authority and the Lebanese State Agricultural Research Authority .

This study presents the runoff modeling at Litani in order to show the impacts of temperature and precipitation on runoff in the Litani River in Lebanon using the multiple linear regression model (MLRM) and the shuffled complex method (SCM) to optimize the hydrological model. The analysis of data for the period of 1962–2017 showed the annual mean of runoff, temperature and precipitation;

for the period of 1962-2000 for training or calibration of the model; also we use the period (2001-2007) to validate the model. In this article, we compute the coefficients of determination for the training data which equal to 65.1% for the MLRM and 63.8% for the SCM with a standard errors equal to 1.42 for the MLRM and 2.89 for the SCM.

For validation data, the coefficients of determination are equal to 91.4% for the MLRM and 88.7% for the SCM with a standard errors equal to 1.42 for MLRM and 2.89 for MLRM. During the study for period (2001-2017), the calculated bias was equal to 0 for the MLRM and 0.43 for SCM. As such, we can conclude that it is possible to predict the runoff water by using the optimal model function with respect to temperature at time $t-1$; $T(t-1)$; Runoff $R(t-1)$ at time $t-1$ and precipitation at time t $P(t)$; however, both of these modeling approaches demonstrate good performance in predicting the future runoff in Litani river.

Most runoff modeling studies in the rivers have focused on the application of deterministic and stochastic models which require a significant level of expertise. There are other simpler and equally effective approaches that have been rarely considered in this article, namely the multiple linear regression and shuffled complex method which are adopted in this study on the Litani river for the first time. The objective of this study is to apply these two methods using the minimum meteorological factors and to compare the performance of these two methods. For this study, the data is used to perform the modeling of the runoff of water, air temperature and precipitation since these parameters have the greatest impact on the river runoff in the Litani river and are most often available.

This article is structured in several parts. The first section is a general introduction on the definition of climate change in Lebanon which explains the choice of environmental factors. The second section presents the descriptive and graphical statistical methods in order to have the necessary

information on the three studied factors (temperature, precipitation, runoff). After the descriptive and analytical study, we are interested in the third section studying the relationship between the three factors by using a statistical method “multiple lag-linear regression model (MLLRM)” and “Shuffled Complex Method (SCM)” where we consider that the runoff depends on the temperature and the precipitation for various period at time t and $t-1$. Section 4 is intended for the perspective and conclusion.

Materials and Methods

It should be noted that time series analysis and forecasting has become a major tool in many meteorological activities to study trends and variations in environmental factors such as precipitation, humidity, temperature, runoff including other environmental factors. A number of classic time series studies have been conducted in recent years to assess the nature of climate change as it has occurred around the world (Mohammad Zarenistanak et al., 2015), [146].

A time series $\{Y_t\}, t = 1, \dots, N$ is a set of observations indexed by time t . In this article, time series were extracted for the period 1962-2017, covering a time horizon of 55 years.

There exist two categories of models for processing a time series (Mohammad Zarenistanak et al., 2015). The first consider that the data is a function of time (t), ($y = f(t)$). This category can be adjusted by the least squares method, or other iterative methods [147]. The second category determines each value of the series according to the previous values ($y_t = f(y_{t-1}, y_{t-2}, \dots)$) which we used the multiple lag-linear MLLRM regression model (Varnousfaderani et al., 2018).

The selection of these data is based on two criteria, namely the availability of data and the increased correlation between these parameters as demonstrated by several previous studies.[149] , [150] , [151] and [152]. The data used in this study are annual averages covering the period from 1962 to 2017. To test the validity of both models, the data series were divided into series of training

(calibration) (1962-1991) and evaluation series (validation) (1992-2017). In the training series, the shuffled and MLRM coefficients are adjusted so that the output vectors (runoff) are closest to the measured output vectors. All studies in the previous years were used to establish graphs for showing the results of both models for the training values and validation values which are observed and estimated. The purpose of this study was to compare the coefficients of determination (R^2), standard deviation of errors, and bias for each model.

Descriptive statistics

In order to discover the variation of the three hydro meteorological factors we illustrate each of them based on some descriptive statistics.

Table II-1: Descriptive statistics for the three factors

Descriptive Statistics	Temperature	Precipitation	Runoff
Number of observation	56	56	56
Minimum	14.65	309	1.936
Maximum	17.981	1121.5	32.122
Range	3.331	812.5	30.186
1st Quartile	15.732	558.825	5.4935
Median	16.150	636.9	9.0755
3rd Quartile	16.550	732.025	13.1905
Mean	16.126	653.436	10.305

Standard deviation	0.655	166.246	6.218
--------------------	-------	---------	-------

The Table I-1 show the descriptive statistics for each factor: for example we note that the annual mean for each 3 factors (Temperature, Precipitation, and Runoff) during the 1962-2017 are respectively equal to 16.126, 653.436, and 10.305. In addition we notice that the variation of annual mean temperature is high Max (17.981) and Min (14.65). It is clear that 25% (1st Quartile) of the mean annual runoff over 55 years less than 5.4935 and 25% of the mean annual precipitation less than 558.825 and 50% (Median) of the annual mean temperature greater than 16.15.

Multiple Linear Regression Model (MLRM)

Multiple linear regression is used to predict the values of a dependent variable based on explanatory or independent variables. In addition, multiple linear regressions are used to find the most satisfactory linear relationship to predict the dependent value that produces the smallest standard error. In performing models, each independent variable is weighted so that the value of the regression coefficients maximizes the influence of each variable in the final equation. However, it is possible to manipulate several independent variables from multiple linear regressions subject to only one dependent variable.

The MLRM attempts to model the relationship between several explanatory variables (Temperature, Precipitation) independent and a response variable (Runoff) dependent by fitting a linear equation to the observed data. The general form of multiple linear regression analysis is,

$$Y_t = a_0 + a_1 X_{1t} + a_2 X_{2t} + \dots + a_p X_{pt} + \varepsilon_t \quad (1)$$

In our case we have $p=2$ (independent variables), where,

Y = Dependent variable (Runoff)

a_0 = Constant

a_1, a_2 = Regression coefficients of the independent variables

X_1, X_2 = Predictors (Temperature, Precipitation)

ε = Error of the Model

Regression methods are based on the assumption of linearity for that we use the least square method for estimation of the parameters to indicate if the independent variable has significant relationship with dependent variable [146] and [153]. In this article, the statistical software R3.5.1(S. Weisberg, 2011), XLSTAT and C++ are used respectively to develop the MLRM models and the Shuffled Complex Method.

Shuffled Complex Method (SCM)

During the 1980s, several efficient optimization algorithms were developed, such as simulated annealing (Kirkpatrick et al., 1983), genetic algorithms [156], SCE-UA (Duan et al., 1992), (Duan et al., 1993) and Simulated Annealed Simplex [159]. These algorithms have been applied to runoff model problems (Duan et al., 1993), [160], [161], [162], (Franchini M. et al., 1998) and [164]. Although the SCE-UA algorithm is distinct from other optimization algorithms for the calibration problem of runoff models with respect to efficiency and even efficiency criteria as evidenced by several studies (Gupta et al., 1999), (Thyer M. et al., 1999), (Franchini M. et al., 1998) and [166], it did not stop researchers from proceeding with the work in the direction of improving the performance of this algorithm by testing new techniques and modifying the exploration and exploitation mechanisms of this algorithm. Some researchers have tried to introduce modifications to the SCE-UA's Simplex evaluative procedure by additional steps to their search mechanism by reducing the

volume of search space [166] and [167], or by modifying the method with this algorithm generating its initial population [168]. The best modification to SCE-UA is that issued by Mutill and Liong (2005) who proposed the addition of a step to the SCE-UA engine algorithm the Evaluative Simplex. In this article, we also propose to apply this change to model calibration SCE-UA. We note that the MLRM consist of studying the linear relation between several hydro meteorological factors, whereas the SCM method consists to study these factors in a non-linearity case. In the Figure II-1 below the description of the SCM [169]: We use the C ++ software to build a general model of the studied three factors.

Figure II-1: Description of the SCM Figure II-2: Description of the SCM

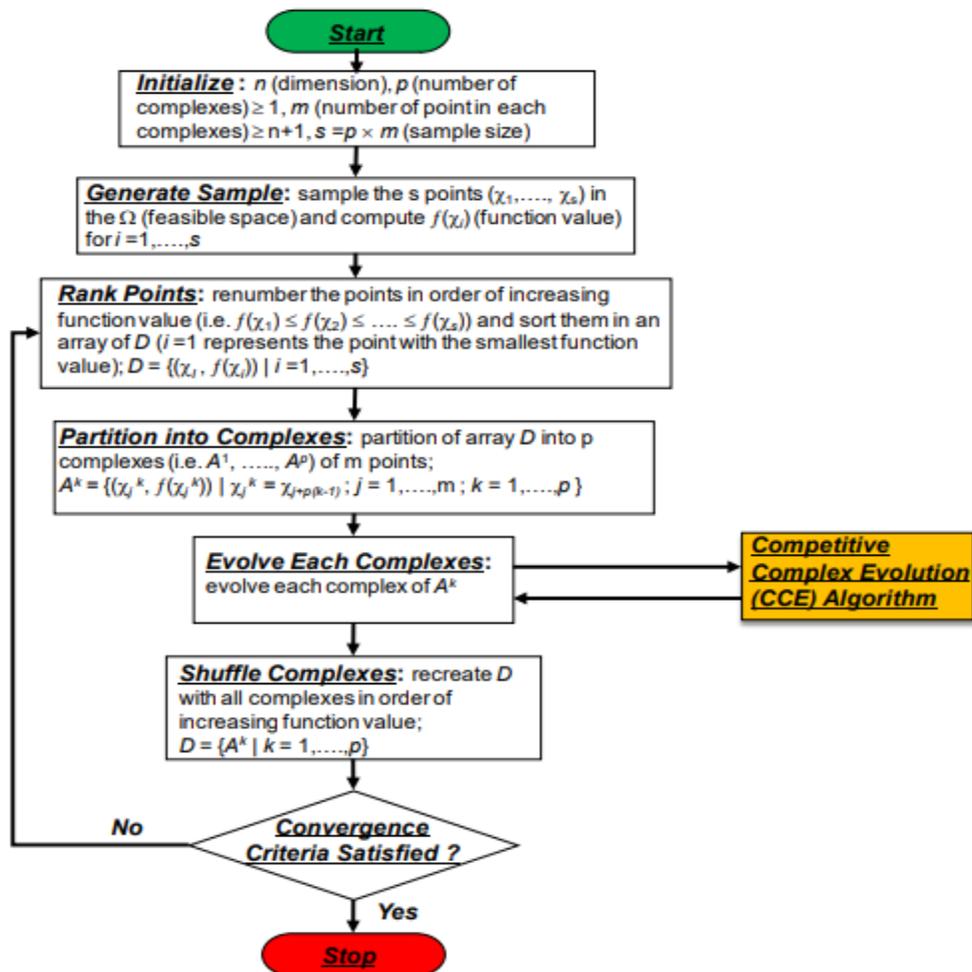


Figure II-3: Description of the SCM

Results and Discussion

Multiple linear regression Model (MLRM)

The objective of this subsection is to evaluate the dependency relation between the hydro meteorological factors in the Litani basin in Lebanon. We study the correlation between runoff $R(t)$ and meteorological variables (temperature $(T(t))$, precipitation $(P(t))$) at annual mean scales. The changes in the correlations between runoff and other variables were determined for different years of lag. In order to study the relationship between environmental factors we use the MLRM, which is a statistical tool, used to process multidimensional data. We consider the variable "Runoff" as the dependent variable to be explained and the two independent variables "temperature" and "precipitation". The model is as follows:

$$R(t) = a_0 + a_1 * P(t) + a_2 * T(t) + \epsilon(t) \quad (2)$$

With " a_0, a_1, a_2 " are the parameters of the model, and ϵ the error of the model.

Coefficient of correlation

To study the relation between the three factors (runoff, temperature, precipitation) during 1962-2017, we compute the coefficient of correlation between each factor ($-1 < r(x, y) < 1$), we obtain:

Table II-2 Correlation matrix (Pearson)

Variables	Runoff	Precipitation	Temperature
Runoff	1	0.785	-0.162

Precipitation	0.785	1	0.038
Temperature	-0.162	0.038	1
Values in bold are different from 0 with a significance level $\alpha=0.05$			

We remark in the Table II-2 the strong positive relation between the two factors precipitation and runoff which $r(\text{Runoff}, \text{Precipitation}) = 0.785$ and a weak negative relation between $r(\text{Temperature}, \text{Runoff}) = -0.162$ also a very weak relation between $r(\text{Precipitation}, \text{Temperature}) = 0.038$, for the annual period 1962-2017.

Estimate of the parameters

First, we should check the quality of our model by calculating the coefficient of determination ($0 \leq R^2 \leq 1$) which is equal to $R^2 = 0.654 > 0.5$ (i.e 65% of the variability of the dependent variable Runoff is explained by the 2 explanatory variables), which confirms the MLRM can be improved by studying the MLLRM in the section 3.2. Then we test the overall significance of the MLRM by using the ANOVA test. We propose the two hypotheses to test:

$$\left\{ \begin{array}{l} H_0: a_1 = a_2 = 0 \text{ (significant model)} \\ H_1: a_i \neq a_j \forall (i, j) = (1, 2) \text{ (No significant model)} \end{array} \right\}$$

Table II-3 ANOVA table (Fisher test)

Model^a	Sum of Squares	Degree of freedom	Mean Square	F	Sig.
Regression	1390.125	2	695.062	49.187	.000 ^b

Residual	734.814	52	14.131		
Total	2124.939	54			

a. Dependent Variable: Runoff

b. Predictors: (Constant), Precipitation, Temperature

Based on Table II-3 we deduce the global modal is significant, ($sig = 0 < 0.05$). To test the significance of the parameters a_1, a_2 we use the statistical test (t-test) and we define the two hypotheses:

$$\begin{cases} H_0: a_i = 0 \forall i = 1,2 \\ H_1: a_i \neq 0 \forall i = 1,2 \end{cases}$$

Table II-4 Estimate parameters of MLRM

Model	Unstandardized Coefficients		t-test	Sig.
	B	Std. Error		
(Constant)	20.003	12.588	1.589	.118
Temperature	-1.802	.775	-2.325	.024
Precipitation	.030	.003	9.720	.000

From the Table II-4 we see that:

$Sig(Temperature) = 0.024 < 0.05$, then the temperature is significant in the model, and there exist an impact of the temperature on the runoff factor in the Litan river.

$Sig(Precipitation) = 0 < 0.05$, the precipitation variable is significant, and there exist an impact of the precipitation on the runoff factor in the Litani river.

In general we notice that the influence of precipitation on the runoff is more important than the temperature since the degree of the significance for the variable precipitation is smaller than that of the temperature. So the adjusted model is given by the following equation:

$$R_t = 20.003 - 1,802 * T_t + 0.03 * P_t,$$

$$\text{for } 1962 \leq t \leq 2017 \quad (3)$$

In order to compare the results between the different numerical methods (SCM and MLLRM), three performance indices were calculated for each series: the coefficient of determination (R^2); error standard deviation (E) and bias. The coefficient of determination (R^2); is the percentage of the total error on the dependent variable Y ($R(t)$:Runoff) explained by the model. This coefficient is expressed by:

$$R^2 = \frac{\sum(\hat{Y} - \bar{Y})^2}{\sum(Y - \bar{Y})^2} \times 100$$

Where Y is the observed value, \bar{Y} is the average of the observed values and \hat{Y} is the estimated value by the model. The standard error (E) is given by the following equation:

$$E = \sqrt{\frac{\sum(\hat{Y} - Y)^2}{n}}$$

While the bias is given by the following equation:

$$Biais = \sum(\hat{Y} - Y)$$

Multiple linear regression model with lag-differentiate (MLLRM)

In this section we construct the general regression model for different period to study the relationship between the three factors (Runoff R (t), Temperature T (t), Precipitation P (t)). The follow equation shows:

$$R(t) = f (P(t), P(t - 1), T(t), T(t - 1), R(t - 1)) \quad (4)$$

Where, $R(t)$ represent the Runoff at time t ; $R(t - 1)$ is the Runoff at time $t-1$. The time lag of precipitation is given by $P(t)$: at time t and $P(t - 1)$: at time $t-1$. Similarly, for the time lag of the variable temperature.

Table II-5 Significance test of the correlation between the factors at different time.

Variables	R(t)	P(t)	T(t)	R(t-1)	P(t-1)	T(t-1)
R(t)	0	< 0.0001	0.241	0.008	0.056	0.036
P(t)	< 0.0001	0	0.773	0.149	0.280	0.709
T(t)	0.241	0.773	0	0.357	0.071	0.008
R(t-1)	0.008	0.149	0.357	0	< 0.0001	0.241
P(t-1)	0.056	0.280	0.071	<0.0001	0	0.830
T(t-1)	0.036	0.709	0.008	0.241	0.830	0

Values in bold are different from 0 with a significance level $\alpha=0.05$

Image of the matrix of correlation coefficient

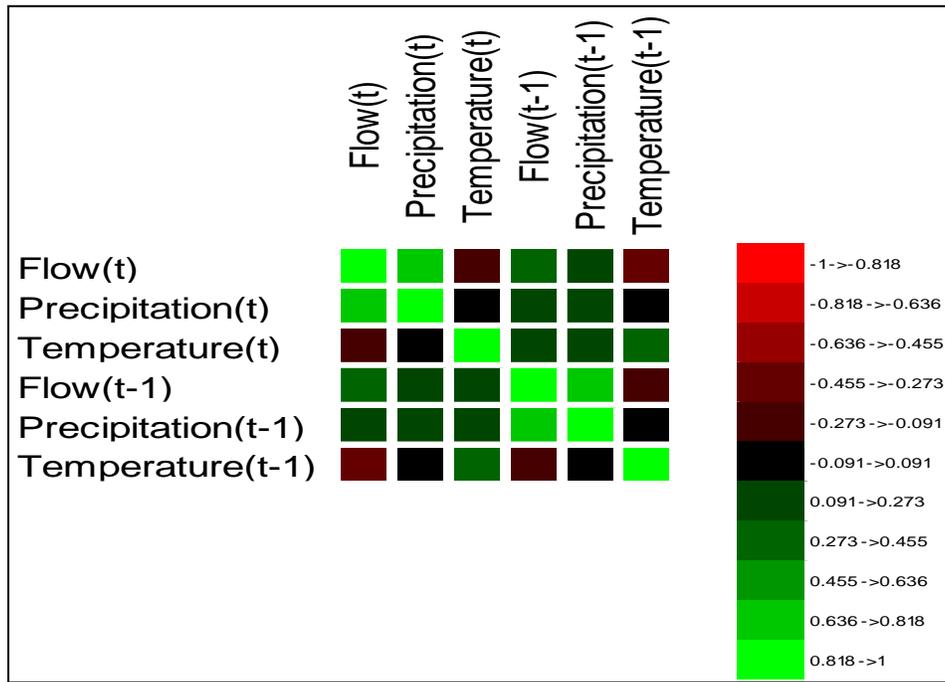


Figure II-4 Coefficient correlation between the different factors at different time

Based on the Figure II-4 and Table II-5, we can find the significance correlation between the factors at different time, which depends on the matrix distribution. Therefore, we remark the impact of temperature at time t can be negligible from the model ($p - value = 0.241 > 0.05$ (significance level)) so, the absence of correlation between the temperature and runoff at time t. In other side, there exists a significant relation between the runoffs at time t (years) with:

- $P(t)$: Precipitation at time t
- $R(t - 1)$: Runoff at time t-1
- $T(t - 1)$: Temperature at time t-1.

This relation between $R(t)$ and $R(t - 1), P(t), T(t - 1)$ by taking in consideration the runoff at t-1 and the temperature at t-1 the coefficient of determination (R^2) is bigger than R^2 in case of using only the factors at time t. (show the below Table II-6).

Regression of variable Runoff (t)

Table II-6 Summary of the variables selection Runoff (t):

Nb of variables	Variables	MSE	R²
1	Precipitation(t)	15.603	0.618
2	Precipitation(t) / Temperature(t-1)	13.386	0.679
3	Precipitation(t) / Runoff(t-1) / Temperature(t-1)	12.479	0.706

The regression equations developed for the Litani River using stepwise regression approach (1963-2017) and combined series are given by the following models:

- I. *Model 1*: $R(t) = a + b * P(t)$
- II. *Model2*: $R(t) = a + b * P(t) + c * T(t - 1)$
- III. *Model3*: $R(t) = a + b * P(t) + b * R(t - 1) + c * T(t - 1)$

We estimate the parameters of the (Model3), $R^2 = 70.6\% > 50\%$, i.e. approximately 71% of the variability of the dependent variable $R(t)$ is explained by the three explanatory variables. These parameters are estimate by the least square method LSM which the Stepwise variables selection method, three variables have been retained in the model. Table II-7

Table II-7 Estimate parameters of the Model

Source	Value	Pr > t
Intercept	24.384	0.053
Precipitation(t)	0.028	< 0.0001
Temperature(t)	0.000	
Runoff(t-1)	0.172	0.035
Precipitation(t-1)	0.000	
Temperature(t-1)	-2.107	0.007

So we can write the model of MLLRM:

$$R(t) = 24.384 + 0.028 * P(t) + 0.172 * R(t - 1) - 2.107 * T(t - 1) \quad (5)$$

Table II-8 Analysis of variance (ANOVA) (Runoff(t)):

Source	DF	F	Pr > F
Model	3	40.112	< 0.0001
Error	50		
Corrected Total	53		

Also, given the p-value<0.0001 of the F statistic computed in the ANOVA Table II-8, and given the significance level of 5%, the information brought by the explanatory variables is significantly better than what a basic mean would bring.

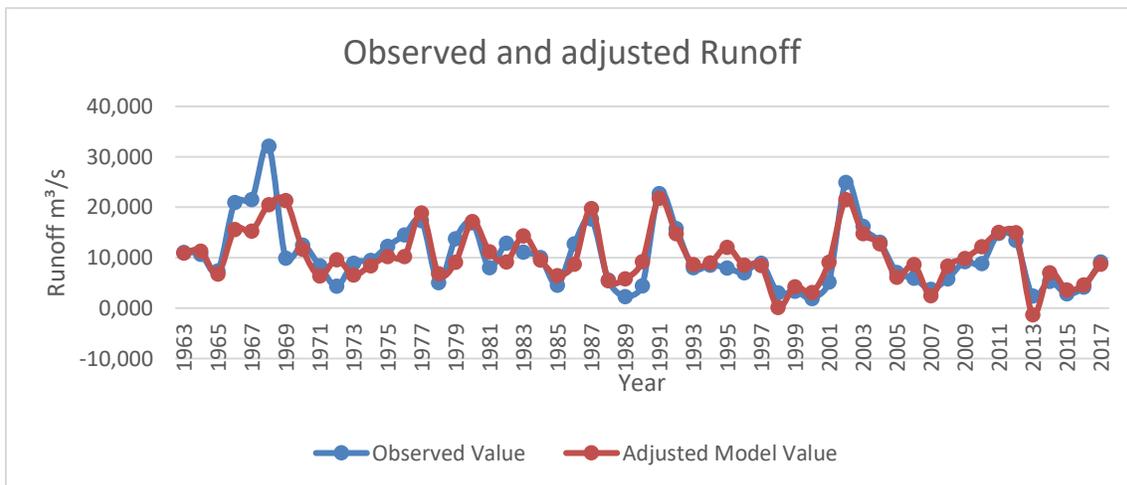


Figure II-5 Time series of the runoff (observed vs predicted) value.

It was observed that the Multiple Linear Regression model got simulated very well with a small value of Mean Square Error, and a high value of R^2 , revealing that the model is quite efficient in predicting the runoff of river Litani station. To verify this model we draw in the same axis the two series the observed and the adjusted value and we remark that the series of the model is compatible with the series of the observed value Figure II-5, noting that we detect three extremes values of the runoff in the years 1966, 1967 and 1968.

Shuffled Complex Evolution (SCE)

The principle of this optimization method is to determine the coefficients of the model by finding the minimum of the cost function. However, the approach is not necessarily reliable if the problem is poorly posed or difficult if the number of parameter is large. The calculation time can be long if we often have to call the physical model (Duan Q. et al., 1993). Moreover, a convergence towards a local minimum is possible giving a degraded solution. There are several approaches to solving this difficulty (Duan Q. et al., 1992).

In this article, predicative analysis has to be applied for correctly modeling Runoff (R)-Temperature (T)-Precipitation (P) relationships. The follow equation shows this relationship between the factors:

$$F = f(P(t), P(t - 1), \dots, P(t - m), \quad T(t - 1), T(t - 2), \quad \dots T(t - n), R(t - 1), \dots, R(t - p)) \quad (6)$$

Where, R (t-p): runoff at time t-p; p: maximum steps of time lag of runoff and P (t-m): precipitation at time t-m with m: maximum steps of time lag of precipitation. T (t-n): temperature at time t-n; n: maximum steps of time lag of temperature.

Different steps taken into consideration to construct the general model which we can apply for any value at the time t.

- The data was first normalized using C++ software.
- The normalized data was transferred to EXCEL work sheet.
- We valid the obtained result by plotting the runoff (observed) vs runoff (predicted) series for the period 1963-2017 .Figure II-6

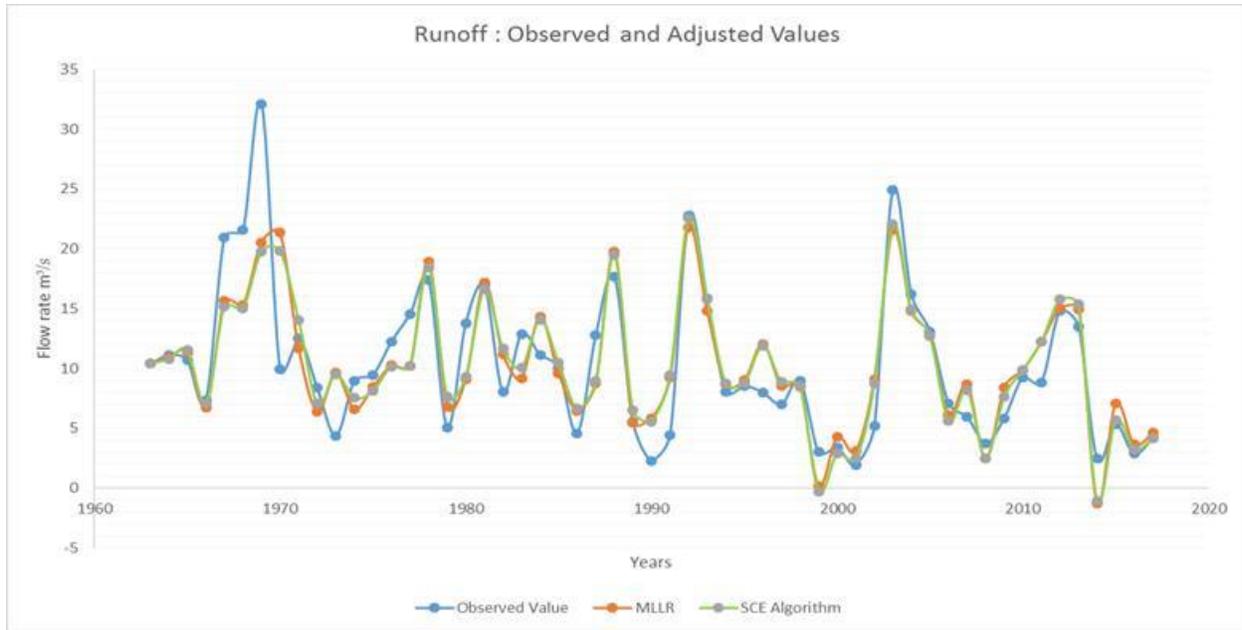


Figure II-6 Runoff by the SCE method.

The SCE method is based on a global optimization strategy, which combines several concepts of evolutionary theories, the Nelder-Mead method ('downhill simplex procedure'), a random draw on populations, the 'complex shuffling' and an evolution of populations 'Competitive Complex Evolution'.

The function $f(x)$ is the cost function we want to minimize. In our case, it is defined by the average annual runoffs calculated and measured:

$$f(x) = \sum_{n=1}^{Max} \left(Runoff^{calculated}(x, t_i) - Runoff^{measured}(t_i) \right)^2$$

Validation of the model

In the current study MLLRM technique was utilized on the normalized data using XLSTAT. The analysis of variance was done and the R^2 and the root mean squared error (RMSE) were computed. The MLLRM model was validated by plotting the predicted runoff v/s actual runoff curve for years 1962-2000 in order to validate the prediction of years 2001-2017.

Table II-9 gives the coefficients of the (MLLRM) and the standard error of each coefficient. According to this table, we find that there is a close relationship between the runoff and the dependent variables (R (t-1), P (t), T (t-1)) due to the fact that all coefficients of the Student's t-test gave very low probability values (less than 5%). This means that each variable has a significant contribution on the runoff.

Table II-9 Coefficients and standard error of coefficients for the regression model.

Variables	Coefficient	Standard error
Constant	36.32	7.244
P(t)	0.028	0.004
R(t-1)	0.079	0.112
T(t-1)	-2.81	0.062

We obtain the following regression equation:

$$R(t) = 36.32 + 0.028 * P(t) + 0.079 * R(t - 1) - 2.81 * T(t - 1)$$

The coefficient of determination obtained for the training data (1963-2000) is equal to 65.1% (>50%) for the MLLRM, and 63.8% for the SCM, which gives a standard errors of 2.85 for the MLLRM and 3.95 for SCM. For validation data (2001-2017), the coefficients of determination is

equal to 91.4% for MLLRM and 88.7% for SCM, with a standard deviation of errors 1.42 for MLLRM and 2.89 for SCM. During the study period (2001-2017), the calculated bias was equal to zero for the MLLRM and 0.407 for SCM. As such, we can conclude that it is possible to predict Litani water runoff using the optimal model function with respect to temperature at time $t-1$ $T(t-1)$, runoff $R(t-1)$ at time $t-1$ and precipitation at time t $P(t)$; however both of these modeling approaches demonstrate good performance in predicting water runoff in Litani river for the future. The results of these models are very similar to those observed, that is to say a good performance during the years 1962-2000 and 2001-2017 Figure II-7. The MLLRM slightly improves the quality estimation of the runoff in Litani river compared to the SCM model.

Table II-10 Comparison between MLLRM and SCM

Year	R(t)(observed)	R(t)adjust(MLRM)	R(t)adjust(Shuffled)
2001-2002	5.18	7,108	6,14
2002-2003	24.94	21,264	23,46
2003-2004	16.22	15,581	12,33
2004-2005	13.09	12,922	10,09
2005-2006	7.11	9,124	4,64
2006-2007	5.98	6,589	6,24
2007-2008	3.73	1,953	2,41
2008-2009	5.85	6,945	9,07
2009-2010	9.21	9,455	10,23

2010-2011	8.83	11,653	11,02
2011-2012	14.82	13,608	15,58
2012-2013	13.48	15,602	14,45
2013-2014	2.45	-0,224	2,62
2014-2015	5.30	5,483	6,82
2015-2016	2.87	2,785	3,8
2016-2017	4.21	3,490	5,14
2017-2018	9.20	9,136	8,84
Biais (2001- 2017)		0	0.407

Based on the Table II-10 we can deduce the following graphs of the observed and adjusted value by the MLLRM in the training series (1962-2000) and validation series (2001-2017).

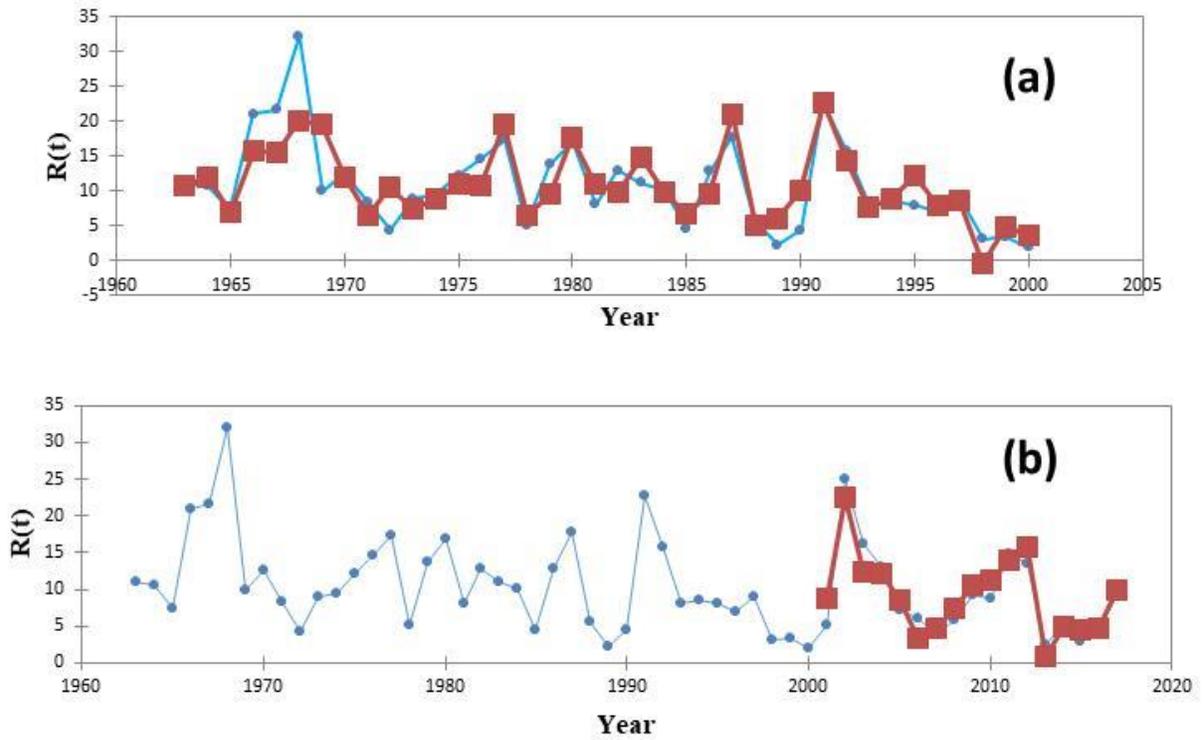


Figure II-7 (a) Observed and predicted runoff calculated with the MLLRM (1962-2000), (b) Observed and predicted runoff calculated with the MLLRM (2001-2017).

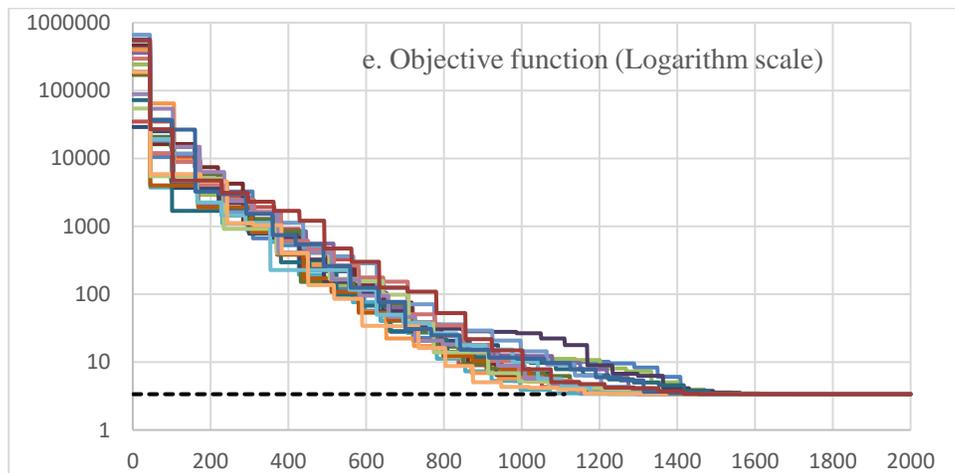
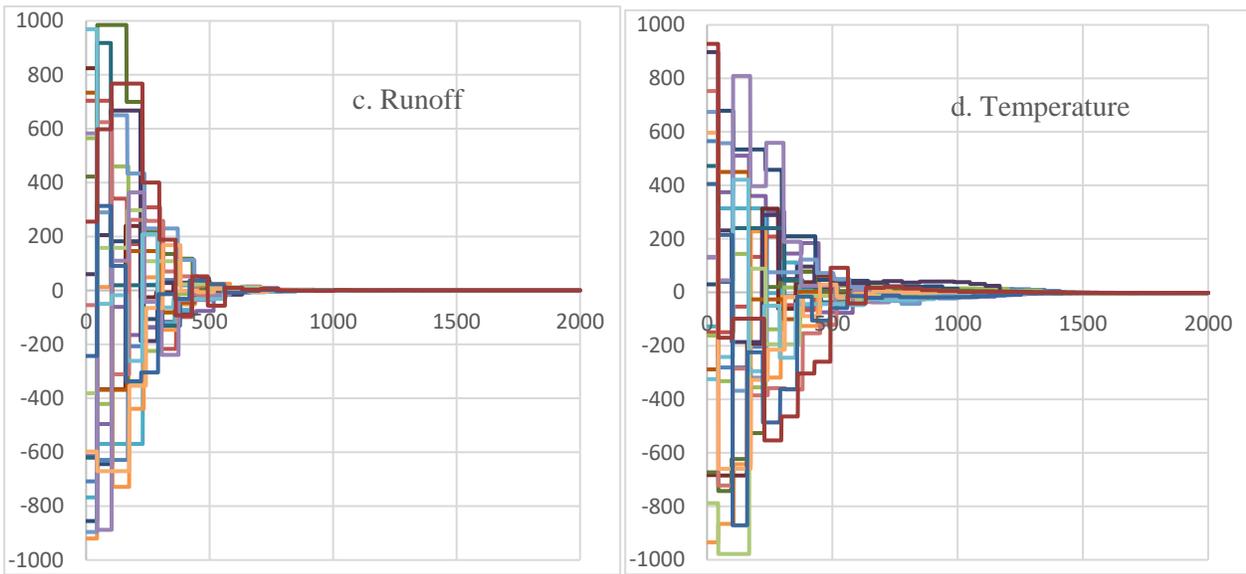
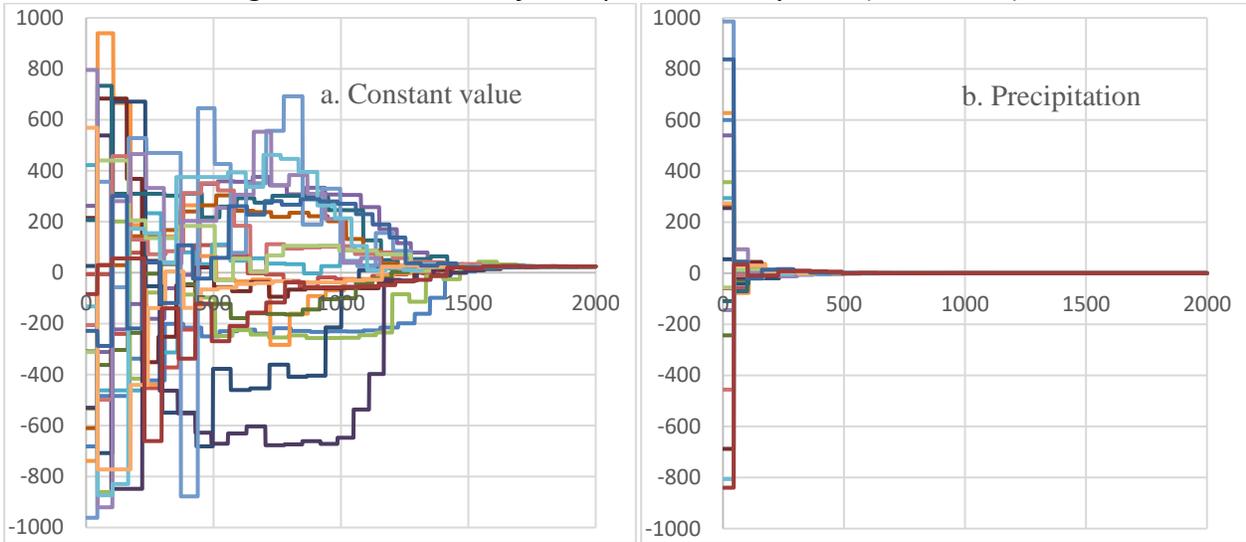
Validation of the SCM

In this paper, our model is a 4-dimensional function (constant value, precipitation of the current year, temperature and rain of the previous year). In such cases, the parameters ranges are:

$$-1000 < Parameters_i < 1000 ; i = 1,2,3 \text{ and } 4.$$

The following Figure II-8 shows, the efficiency of the model in which convergence of the objective function was carried out before 1500 iterations for all different runs.

Figure II-8 Variations of each parameters by SCM (1962-2000)



(b, c and d) shows the varied value of parameter of the variables ($R(t-1)$, $P(t)$, $T(t-1)$) according to the number of objective function calls during the calibration process with 20 runs (20 different initial random number seeds). In each run, the stopping criteria, which is used, is “the trial reached 2,000 function evaluations”.

The calculation of the runoff is sensitive to the parameters of the modeling. Based on (e), the results show clearly that this model is very sensitive to the precipitation parameter (the convergence is obtained before 300 iterations) whereas it is less sensitive to the parameters of the previous runoff and the previous temperature (convergence is realized between 600 and 1000 iterations).

Conclusion

Runoff is critically important for humans in their ecological and economic activities; hence the ability to estimate possible runoff change in response to changes in precipitation and temperature is highly desirable. The objective of this study was to evaluate the runoff from the available hydro meteorological parameters using models that are very rarely used in the literature, namely the SCM model and the MLLRM. The use of such models can subsequently predict or estimate the runoff in Litani river for various hydro meteorological conditions or during periods of missing data. Each of the two models used for forecasting has advantages and disadvantages; the SCM optimization method is very efficient but offers an unclear description of the relationship between input and output data whereas by use of MLLRM, an equation is determined that clarifies the relationship between input variables and runoff in Litani river. As demonstrated by our results, these two models give quite acceptable results with an overall standard error to 3.95 for the (SCM) and 2.85 for the MLLRM. The advantage of the models presented in this study are mainly of their relative simplicity (development, application and updating of the model), compared to stochastic and deterministic

models. For example, stochastic models require several levels of calculation, the seasonal component (representing the long-term runoff cycle) and the autocorrelation study of the time series. On the other hand, deterministic models require several hydro meteorological parameters that are not always available including from a meteorological station with several parameters, the level of the river, as well as several geophysical factors.

It is worth noting that while both models have similar deviations of similar errors over the entire study period, the bias criterion distinguishes these two sets of results. The variability of hydro meteorological data during years of studying suggests good functioning of the two models in such conditions in a global manner. However, this study also shows that the two years with lower performance were the years subject to extreme runoff (low in 2000 and high in 1968). On the other hand, variability appeared to be lower for average runoff, especially during the validation period of the regression model. We note a largest standard errors attributed mainly to the poor performance of the model in 1968 showing the presence of the extreme values. This suggests that the studies on models may be slightly more performance in average runoff conditions than extreme runoff thus making the interest of studying these extremes in future works.

All obtained results allow us to conclude that the two proposed methods can be exploited for the estimation of Litani runoff. Indeed, the MLLRM has demonstrated a significant ability to learn and predict runoff. Besides, for the approach of the SCM, it also allows to have similar and effective results.

Finally, in this article we have used an advanced method to evaluate and quantify the relation and the impact of the runoff, precipitation and temperature in the Litani river as follows:

First we have constructed the regression linear model that showed us the relationships between the factors at time t and then we used a regression lag-linear model (MLLRM) to study the evolution

and the dependency of these factors at different times since these factors are generally varying from past years. Second, we have considered the shuffled complex method to evaluate the relation between the temperature and precipitation data on the runoff data of the River Litani at different period at the time the nonlinearity exists between the observations. This method which gave us the adjusted values of the observed variables closer to the linear model can be used when the observations are nonlinear. Finally, we note the effects of human activities on runoff response are only implicitly captured since human actions and decisions are increasingly having a larger proportion impact on the basin-scale changes. As such, future research is needed to explicitly account wherein we recommend the simpler regression models which are more suitable for scenario analysis and planning whereas the autoregressive time series are primarily applicable to improve our understanding in the operational purposes that will be useful to study in future work.

Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre un modèle statistique et un modèle d'optimisation dont les objectifs sont d'étudier l'influence de la température et des précipitations sur le débit. Les deux modèles présentent des écarts d'erreurs similaires sur toute la période d'étude. La variabilité des variables au cours des années d'étude suggère un bon fonctionnement des deux modèles dans de telles conditions et ce de manière globale. Cependant, cette étude montre également des performances faibles pour les années soumises à un ruissellement extrême (faible en 2000 et élevée en 1968). En revanche, la variabilité semble diminuer pour le ruissellement moyen, en particulier pendant la période de validation du modèle de régression. On note que l'erreur type attribuée principalement à la mauvaise performance du modèle en 1968 montre la présence des valeurs extrêmes. Ceci suggère que les études sur modèles peuvent être légèrement plus performantes dans des conditions de ruissellement moyen que de ruissellement extrême rendant ainsi l'intérêt d'étudier ces extrêmes dans le chapitre suivant.

Chapitre III Analyse des valeurs extrêmes de température et de précipitation au Liban

Nous signalons que ce chapitre fait partie d'un article publié dans
« Communications in Statistics: Case Studies, Data Analysis and Applications ».



Analysis of the extreme and records values for temperature and precipitation in Lebanon

Ali Hayek, Zaher Khraibani, Dana Radwan, Nabil Tabaja, Samir Abbad
Andaloussi, Joumana Toufaily, Evelyne Garnier-Zarli & Tayssir Hamieh

To cite this article: Ali Hayek, Zaher Khraibani, Dana Radwan, Nabil Tabaja, Samir Abbad Andaloussi, Joumana Toufaily, Evelyne Garnier-Zarli & Tayssir Hamieh (2020): Analysis of the extreme and records values for temperature and precipitation in Lebanon, Communications in Statistics: Case Studies, Data Analysis and Applications, DOI: [10.1080/23737484.2020.1765899](https://doi.org/10.1080/23737484.2020.1765899)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/23737484.2020.1765899>



Published online: 18 May 2020.



Submit your article to this journal ↗



Article views: 18



View related articles ↗



View Crossmark data ↗

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=ucas20>

III.1 Introduction

Les phénomènes naturels extrêmes (température extrême, sécheresse et incident de forêt, inondations tremblements de terre...etc) peuvent évoquer des pertes en vies humaines, des dommages aux infrastructures et des primes d'assurance très élevées dans le monde. Il est donc important de connaître les occurrences d'un tel événement extrême ainsi que sa probabilité d'apparition.

Notre principal but dans ce chapitre est d'étudier l'apparition des facteurs environnementaux extrêmes (température, précipitation) qui jouent un rôle crucial sur le changement climatique et qui affecte bien entendu l'évolution des paramètres physico-chimiques de la rivière Litani. Nous utilisons les deux approches statistiques « Théorie des valeurs extrêmes » TVE et la « théorie de records » afin de vérifier la sporadicité de la température (hypothèse H_0) ou l'augmentation « émergence » (hypothèse H_1). Nous testons H_0 contre H_1 en utilisant la distribution de probabilité du nombre de records. Ensuite nous utilisons notre nouvelle approche statistique pour prédire les futures valeurs records et le temps de retour des valeurs extrêmes des deux facteurs environnementaux étudiés.

Description :

Nous avons déjà étudié les deux facteurs température et précipitation dans le chapitre précédent dans lequel nous avons observé plusieurs valeurs extrêmes qui seront traitées dans ce chapitre. Or, la méthode statistique utilisée dans ce chapitre dépend de l'objectif visé et des informations environnementales (connaissances et observations) dont on dispose ainsi des caractéristiques mathématiques du processus observé. Cette méthode s'inscrit dans le cadre général de la théorie des extrêmes qui se partage dans ce chapitre en « Records » et « TVE ». Nous donnons quelques caractéristiques utiles de ces deux approches afin de bien comprendre leurs utilités dans le domaine

de l'environnement en général et dans le changement climatique en particulier. Or, la méthode de « records » est reliée aux « TVE » qui consiste n_t à étudier la loi limite du maximum des observations, par contre la théorie des records est plus efficace que celle des valeurs extrêmes car d'une part elle traite les distributions exactes et non asymptotiques des observations qui ne dépendent pas du type de la distributions des observations, d'autre part la présence du temps dans la théorie de records dans lequel nous observons à chaque valeur de records un instant de records, contrairement à la théorie des valeurs extrêmes où l'on s'intéresse seulement à l'étude de la loi limite du maximum des observations. Notons que des publications sur les records, ont été produites durant ces dix dernières années avec des applications sur divers domaines (changement climatique, épidémiologie, théorie de l'assurance pour la finance et le sport, étude de fiabilité économie...).

La théorie des valeurs extrêmes comme nous l'avons déjà expliqué nous aide à décrire les propriétés statistiques des événements extrêmes, comme la probabilité d'apparition, le temps et le niveau de retour d'un tel phénomène extrême. Dans ce chapitre nous nous intéressons à étudier les valeurs extrêmes de la température et des précipitations au Liban. Or, le Liban se situe dans la mer Méditerranée orientale, il est exposé aux catastrophes naturelles surtout durant ces dernières décennies, la désertification s'étend, la saison sèche s'allonge, le régime pluviométrique est modifié, les températures s'élèvent de manière significative. Il est intéressant et nécessaire de développer des modèles, des instrumentations et des mesures capables de simuler ces phénomènes climatiques. Ces approches peuvent être les premières méthodes d'adaptation au changement climatique, en particulier à court et moyen terme. Les impacts du changement climatique peuvent être très différents d'une région à l'autre, mais ils toucheront l'ensemble de la planète[171]. L'augmentation de la température intensifiera le cycle de l'eau, en augmentant l'évaporation. Une évaporation accrue entraînera davantage de tempêtes, mais contribuera également à l'assèchement de certaines zones

terrestres. En conséquence, les zones touchées par les tempêtes sont susceptibles de connaître une augmentation des précipitations et un risque accru d'inondations, tandis que les zones éloignées des tempêtes subiront probablement moins de précipitations et un risque accru de sécheresse (Cheddadi R. & Khater C., 2016 [9]). Pour éviter de telles catastrophes et dommages, nous utilisons dans cette thèse la théorie classique des valeurs extrêmes et une nouvelle approche en relation avec la théorie des records où nous construisons un modèle statistique pour prédire l'intensité et la fréquence des phénomènes inhabituels. Par conséquent, une base de données de la température et des précipitations au Liban est traitée dans ce chapitre. L'ajustement de ces deux facteurs est traité par les deux distributions extrêmes à l'aide du programme R : d'abord par la distribution de Weibull pour la méthode des maximas de bloc (BM) et ensuite par la distribution de Pareto pour la méthode de dépassement de seuil « méthode de Pics » (POT) afin de modéliser les queues de la distribution de la température et des précipitations au Liban. Nous utilisons la théorie des records, pour étudier l'évolution de la température et des précipitations sur la période de 2003 à 2019. L'approche par la théorie de records nous aide à prédire l'intensité de futures valeurs de records de la température et des précipitations « les plus élevées » et nous calculons les probabilités d'apparition d'un nouveau record. De plus, nous évaluons l'évolution de la hausse température en utilisant un test non paramétrique basé sur le nombre de records observés afin de tester la tendance et l'augmentation de la température au cours de 16 années.

Article 2: Analysis of the Extreme and Records Values for Temperature and Precipitation in Lebanon

Abstract

Extreme natural phenomena can be damaging and very costly. Heavy rainfall, snowfall and rising temperature are some examples of these phenomena which have the potential to reproduce frequently and at an elevated scale. We are therefore interested in defining the occurrences of such extreme events and the probability of their occurrence. The Extreme Value Theory (EVT) is a useful tool to describe the statistical properties of extreme events. Lebanon is exposed to natural disasters since it boasts a long coastline which sits on the eastern Mediterranean Sea. Therefore, the database of temperature and precipitation in Lebanon, chosen as weather factors, will be simulated by two extreme distributions using R program: Weibull for the block maxima and General Pareto for the peak over a threshold to model the tail distributions of temperature and precipitation in Lebanon. Also, the theory of record-breaking data will be adopted to study the evolution of temperature and precipitation during 2003-2019. This paper is to predict the intensity of the upcoming “highest” temperature and precipitation and to compute the timing probabilities for the future record. To test the increase in the highest temperature, this paper presents the nonparametric test based on the number of records.

Keywords: Extreme weather phenomenon, Temperature, Precipitation, Extreme distributions, Extreme quartiles, Block maxima, POT, Return level, Records theory, Nonparametric test.

Introduction

Extreme events affect human health and have great impact on the environment and human activities [172], [173]. The impact of extreme events were observed for example in Europe in summer 2002 and 2003 and were related directly to greenhouse gases and to the climate change [74], [173]–[175].

Large climate shifts were shown in the Mediterranean region. These large changes were attributed to the geographical location of the Mediterranean between north Africa and the central Europe in addition to local processes related to the complex physiography of the region from the Mediterranean sea to the Alpin chain [176], [177]. Consequently, the Mediterranean is considered as a “hot-spot” of climate change due to the high amount of released greenhouse gases [176], [178]. The consequences of climate changes are already observed on different ecosystems such as coasts, forests, etc. Such influences by their spatial and geographical configurations - closeness to the coastline, high demand for water, climate favoring summer droughts and extremes weather events such as intense rainfall - are considered as particularly exposed environments. The disruption of the major ecological balances is already observed: a physical environment is changing and living beings are trying to adapt or disappear under the combined effects of climate change. In this context, extreme climate events, such as precipitation and temperature, in the Mediterranean region, were shown as a result of climate change. Extreme events, such as extreme heat, extreme cold and extreme precipitation, were studied in middle east, north Africa and south Europe in the last decade [179]–[182]. Local flooding, erosion, and water damage that can directly threatening human life and cause environmental and cultural damage, are observed as a result of the short duration of extreme events especially precipitation [183], [184].

It is interesting and necessary to develop models, instrumentations, and measurements able to simulate climatic phenomena. These approaches may be the beginning methods of adaptation to climate change, particularly in the short and medium term. The impacts of climate change can be very different from one region to another, but they will affect the entire planet. Lebanon boasts 225 kilometers (140 miles) of coastline to its west, of which all of it is located on the eastern Mediterranean Sea, thus it is highly affected by the climate change. In Lebanon, different climate change scenarios have been developed through the application of a downscaled General Circulation

Model to predict the changes in temperature and precipitation by the end of the 21st century. Rising temperatures will intensify the water cycle, increasing evaporation. Increased evaporation will result in more storms, but also contribute to drying over some land areas. As a result, storm-affected areas are likely to experience increases in precipitation and increased risk of flooding, while areas located far away from storm tracks are likely to experience less precipitation and increased risk of drought [185]. To avoid such catastrophe and damage, we use the classical theory of extreme values and a new approach in relation to the theory of records where we construct a statistical model to predict the size and frequency of unusual phenomenon. The daily temperature and the monthly precipitation are chosen as a weather factor in Lebanon between 2003 and 2019 (World Bank, 2019).

The principal objective of this paper is to study the impact of the two weather factors on climate change by using the extreme and regular records field. For that purpose, we predict the intensity of the next highest temperature then we compute the probability of the waiting time for the future record. Also, we evaluate the probability of future records, by using a non-parametric test based on the number of observed records. In fact, the theory of records has been applied in several fields. From climate change, epidemiology, insurance theory to finance and sports, reliability study, this method has proved its relevance in capturing the dynamics occurring in a certain market or through a set of data through time [186]–[190]. Among the various extreme value theory researches in literature, analyzing the high-frequency time series data or the evidence of causality between the supply and demand variables relies basically on stochastic econometric schemes [191]. These models contain a large number of parameters, a fact that poses estimation challenges, and over-parameterization concerns [192], [193]. However, the advantages of the theory of records consist the above difficulties do not concern this theory, which drops several mathematical constraints about the choice of the underlying distribution and the quality of the residuals [194]. Additionally, the

theory of records could be used, in cases where the number of available observations is somehow small [187], [195]. Usually, the study of time in record models is accounted through particular random variables called “Record Index” [196]. Moreover, this theory offers an alternative solution to the non-applicability of the machine learning techniques and long-term memory models, where a considerable amount of data is needed for a good performance [197], [198]. The target of this paper is to present a new approach for environmental science by studying the extreme and rare events based on a new statistical records approach to detect early any unexpected phenomena.

The remaining part of the paper will be organized as follows. Section 2 will give some background on extreme value theory and records process, the theory behind the prediction of future records. Section 3 will use the methodology detailed in Section 2 to predict the next record temperature and precipitation. In Section 4, we look at the estimation and prediction of extreme temperature intensities and we explain the significance of the results and highlight their impacts. Finally, these models will be tested if the temperature is a sporadic event or a trend. Section 6 will contain some concluding remarks. Finally, we conclude the article by considering future prospects in this field.

Materials and methods

Extreme value and records theory

Extreme value theory has been developed to study the frequency of catastrophic events and to construct a predictive model so that one can attempt to forecast the frequency of disaster. This theory covers the tail of data distribution and the return levels that help to predict the values of temperature in the upcoming years so we will be capable to take the right precaution. In this paper, we will be determining the maximums, the distribution and the return level of the temperature and the precipitation in Lebanon by using two methods: Maxima by Blocs (GEV: generalized extreme value

distribution) and Peak over Threshold (POT). Firstly, we explain that the asymptotic distribution of extreme values belongs to the family of the generalized extreme value distributions which depend on a real parameter. The main result is the FisherTippett theorem which claims that $M_n = \max(X_1, \dots, X_n)$, after proper normalisation, converges in distribution to one of three possible distributions (Gumbel, Fréchet, Weibull). In fact, it is possible to combine these three distributions together in a single family of continuous cumulative distribution function, known as the generalized extreme value (GEV) distribution. Also, the peak over threshold-method (POT) is based around looking at extreme values of some sample that exceeds a certain threshold value. The main concept of the method is to use a threshold to seclude values considered extreme to the rest of the data and create a model of the extreme values by modeling the tail of all the values the exceeds this threshold. We apply in the rest of the article the different types of extreme value methods on real data (temperature and precipitation).

Fisher Tippett Theorem

Theorem 1 [199], [200] Let $(X_n)_{n \geq 1}$ be a sequence of i.i.d (Independent Identically Distributed) random variables. If $M_n = \text{Max}(X_1, X_2, \dots, X_n)$ there exist a sequence of normalized constants $b_n > 0$ and $a_n \in \mathbb{R}$ and some non-degenerated distribution function G such that $\frac{M_n - a_n}{b_n} \rightarrow G$ i.e. $\lim_{n \rightarrow +\infty} P\left(\frac{M_n - a_n}{b_n} \leq x\right) = G(x)$, then G belongs to one of three standard extreme value distributions: Gumbel, Weibull and Frechet.

$$G(x) = \begin{cases} \exp\left(-\left[1 + \gamma\left(\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right]^{-\frac{1}{\gamma}}\right), & \gamma \neq 0 \\ \exp\left(-\exp\left(-\frac{x - \mu}{\sigma}\right)\right), & \gamma = 0 \end{cases}$$

Where μ is a location parameter, σ scale parameter and γ shape parameter.

GEV has three types depending on the shape parameter: Gumbel for $\gamma = 0$; Frechet for $\gamma > 0$;

Weibull for $\gamma < 0$

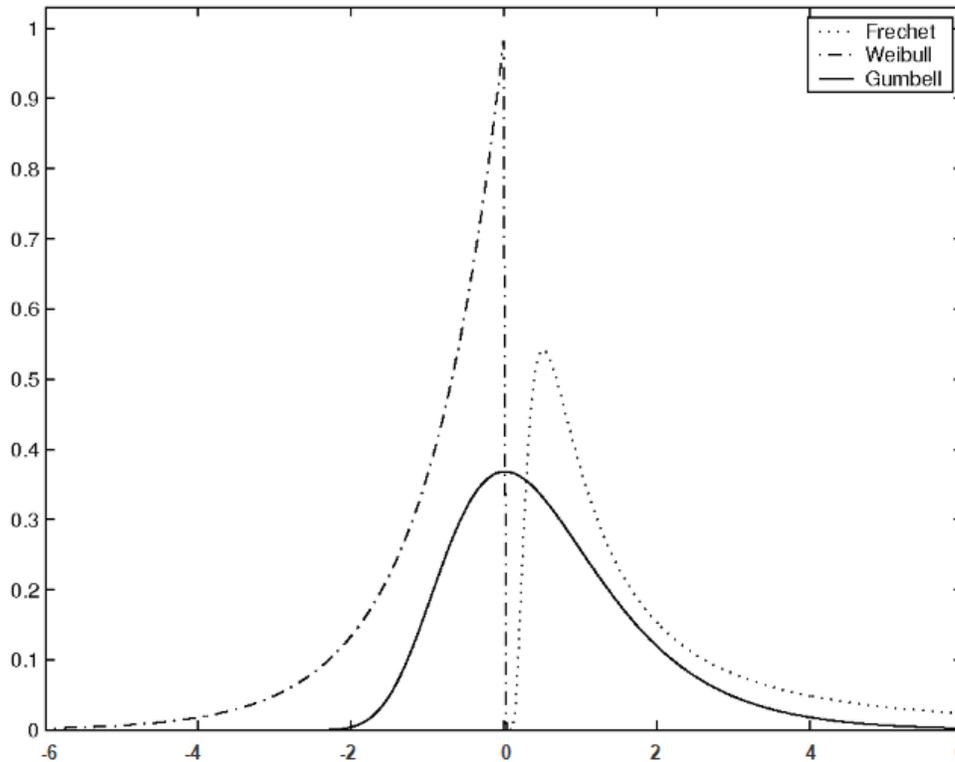


Figure III-1 Generalized Extreme Value Distributions

Peak over Threshold- POT:

An alternative approach, called the peak over threshold (POT) method, is used to consider the distribution of exceedances over a certain threshold noted by u . The distribution function F_u is called the conditional excess distribution function and is defined as $F_u(y) = P(X - u \leq y | X > u)$, $0 \leq y \leq x_F - u$. At this point extreme value theory can be very helpful as it provides us with a powerful result about the conditional excess distribution function which is stated in the following theorem:

Theorem 2 (Pickands 1975, Balkema and De Haan (1974) [201], [202]:

The distribution of $Y_i = \{X_i - u \mid X_i > u\}$ for large threshold u , are asymptotically distributed following a Generalized Pareto Distribution (GPD), $F_u(y) \approx H_{\gamma, \sigma}(y)$, $u \rightarrow \infty$, where:

$$H_{\gamma, \sigma}(y) = H(y \mid X_i > u) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \frac{\gamma}{\sigma} y\right)^{-\frac{1}{\gamma}} & \text{if } \gamma \neq 0 \\ 1 - e^{-\frac{y}{\sigma}} & \text{if } \gamma = 0 \end{cases}$$

For $y \in [0, (x_F - u)]$ if $\gamma \geq 0$ and $y \in [0, -\frac{\sigma}{\gamma}]$ if $\gamma < 0$. $H_{\psi, \sigma}$ is the so called generalized Pareto (GPD), where σ scale parameter and γ shape parameter. POT has also three types depending on the shape parameter: Gumbel for $\gamma = 0$; Pareto for $\gamma > 0$; Weibull for $\gamma < 0$.

Record Value Theory:

Let X_1, X_2, \dots, X_n are a sequence of independent and identically distributed random variables observed successively from a continuous distribution function F with density f . Let R_0, R_1, \dots, R_n a sequence of upper record value and L_0, L_1, \dots, L_n a sequence of the upper record time where R_i is the i^{th} upper new record observed at time L_i [203]:

The record time value is defined by:
$$\begin{cases} L_0 = 1 \\ L_i = \min \{j, X_j > X_{L_{j-1}}\} \text{ for } i \geq 1 \end{cases}$$

The record value is defined by:
$$\begin{cases} R_0 = X_1 \\ R_i = X_{L_{i-1}} \text{ for } i \geq 1 \end{cases}$$

The record-increment process is defined by:
$$\begin{cases} J_0 = R_0 \\ J_n = R_n - R_{n-1} \text{ for } n \geq 1 \end{cases}$$

The inter-record time is defined by: $\Delta L_n = L_n - L_{n-1}$ for $n \geq 1$ and finally the number of record is defined by : $N_n = \sum_{i=1}^n \delta_i$; where δ_i is a sequence of record indicator defined by :

$$\delta_i = \begin{cases} 1 & \text{for } i = 1 \\ \mathbb{I}(X_i > \max(\{X_1, \dots, X_{i-1}\})) & \text{for } i > 1 \end{cases}$$

The joint probability distribution function, pdf $f(r_0, \dots, r_n)$ of the n upper record values R_0, R_1, \dots, R_n from a continuous cumulative probability distribution function $F(r)$, is given by:

$$f_{R_0, R_1, \dots, R_n}(r_0, \dots, r_n) = \frac{\prod_{i=0}^n f(r_i)}{\prod_{i=0}^{n-1} [1 - F(r_i)]} = f(r_n) \prod_{i=0}^{n-1} h(r_i), \text{ for } -\infty < r_0 < r_1 < \dots < r_n$$

Where $h(r) = \frac{f(r)}{1-F(r)}$ is the hazard rate function.

The joint density of the m record times is given by:

$$P(L_0 = n_0, L_1 = n_1, \dots, L_m = n_m) = [(n_0 - 1)(n_1 - 1) \dots (n_m - 1)n_m]^{-1}$$

For the estimation of the scale and the location parameter of the upper record value $R_0, R_1 \dots R_n$ with distribution function $F\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$ and density function $\frac{1}{\sigma}f\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)$, the best linear unbiased estimates (BLUE) of μ and σ are given by: $\mu^* = \sum_{i=0}^n a_i R_i$ and $\sigma^* = \sum_{i=0}^n b_i R_i$, where a_i and b_i are constant based on the expected values and the variance-covariance matrix of the record values [203].

For the estimation of the new value record R_{n+1} based on the BLUE's defined above (μ^*, σ^*) and on the first n record values $R_0, R_1 \dots R_n$ is given by: $R_{n+1}^* = \mu^* + \alpha_{n+1} \sigma^* + \omega^T \Sigma^{-1} (R - \mu^* I_{n,1} - \sigma^* \alpha)$, where α is the mean of the standard record value, Σ is the variance-covariance matrix of the standard record values, R is the vector of observed record values, $I_{n,1}$ is the vector of one's and $\omega^T = (\sigma_{0,n}, \sigma_{1,n}, \dots, \sigma_{n+1,n})$.

Extreme Value for Temperature and Precipitation

Temperatures are characterized by their intensity. To obtain the distribution of the previous temperatures and precipitations in Lebanon, we use the temperatures database, collected daily from 2003 until early 2019 in Celsius degree and for the precipitations database, it is also collected monthly from 2003 until early 2019 [204]. To fit the distribution of the extreme values for the temperature and precipitation, we have two methods: the Bloc Maxima (BM) Figure III-2, Figure III-3 and the POT Figure III-4, Figure III-5 . All analysis was done using R software. The BM consists of cutting the data into blocs (monthly blocs for temperature and annual blocs for the precipitation) and choosing the maximums of each bloc to find the distribution that fits the data of maximum.

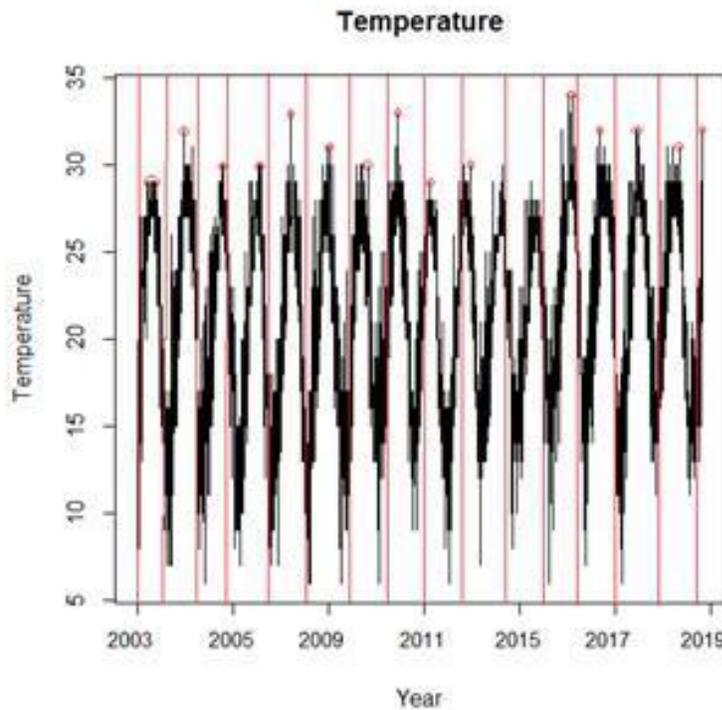


Figure III-2 Graph of Temperature (Bloc Maxima)

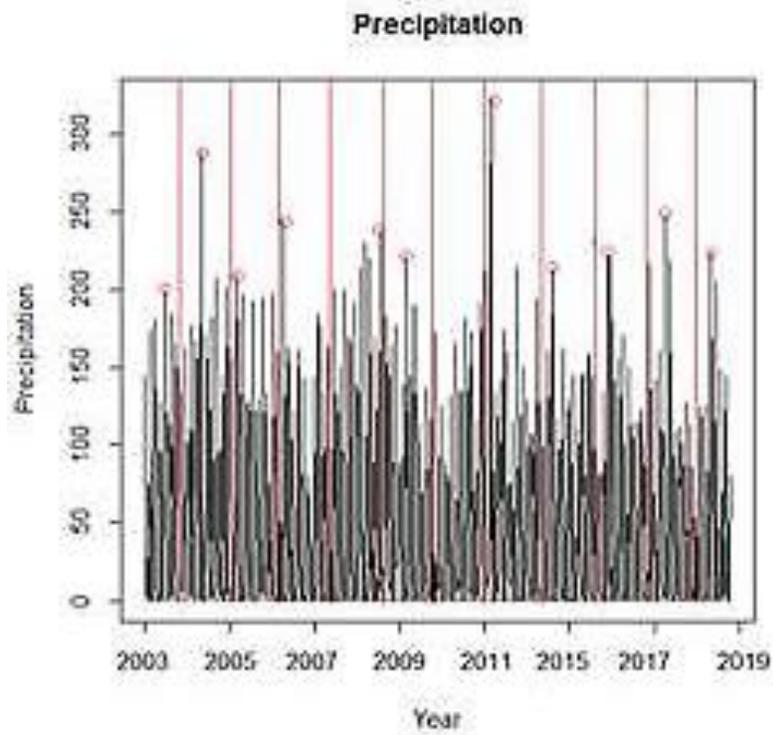


Figure III-3 Graph of Precipitation (Bloc Maxima)

The peak over threshold (POT) method consists of choosing a threshold u and selecting all the values above u .

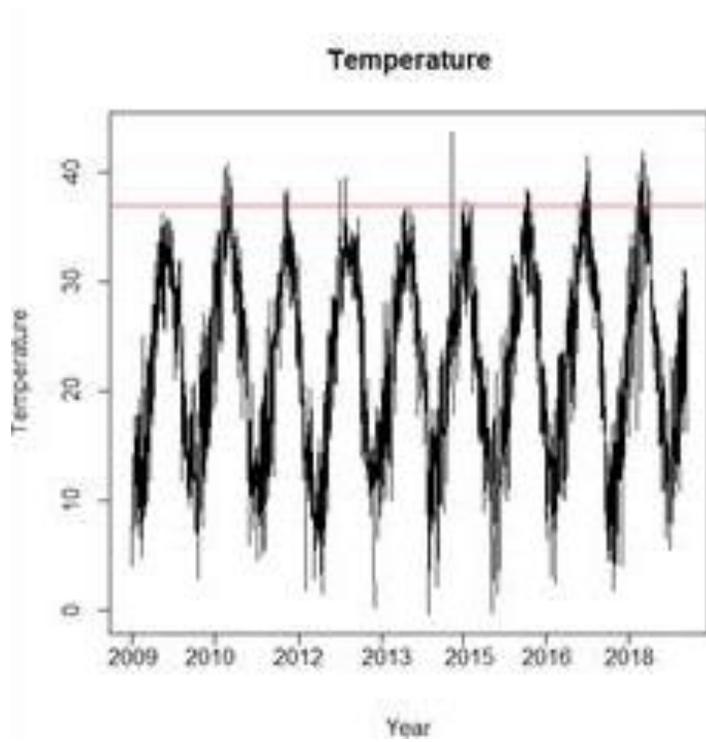


Figure III-4 Graph of Temperature (POT)

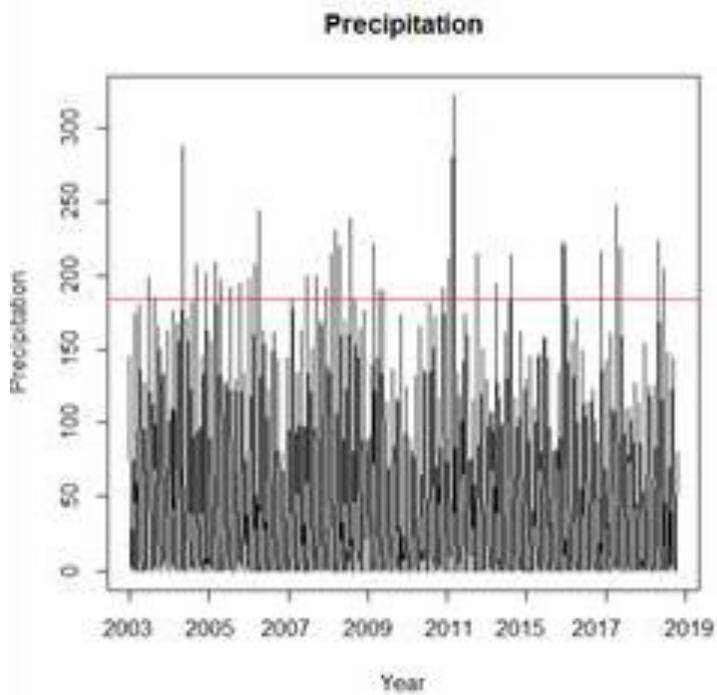


Figure III-5 Graph of Precipitation (POT)

Summary data statistics:

Table III-1 Descriptive Statistics

Variables	1 st Quartile	Median	Mean	3 rd Quartile	Maximum
Temperature (Daily)	16	22	21.5	26	34
Precipitation (Monthly)	0.8043	24.5025	48.9274	82.5785	321.708

The fitted GEV of the observations are presented as follow

Figure III-6,

Figure

III-7:

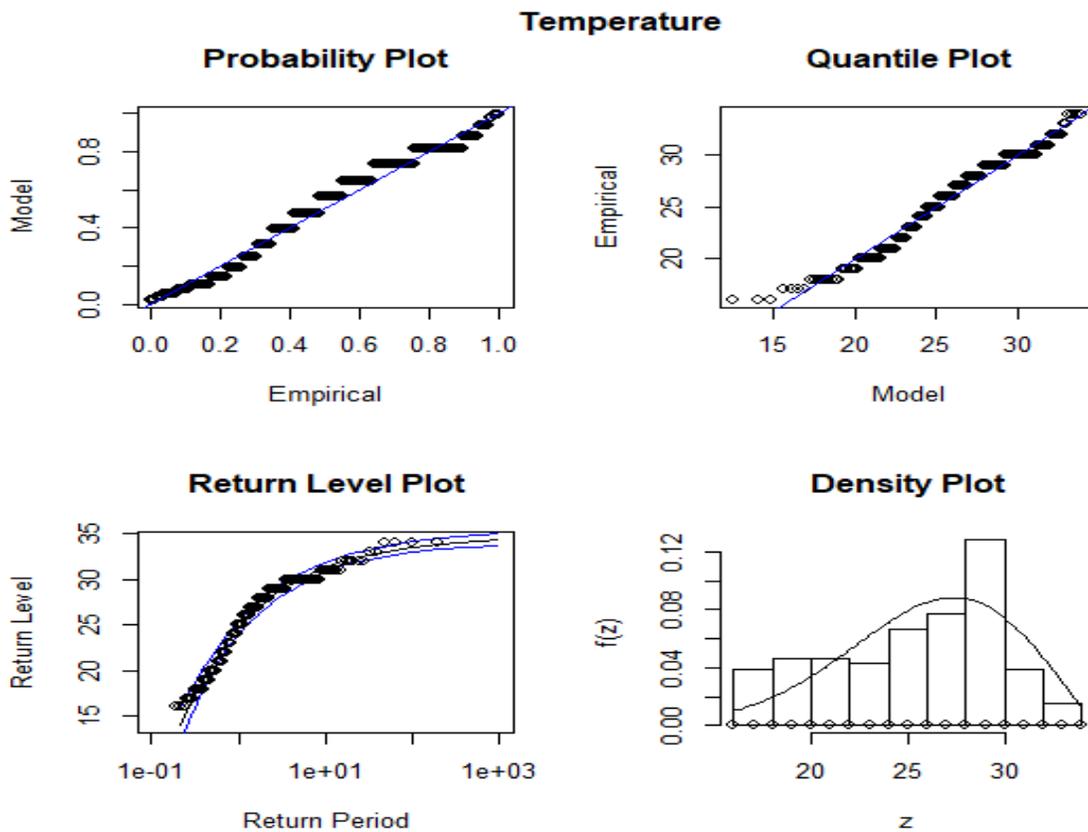


Figure III-6 Diagnostic Plot for the fitted GEV model for Maximum Temperature

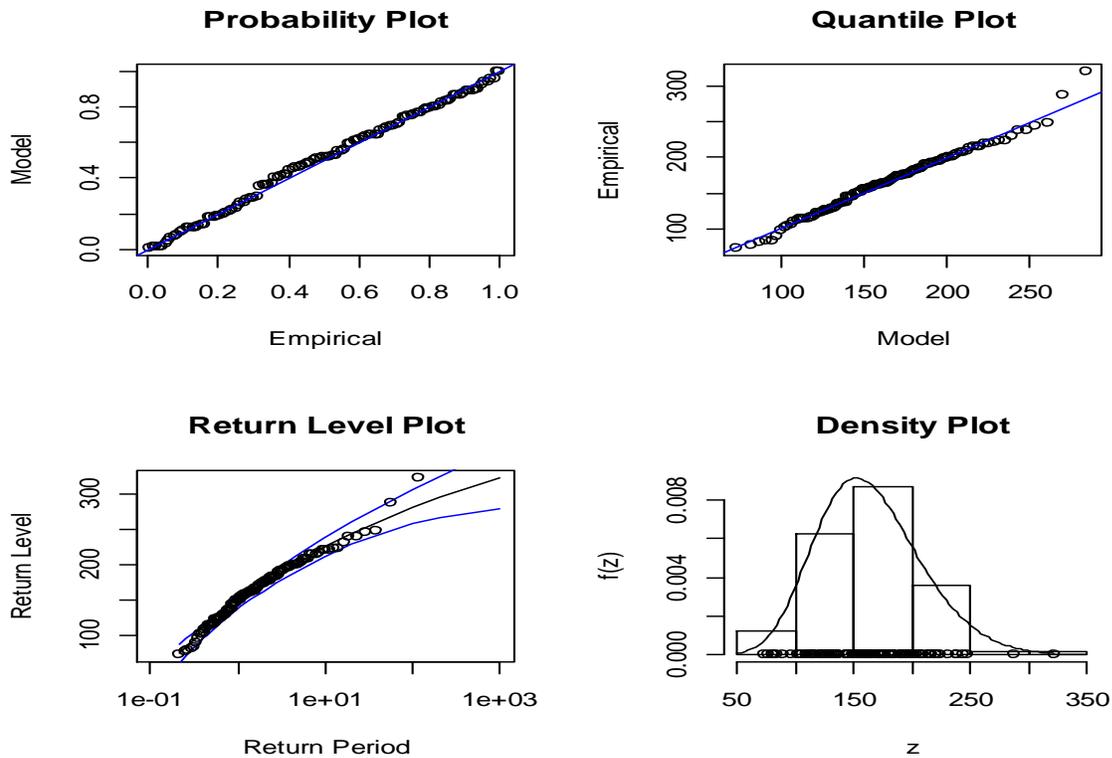


Figure III-7 Diagnostic Plot for the fitted GEV model for Maximum Precipitation

Previous studies on temperature have shown that the temperature database can be fit by the Weibull distribution. As shown in Figure III-6 and Figure III-7, the diagnostic of the daily temperature and the monthly data precipitation shows that both provide a good fit for Weibull distribution. This is also corroborated by the Kolmogorov-Smirnov Test for the temperature: $D= 0.11282$, $p\text{-value}= 0.167$ and for the precipitation: $D=0.13793$, $p\text{-value}=0.2198$. The table of the estimated parameters for each model is: Table III-2

Table III-2 Estimated Parameters of the GEV

Variables	Parameters	Estimate (Std error)	95% Confidence Interval
(Daily)	Location (μ)	24.6898798 (0.36988773)	(23.9649132; 25.4148464)
	Scale (σ)	4.7784612 (0.27845672)	(4.2326960; 5.3242263)
	Shape (γ)	-0.4752977 (0.04181325)	(-0.5572502; -0.3933453)

Precipitation (Monthly)	Location (μ)	145.6354033 (4.15362823)	(137.4944416; 153.77636507)
	Scale (σ)	40.944956 (2.86902928)	(35.3217619; 46.56815007)
	Shape (γ)	-0.1514944 (0.04848492)	(-0.2465231; -0.05646569)

As shown, the extreme value index (shape parameter γ) is negative, and this indicates that the Weibull distribution is the best to fit the data of maximums. In addition, the confidence interval excludes zero and thus, it assures that the two underlying distributions belong to the Weibull family. Accordingly, with the implementation of the Weibull distribution for both data, we can check the future return values for temperature and precipitation in the following 15, 30 and 40 years.

Return Level and Period:

Table III-3 Return Level

Variables	Return Period	GEV	POT
Temperature	15	31	33.7
(Daily)	30	32	33.9
	40	33	34
Precipitation	15	236	334
(Monthly)	30	254	364
	40	261	363

Regarding the expected future temperature and precipitation in Lebanon, it shows that the temperature will increase in the upcoming 15, 30 and 40 years whereas, the precipitation will be slightly increasing Table III-3. By comparing the two methods, the results of the POT are more coherent with the historical observations; as shown in the return level for the precipitation, all the

return values of the GEV method are smaller than the maximum of precipitation. Thus the POT method the most suitable.

Prediction Record Value for Temperature and Precipitation

With the Weibull as an acceptable distribution for the temperature and precipitation values, the location and the scale parameters are given by $\hat{\mu} = 27.6837406$ and $\hat{\sigma} = 7.0610784$ for temperature and $\hat{\mu} = 180.232817$ and $\hat{\sigma} = 3.920154$ for precipitation, according to the method of Maximum Likelihood.

Next we will predict the next record based on the previous record values using the results from [203].

Let R_0, R_1, \dots, R_n be the upper record values, then the BLUE from Arnold for the next record is given by:

$$R_{n+1}^* = R_n + \frac{1}{n(n+1)} \sum_{i=0}^{n-1} (R_n - R_i)$$

For the confidence interval of the estimated next record value we can use:

$$\frac{R_{n+1} - R_n}{\sigma^*}$$

Where $\sigma^* = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (R_n - R_i)$ is the BLUE (Best Linear Unbiased Estimator) of σ . Hence the 12 record values of temperature and the 5 record values of precipitation with their record time (L_0, L_1, \dots, L_n) : Table III-4

Table III-4 Records: Times and Values

Temperature	L_i	1	17	18	19	20	21	101	102	479	480	1597	4523
(Daily)	R_i	17	18	22	23	26	27	28	29	31	32	33	34
Precipitation	L_i	1	10	11	107	191							
(Monthly)	R_i	139	160	220	224	276							

There have been 12 temperature recorded and 5 precipitation recorded in Lebanon since 2003, we get respectively the following times for temperature and precipitation:

Temperature:

$$L_1 = 1 ((16/03)/2003), L_2 = 17((01/04)/2003), L_3 = 18((02/04)/2004), L_4 = 19((03/04)/2003),$$

$$L_5 = 20 ((04/04)/2003), L_6 = 21((05/04)/2003), L_7 = 101((24/06)/2003), L_8 = 102((25/06)/2003),$$

$$L_9 = 479(06/07/2004), L_{10} = 480(07/07/2004), L_{11} = 1597(29/07/2007), L_{12} = 4523(02/08/2015).$$

Precipitation:

$$L_1 = 1 (01/03/2003), L_2 = 10 (01/12/2003), L_3 = 11(01/01/2004), L_4 = 107(01/01/2012),$$

$$L_5 = 191 (01/01/2019)$$

Prediction records temperature:

Based on the above record values with $R_n = R_{12} = 34$, the BLUP of the next temperature record is

$$R_{n+1} = R_{13} = 34.5641 \text{ and the BLUE of } \sigma \text{ is } 7.33.$$

The upper 95th confidence limit for the BLUP of the temperature is: $(34, 34 + 7.33 * 0.10566) = (34, 34.77)$ where 0.10566 is the 95th percentile of the Weibull distribution.

Prediction records Precipitation:

With the 5 values of record $R_n = R_5 = 276$, the BLUP of the next precipitation record is $R_{n+1} = R_6 = 288.17$ and the BLUE of σ is 72.43.

The upper 95th confidence limit for the BLUP of the precipitation is: $(276, 276 + 72.43 * 0.10566) = (276, 283.65)$ where 0.10566 is the 95th percentile of the Weibull distribution.

After analysing the next predicted temperature and precipitation, it is time to know when to expect this record. It is not an easy subject ; according to Chandler (1952) [205], the waiting time to next record is infinity, although, Dargahi-Noubary (1990) [206] says that the waiting time for a new record increases proportionally with the number of records collected. Then he considers looking at the probability of a new record in the next n_2 years given observations for n_1 years.

$$P(T_2^* > n_2) = \frac{n_1}{n_1 + n_2}$$

Where T_2^* is the waiting time for a new record.

Hence, for $n_1 = 17$ years (number of years in the data base), the probability that we will have to wait for more than 5 years before observing a new record is $17/22=0.78$, while the probability to wait for more than 10 years is $17/27=0.63$.

Extreme Records

In addition to the future temperature records prediction, we seek for the estimation and prediction of extreme temperature intensities. As the world is getting warmer, whether due to the influence of

a human activity or natural variability, scientists are eager to predict the upcoming highest temperature which has a very small probability of exceedance.

The upper quantiles of the distribution x_p^* with $P(X > x_p^*) = p$, where X is the random variable of interest with very small p . To estimate the extreme quantiles, there exist three methods: non-parametric, parametric and semi-parametric [207]. For extreme value analysis, statisticians tend more likely to use semi-parametric or parametric methods. The BM and POT method use parametric methods, and the limit of the highest order statistic of a sequence of random variables must be of the extreme value type [200].

Using POT method, let u be the threshold where the values of the variables interest are chosen above it i.e. let $Y = X - u$.

$$F_{\gamma,\sigma}(x) = \begin{cases} 1 - \left(1 + \gamma \frac{x}{\sigma}\right)^{-\frac{1}{\gamma}}, & \gamma \neq 0 \\ 1 - \exp\left(-\frac{x}{\sigma}\right), & \gamma = 0 \end{cases}$$

Where $\sigma > 0$ and $x \geq 0$ for $\gamma \geq 0$ and $x \leq -\sigma/\gamma$ for $\gamma < 0$.

$F_u(x - u) \approx G_{\gamma,\sigma}(x - u) = G_{\gamma,\sigma,u}(x)$ for a threshold u very large.

After selecting the right threshold u for the temperature data X_1, X_2, \dots, X_N , we obtain N_u exceedance numbers above u . Then, by estimating the parameter of the GPD $\hat{\sigma}$ and $\hat{\gamma}$, the estimation of the conditional probability $\bar{F}_u(x) = P(X > x | X > u)$ and the unconditional probability $\bar{F}(x) = \bar{F}_u(x - u)\bar{F}(u)$ are given by:

$$\widehat{\bar{F}_u(x)} = \left(1 + \hat{\gamma} \frac{x}{\hat{\sigma}}\right)^{-1/\hat{\gamma}}$$

$$\hat{F}(x) = \frac{N_u}{N} \left(1 + \hat{\gamma} \frac{x - u}{\hat{\sigma}}\right)^{-1/\hat{\gamma}}, u < x < x_+$$

Then, the estimation of the high quantiles above the threshold u is given by:

$$\hat{x}_p^* = u + \hat{\sigma} \frac{\left(\frac{N_u}{Np}\right)^{\hat{\gamma}} - 1}{\hat{\gamma}}, p < \frac{N_u}{N}$$

To apply this method to the data of temperature and precipitation, first we have to choose a specific threshold u .

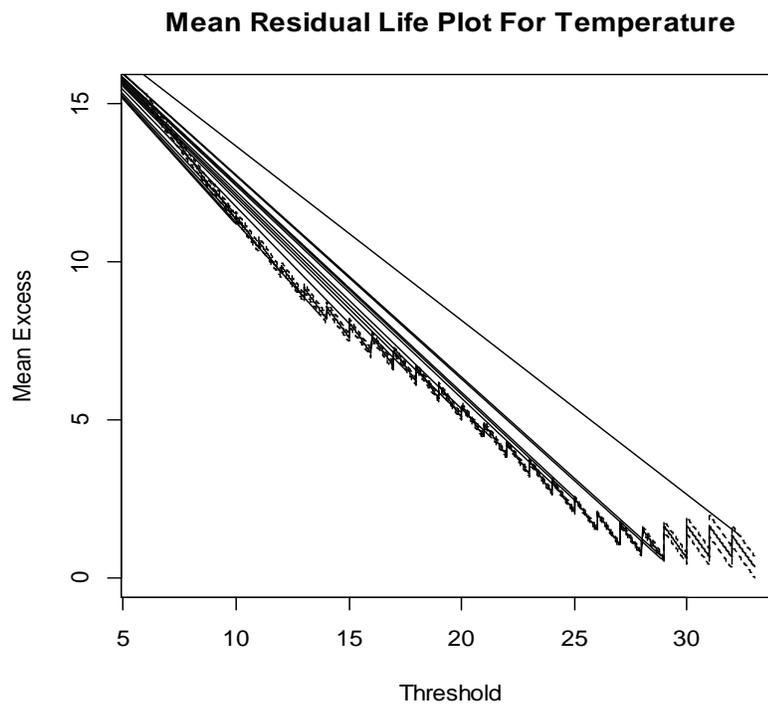


Figure III-8 MEF of Temperature

Mean Residual Life Plot For Precipitation

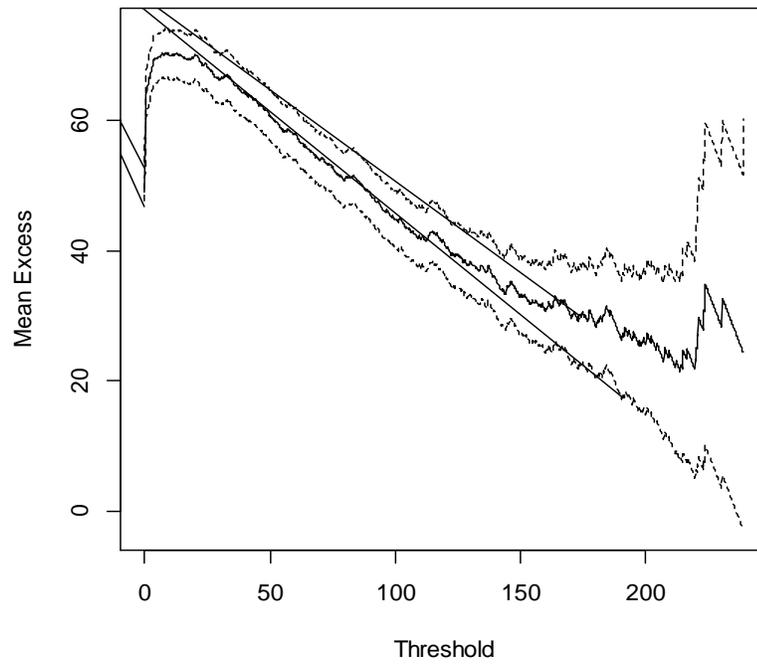


Figure III-9 MEF of Precipitation

According to the above figures (Figure III-8,

Figure III-9), the MEF (Mean Excess Function) for the temperature becomes linear above 28 degrees and the precipitation becomes linear above 170 mm. Then we choose 28 as a threshold for the temperature with $N_u = 377$ values above u and 17 for precipitation with $N_u = 61$ values above u . The best distribution to fit both data is the Pareto distribution with the lowest AIC between the three models (Exponential, Gumbel or Pareto);

Table III-5 Estimated Parameters for POT

Variables	Parameters	Estimate (Std error)
Temperature	Scale (σ)	1.9352626 (0.11105896)
	Shape (γ)	-0.2800372 (0.02913515)
Precipitation	Scale (σ)	31.47335482 (5.4486502)
	Shape (γ)	-0.05297684 (0.1167918)

From the above Table III-5, using the maximum likelihood method, we estimated the parameters $\hat{\sigma}$ and $\hat{\gamma}$ of the Pareto distribution for both temperature and precipitation data in order to calculate the quantiles of each variable.

$$\text{Then } \begin{cases} x_p^* = 28 + 1.94 \frac{\left(\frac{377}{5915 * p}\right)^{-0.28}}{-0.28} : \text{temperature quantiles} \\ x_p^* = 170 + 31.47 \frac{\left(\frac{61}{1380 * p}\right)^{-0.053}}{-0.053} : \text{precipitation quantiles} \end{cases}$$

Table III-6 Extreme Quantiles

Temperature		Precipitation	
Exceedance Probability	Quantile	Exceedance Probability	Quantile
0.1	29.23648	0.1	183.9107
0.05	30.47297	0.05	197.8213
0.01	40.36484	0.01	309.1065
0.005	52.72967	0.005	448.213

Exceedance probability and unconditional quantiles are given in Table III-6 for the distribution of temperature and precipitation respectively. As the value of the exceedance probability p decreases, the values of both temperature and precipitation increase widely. The estimated quantiles of the Pareto model are suitable with empirical quantiles computed from the temperature and precipitation values. For example; the unconditional 95th quantile of the Pareto distribution gives 30.47 degrees compared to the empirical 95th quantile computed directly from the value of temperatures which is equal to 29 degrees.

Temperature Sporadic or Emergent

The predicted record temperatures and the quantiles extreme temperatures have an increasing trend in the coming years due to climate change in Lebanon and Middle East. In order to detect if such an event is a sporadic or emergent, we test the sporadicity of the temperature or whether they are continuously increasing by using a non-parametric exact statistical test based on the number of observed records. This test was discussed in detail in a paper written by Khraibani et al. (2011 and

2019) [187], [188]. Their tests are based on the following ideas and theory: In case of an alerting phenomenon, the waiting times $(\Delta T_k)_{1 \leq k \leq n}$ between the occurrences of consecutive events should have a general tendency to decrease with k , while in case of sporadic events, the $(\Delta T_k)_{1 \leq k \leq n}$ should be i.i.d. This implies that N_n the number of lower records in the sequence $(\Delta T_k)_{1 \leq k \leq n}$ should show a tendency to increase. For that, Khraibani et al. [187] assume that the waiting times $(\Delta T_k)_{1 \leq k \leq n}$ are independent for each k with a continuous cumulative distribution function G_k and use N_n as their test statistic. Under the null hypothesis H_0 (sporadic events), the distribution of N_n is independent of G_k , thus allowing a nonparametric test of H_0 , while under the alternate hypothesis H_1 (emergence events), G_k is assumed to increase with k . (Khraibani et al. 2015) showed under H_0 the test statistic has an exact probability distribution that is a function of the Stirling Numbers of the first kind and is given by the following formula:

$$P_{H_0}(N_n = m) = \frac{|s(n, m)|}{n!}, 0 \leq m \leq n.$$

Where $s(n, m) = 0$ for $m > n$, and otherwise, $\{s(n, m)\}_{m \leq n}$ is defined by the following relationships [208]:

$$\prod_{j=0}^{n-1} (s - j) = \sum_{m=0}^n s(n, m) s^m, \forall s > 0.$$

Noted that, for n large enough with m not too large, $|s(n, m)|$ may be approximated by $|s(n, m)| \approx (n - 1)! (\ln n)^{m-1} [(m - 1)!]^{-1}$, which leads to the following approximate distribution given by:

$$P_{H_0}(N_n = m) \approx \frac{(\ln(n))^{m-1}}{n(m - 1)!}, m \geq 1.$$

H_0 is rejected for large values of N_n . It is noted that the exact distribution of N_n is always independent of the underlying distribution of the observations as long as they are independent and given by $P_{H_0}(N_n = m)$ [188], [203]. We apply this test in the temperature recorded data, there were for example for $n = 100$ intense temperature in the daily period we had $m = 10$ observed records and $P_{H_0}(N_{100} > 10) < \alpha = 5\%$, so we reject the null hypothesis and we can conclude that the temperature is an emergent phenomenon.

Conclusion

We presented in this paper an extreme event of temperature and precipitation data, where the two variables could be fitted by a Weibull distribution. We exposed two equivalent methods to model extreme values: the block maxima and the excess methods. As we only have few observations of these extreme events it is preferable to use a new method based on the study of records process to detect an emergent phenomenon by using a nonparametric test based on the exact probability distribution of the number of records. The properties of this statistical test consist of its exact distribution general setting, robustness according to the distribution underlying the set of observations, and its capability to detect an emergence even a slow one. Furthermore, it is worth recalling that the classical theoretical results for i.i.d. variables revealed that a few records can be observed among the first data, but, as n becomes large enough, the number of records N_n behaves as $\ln(n)$. According to the results shown above, we calculated the record values of future temperature records (BLUP) and the confidence interval using record-breaking theory. As the forthcoming time of the next record cannot be predicted, we have computed the probability of the waiting periods for the next records. Next, we calculated the estimation of extremes temperature quantiles. In conclusion, according to the values obtained

by the above used methods the future will reveal an increasing in the temperature of the globe followed by an increase in the precipitation levels.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une nouvelle méthode pour évaluer le changement climatique au Liban à partir des deux facteurs température et précipitations. Cette méthode est basée sur la théorie des valeurs extrêmes et sur la théorie de records. Le principal avantage de la méthode des records est que la distribution de la statistique de test est indépendante de la distribution des observations, et elle est exactement calculée pour chaque observation, c'est une méthode d'inférence dont nous avons testé l'hypothèse H_0 contre H_1 afin d'évaluer la tendance de la température, ce qui évite, dans certains cas, de mauvaises interprétations graphiques. En plus nous avons prédit les futures valeurs records de la température et de la précipitation ainsi que l'intervalle de confiance de ces prédictions. Toujours en se basant sur la théorie de records nous avons réussi à calculer la probabilité de temps d'attente pour observer un nouveau record. En ce qui concerne la TVE nous avons présenté les données extrêmes de température et de précipitations, où ces deux facteurs sont ajustés par une distribution extrême (Weibull). Afin de traiter statistiquement les extrêmes de ces deux facteurs, nous avons exposé deux méthodes équivalentes pour modéliser les valeurs extrêmes : les maxima de bloc et les méthodes d'excès ou la méthode de dépassement du seuil. Ensuite, nous avons calculé l'estimation des quantiles de températures extrêmes et le temps de retour des valeurs extrêmes. En conclusion, selon les valeurs obtenues par les méthodes utilisées, nous constatons que la température augmente d'une manière significative au cours des années et dans le futur proche ce qui affecte un changement climatique dangereux au Moyen-Orient et au Liban et qui renforce aussi l'instabilité de la variation des paramètres physico-chimiques de la rivière Litani au Liban.

Chapitre IV Evaluation des propriétés physico-chimiques de l'eau dans la rivière Litani

Nous signalons que ce chapitre fait partie d'un article publié dans

« American Journal of Analytical Chemistry ».

Evaluation of the Physico-Chemical Properties of the Waters on the Litani River Station Quaraoun

Ali Hayek^{1,2,3}, Nabil Tabaja^{1,2}, Samir Abbad Andaloussi³, Joumana Toufaily^{1,2}, Evelyne Garnie-Zarli³, Abbas El Toufaily^{1,2}, Tayssir Hamieh^{1,2*}

¹Laboratory of Materials, Catalysts, Environment and Analytical Methods Laboratory (MCEMA), EDST, FS, Lebanese University, Hadath, Lebanon

²Laboratory of Applied Studies for Sustainable Development and Renewable Energy (LEADDER), EDST, Lebanese University, Hadath, Lebanon

³Laboratoire Sol Eau Systèmes Urbains (Leesu), Université Paris Est, Paris, France

Email: *tayssir.hamieh@un.edu.lb

How to cite this paper: Hayek, A., Tabaja, N., Andaloussi, S.A., Toufaily, J., Garnie-Zarli, E., El Toufaily, A. and Hamieh, T. (2020) Evaluation of the Physico-Chemical Properties of the Waters on the Litani River Station Quaraoun. *American Journal of Analytical Chemistry*, 11, 90-103.
<https://doi.org/10.4236/ajac.2020.112007>

Received: January 9, 2020

Accepted: February 16, 2020

Published: February 19, 2020

Copyright © 2020 by author(s) and Scientific Research Publishing Inc. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Abstract

Water security is a very important purpose facing the world in the last decay as one of the main consequences related to the risks of climate change. Water quality of Litani River's at Quaraoun Lake station in Lebanon was evaluated by measuring various physicochemical parameters between 2008 and 2018. Samples were performed and analyzed the first of every month. Different analytical methods were used to determine the values of 11 physico-chemical parameters. Different statistical methods, such as Principal Component Analysis and the Times Series Representation, were applied to the results to evaluate the water characteristics, determine the operation of the ecosystem and study the correlation between the different parameters in the Quaraoun station. Industrial, agricultural and sewage water pollution of the Litani River were demonstrated by the high concentration of sulfate, phosphate and ammonia. High bacterial activity was proved from the high decreasing of the dissolved oxygen. Important correlations between the different parameters and between the parameters of the ecosystem and the weather were proved.

Keywords

Litani River, Water Characteristics, Physico-Chemical Parameters, Statistical Analysis

1. Introduction

Water is a natural resource essential for life in any ecosystem [1]. Maintaining its

IV.1 Introduction générale

Ce chapitre présente l'article "**Evaluation of the Physico-Chemical Properties of the Waters on the Litani River Station Qaraoun**" publié dans "**American Journal of Analytical Chemistry**".

Dans tout ce qui précède, nous avons vu un impact global du changement climatique sur la qualité des eaux de surface. Dans la poursuite de ces travaux de recherche, nous étudions la qualité d'eau de la rivière Litani à la station Qaraoun au Liban dont l'intérêt principal est de mesurer divers paramètres physico-chimiques entre les années 2008 et 2018. Nous présentons dans ce chapitre un aperçu rapide sur les méthodes existantes dans la littérature sur l'étude de la qualité d'eau. Des échantillons ont été prélevés et analysés le premier (1^{er}) de chaque mois. Ensuite nous décrivons les différentes méthodes analytiques qui sont utilisées pour déterminer les valeurs des 11 paramètres physico-chimiques. Nous signalons que plusieurs méthodes statistiques, telles que l'analyse des composantes principales et la représentation des séries temporelles, sont introduites dans ce chapitre afin d'évaluer les caractéristiques de l'eau, ainsi de déterminer le fonctionnement de l'écosystème et d'étudier la corrélation entre les différents paramètres physico-chimiques à la station Qaraoun. Comme résultats importants dans ce chapitre, notons que la pollution industrielle, agricole et des eaux usées de la rivière Litani ont été démontrées par la forte concentration de sulfate, de phosphate et d'ammoniaque. Une activité bactérienne élevée a été prouvée par la forte diminution de l'oxygène dissous. Des corrélations importantes entre les différents paramètres et entre les paramètres de l'écosystème et la météo ont été significativement mis en évidence.

IV.2 MOTIVATION

L'eau est une ressource naturelle indispensable à la vie dans tout écosystème. Le maintien de sa qualité est une préoccupation majeure pour une société qui doit subvenir à des besoins en eau de plus en plus importants. L'analyse statistique des paramètres physico-chimiques donne une vue globale du fonctionnement de la rivière Litani au cours des années. Une étude préliminaire du Litani, de 2008 à 2018, avait pour but de mettre en évidence les caractéristiques essentielles de la rivière et le mode de fonctionnement de son écosystème sur la station Quaroun. L'exploitation des données n'a été possible que par l'utilisation de méthodes statistiques, en calculant les coefficients de corrélations afin d'étudier la relation entre les paramètres physico-chimiques et en utilisant l'analyse factorielle des correspondances. Une première analyse a été effectuée à partir des moyennes annuelles des 11 paramètres obtenus lors des prélèvements à la station Quaroun. Avant d'appliquer la méthode d'analyse en composantes principales sur notre base des données nous expliquons l'utilité de cette méthode. D'abord l'ACP permet d'interpréter des relations existant entre une série de variables du type p caractères numériques mesurés sur n individus. On condense l'essentiel des informations données par ces variables dépendantes en un nombre plus restreint de variables fondamentales indépendantes ou fortement corrélées entre elles pour permettre des représentations géométriques. On déduit de nouveaux caractères par combinaison linéaire qui deviennent des axes. Ces axes sont non corrélés, de variance maximale et d'importance décroissante. Or, Cette méthode est employée comme critère de sélection des différents paramètres visés (Horn, 1965). D'abord, nous abordons l'analyse univariée en commençant à étudier les caractéristiques individuelles de chaque variable. Cela peut être fait en utilisant des tableaux de fréquence, des graphiques et des résumés numériques (moyenne, écart type, etc.)

L'origine principale du phosphate dans l'eau est l'eau usée. Une augmentation importante de la quantité d'eau usée exposée dans la rivière, conduit à une augmentation importante de la

concentration du phosphate dans l'eau. Le phosphate, avec les produits azotés (ammoniac et ammonium...), est à l'origine du phénomène d'eutrophisation. Ce phénomène est caractérisé par une croissance excessive des plantes et des algues due à la forte disponibilité des nutriments. Il est relié directement à une diminution du taux de l'oxygène (TDO) dans l'eau. Ce qui ralentie la transformation de l'ammonium en nitrite et de l'oxydation de ce dernier en nitrate qui est le moins toxique. Et par suite il conduit à une augmentation du pH du milieu. Cette augmentation du pH, diminue le taux de dissociation des sels minéraux et favorise ces précipitations, ce qui conduit à une diminution du TDS.

L'origine principale du sulfate dans l'eau est naturellement les minéraux qui sont utilisés dans l'industrie. On peut donc en déduire que l'origine du sulfate dans l'eau est l'eau provenant des industries versée directement dans la rivière. La diminution de la concentration du phosphate est reliée directement à une diminution du pH du milieu.

L'origine principale de l'ammoniac (et l'ammonium) dans l'eau est l'agriculture. Ces produits existent dans les engrais, et arrivent à l'eau de surface avec le ruissellement. Le cycle d'azote est important et il est à l'origine de l'équilibre entre les différentes formes des produits azotés (ammonium, nitrate et nitrite). L'ammonium se transforme en nitrite (nitrification bactérienne). Ce dernier s'oxyde en nitrate. Le nitrate est la forme la moins toxique, alors que le nitrite est la forme la plus toxique. Une augmentation de l'activité bactérienne, favorise la transformation de l'ammonium en nitrite. Un taux important d'oxygène favorise l'oxydation de ce dernier en nitrate. Donc une diminution du taux d'oxygène dans l'eau causée par l'eutrophisation, diminue l'activité bactérienne et conduit ainsi à une augmentation de la concentration de l'ammonium (augmentation du pH du milieu) et à une diminution des concentrations du nitrite et nitrate.

On peut ainsi conclure, comme beaucoup d'auteurs l'ont déjà démontré, qu'il y a une relation forte entre les différents paramètres physico-chimiques de l'eau.

Par exemple, une augmentation de la concentration d'ammonium, augmente le pH du milieu et diminue le TDS. Une diminution du TDO conduit à une diminution de la concentration du nitrite, nitrate et sulfate. Le nitrite s'oxyde en nitrate et le sulfite s'oxyde en sulfate. Ainsi une diminution de la concentration de l'un conduit à l'augmentation de la concentration de l'autre. Une augmentation de la concentration du phosphate conduit à une diminution du taux de l'oxygène dissous dans l'eau (TDO).

Article 3: Evaluation of the physicochemical properties of the waters on the Litani River Station Qaraoun

Abstract

Water security is a very important purpose facing the world in the last decay as one of the main consequences related to the risks of climate change. Water quality of Litani River's at Qaraoun Lake station in Lebanon was evaluated by measuring various physicochemical parameters between 2008 and 2018. Samples were performed and analyzed the first of every month. Different analytical methods were used to determine the values of 11 physico-chemical parameters. Different statistical methods, such as Principal Component Analysis and the Times Series Representation, were applied to the results to evaluate the water characteristics, determine the operation of the ecosystem and study the correlation between the different parameters in the Qaraoun station. Industrial, agricultural and sewage water pollution of the Litani River were demonstrated by the high concentration of sulfate, phosphate and ammonia. High bacterial activity was detected from the high decreasing of the dissolved oxygen. Important correlations between the different parameters and between the parameters of the ecosystem and the weather was noted.

Keywords: Litani River; Water Characteristics; Physico-Chemical Parameters; Statistical Analysis.

Introduction

Water is a natural resource essential for life in any ecosystem[79]. Maintaining its quality is a major concern for the society which must meet the growing needs for water with the rapid development of the modern economy and the continuous expansion of population[80]. In fact, natural factors and human activities such as irrigation, industrial activities and sewage water introduce high amount of chemical and biological pollutants, directly or by ruff, to the surface water. As a result, the physicochemical properties of rivers and other surface features are affected[81][82][83]. These influences lead to many disruptions to the natural environment and to an unpleasant ecosystem [84]. Hence the importance of studying the water quality by estimating the physicochemical quality of water which cannot be measured in a single way, but, by a set of parameters of different properties will be of our high interest Previous works focused on the water quality by measuring different parameters such as total dissolved solids, TDS and the concentration of phosphate sulfate, ammonia and other nutrients. Other researchers studied the effect of seasonal factors on the concentration of pollutants in the surface water especially the runoff during the periods of flooding[116][117][118][119]. A relation between the nutrient loading to the rivers and the ecosystem has been reported by the Millennium Ecosystem Assessment.[209] .

Litani River is the most important river in lebanon. Due to its geographic extension along the Bekaa Valey which constitutes the agricultural reservoir of Lebanon, passing through the southern Lebanon, Litani River is a vital lifeline for the Lebanese community. The length of the river which is about 170 km has numerous tributaries including 30 main sources and around 140 wells managed by the administration and a very large number of small sources as well as more than 1200 wells which are also exploited by farmers [113]. It is divided into two parts, an upper part which begins from its multiple sources up to Qaraoun Lake (upper basin). The second part goes from Lake Qaraoun to the Mediterranean (lower basin) Figure IV-1.

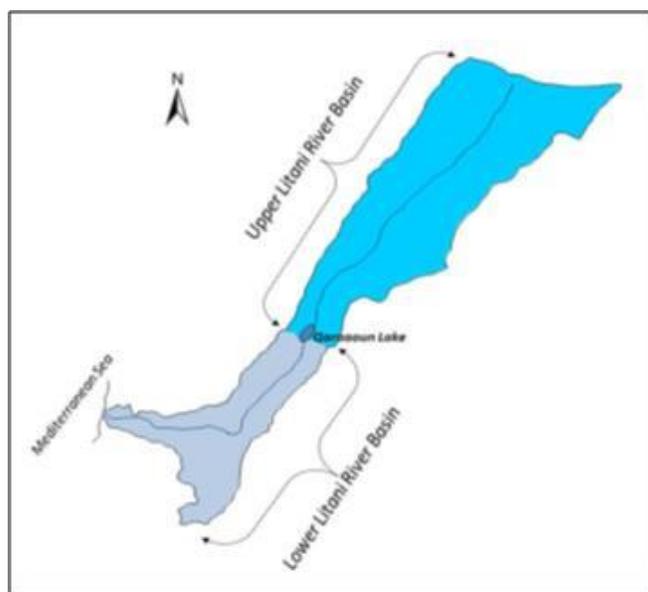


Figure IV-1 A representative map shows the two main basins of the Litani River separated by Qaraoun Lake.

In recent decades, the water quality of the upper Litani basin has been deteriorated [114]. Unfortunately, this resource is subjected to a strong pollution exerted by the urban, industrial and agricultural development concentrated in its coastal zones. The study of the environmental problem which is linked to the water pollution in this river, notably Qaraoun Lake is not new.[114][126][210] The origins of pollution, its effects on the natural environment, as well as the consequences on water quality are now well documented. The importance of Qaraoun Lake is in its contribution to the irrigation of agricultural land in southern Lebanon and in the Bekaa region [115]. The interest of this article returns to the study of a number of physicochemical properties in a large scale (long duration arriving to 11 years), it is therefore possible to assess the evolution of the water quality at Qaraoun Lake of the Litani River. By measuring various physico-chemical parameters in this long duration, we can study the development of the pollution resources in the region and determine their types in which the most important is to determine the correlation between the different parameters and between the parameters and the climate impact. This article is divided into several sections: first

we present the sampling method used for water withdrawals over different periods. Then we analyze the physicochemical parameters in a global view of the functioning of the Litani river over the years. In the following, the exploitation of the data which was only possible by using statistical methods was adopted to calculate the correlation coefficients in order to study the relationship between the physico-chemical parameters. The analysis was carried out using annual averages of 11 parameters obtained during sampling at the Qaraoun station.

Materials and methods

Site Description

Qaraoun Lake (Middle of Litani River), situated at the coordinate: N33° 33 '309 ", E35° 42' 024", with an elevation of 864m above the sea level is the biggest lake in Lebanon with a total capacity of 220 Million m³.

Sampling Test

All samples were taken from the same points of Lake Qaraoun (N33° 33 '309 ", E35° 42' 024"). The same sampling method was used for all samples, at a distance of 2 m from the side and 20 cm deep from the free surface of the water. Each sample consists of 5 trials, while each measurement was performed 5 times and the average was recorded. These samples were taken at the beginning of each month.

Measurement Method

In the following section we present the parameters, the measurement location, the instrument used, the period, the date and the numbers of the samples. Table IV-1

Table IV-1 Description Method of Sampling of Parameters

Parameters	Description	Testing situation	Instruments	Sampling Period	Data Period	Number of Samples
T (°c)	Temperature	In-Situ	Thermometer	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
pH	Potential hydrogen	In-Situ + In Lab	pH meter, La Motte	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
EC (µS/cm)	Electrical Conductivity	In-Situ	Conductivity Meter, La Motte	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
TDS (mg/l)	Total Dissolved Solids	In-Situ	TDS Meter, La Motte	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
DO (mg/l)	Dissolved Oxygen	In-Situ	DO Gauge, La Motte	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Sulfate	In Lab	Spectrophotometry. Method H3450-QNT. Powder pillows Hach8051 Cat number 2106769	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
NO ₂ ⁻ (mg/l)	Nitrite	In Lab	Spectrophotometry. Method H2610. FXD Nitrite, low range, Diazotisation method, powder pillows. Hach 8507. NitriVer 3.	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
NO ₃ ⁻ (mg/l)	Nitrate	In Lab	Spectrophotometry. Method H2520. QNT Nitrate, Mid range, Cadmium reduction method, powder pillows. Hach method 8171 Nitra Ver 5.	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Phosphate	In Lab	Spectrophotometry. Method H3035-QNT, Phosphorous, reactive, PhosVer 3, Test N, tube procedure. Hach 8048 Cat number 2106069	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132

NH₃ (mg/l)	Ammonia	In Lab	Ammonia Ionic strength adjuster, powder pillows. Cat 2980699. Ion selective electrode	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132
Salinity (mg/l)	Salinity	In Lab	Sal Portable meter, La Motte	One Sample Every Month	Jan-2008 to Dec- 2018	132

Results and discussions

Annual and quarterly variation of the parameters

The study of the average annual values of each parameter were calculated and the variations of the annual means of the parameters were plotted. Figure IV-2 shows the variations of the average annual quantity of the physicochemical parameters over the 11 years between 2008 and 2018 at the Qaraoun site of the Litani River. These graphs were carried out to evaluate the evolution of the essential characteristics of the river, to determine the natures and sources of the pollution and to study the mode of functioning of the ecosystem and its evolution and its future on the Qaraoun station. The parameters are divided into four categories according to the ranges of the variations of their values during the 11 years of the study.

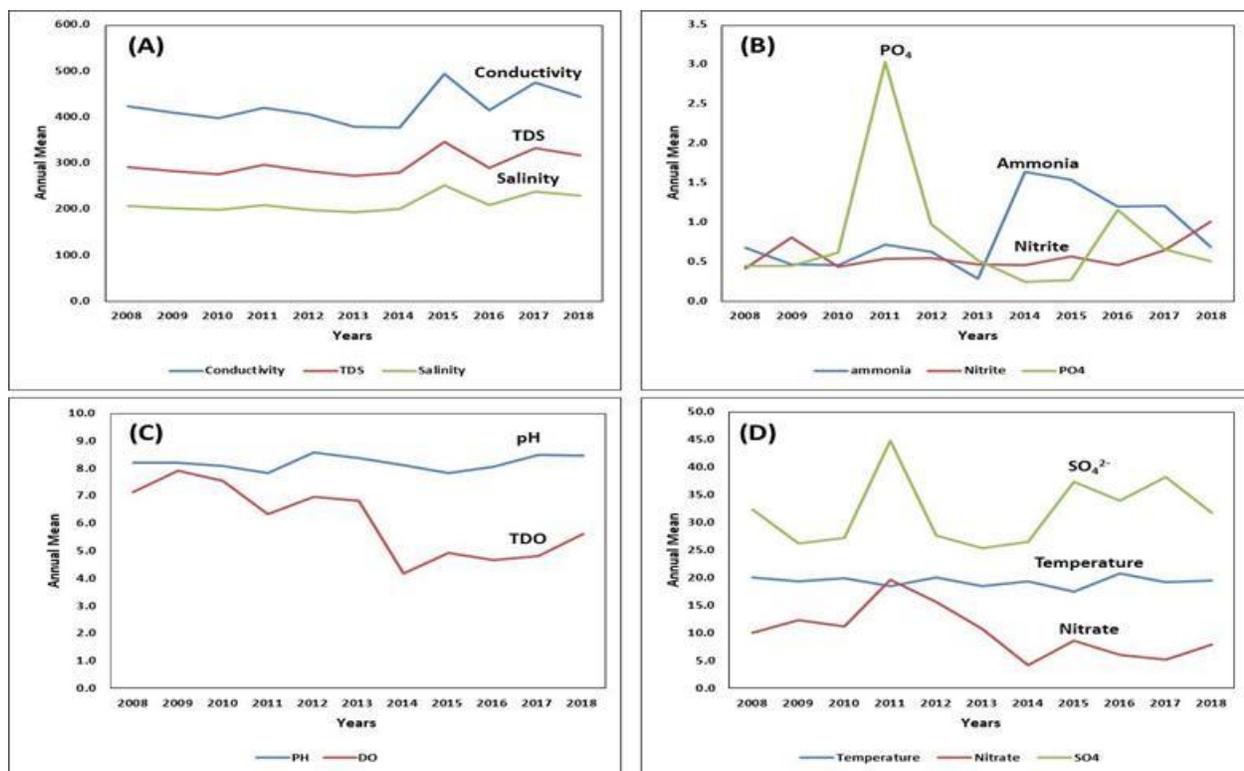


Figure IV-2 Evolution of the annual means between 2008 and 2018.

The study of the evolution of the values of all the parameters shows an imbalance which results in decreasing and increasing. But overall, on the slope of evolution, we notice an increase in all parameters. This confirms the development of the pollution sources in the vicinity of the river. According to the Figure IV-2, three zones can be distinguished whose pollution rate is very high. The first zone is between 2010 and 2013, in which a large increase in the concentration of phosphate, nitrate and sulfate and an increase in the pH of the water were observed. A peak was reached in 2011, then the values of these parameters gradually decrease until 2013. The origin of phosphate is usually from wastewater and domestic water. This confirms a highly developed human activity related to a huge population development next to the river in the same period of the Syrian crisis. This demographic development is accompanied by an industrial and agricultural development accompanied by the increase of the concentrations of sulfate and nitrogen products respectively. In

this zone a slight increase in conductivity, TDS and salinity was observed. The second zone is between 2013 and 2016, this zone is characterized by a large decrease in phosphate concentration and a large increase in the concentrations of ammonia and sulfate. A slight increase in nitrate in 2015 and a slight increase in TDO in this year have been detected. In the same year, a significant increase in conductivity, TDS and salinity was observed. These results confirm the reduction of pollution by wastewater and domestic water, but a significant development of agricultural and industrial activity is estimated. The third zone is between 2016 and 2018. This zone is characterized by a significant increase in phosphate concentration in 2016, this concentration is gradually decreasing. Ammonia concentration decreases progressively while nitrite and nitrate concentrations increase was observed. This nitrogen cycle is accompanied by a slight increase in the rate of TDO in this zone. An increase in sulfate concentration was detected. These increases are accompanied by increases in TDS, conductivity, and salinity. These results confirm a development of agricultural and industrial activity and an increase in the rate of wastewater and domestic waste discharged into the river without any treatment.

Statistical study of physicochemical parameters

Annual variation

Table IV-2 Descriptive statistics for parameters represents the statistical elements calculated on all the values obtained on all physicochemical parameters during the period studied between 2008 and 2018. The results obtained are significant, representative and confirm the results observed for the annual means that are studied in Figure IV-2. A large difference between the minimum and maximum values has been observed for ammonia, nitrite, nitrate, sulfate and phosphate accompanied by a smaller difference in TDS, salinity and conductivity. These results are consistent with the sharp increases in 2011 and 2016 Figure IV-2. The coefficients of variation of

these parameters, summarized in Table IV-2, confirm this interpretation. The first quartile and the third quartile show that these high values are sustainable and not due to immediate exposures. For phosphate it is observed that the minimum value is 0.26 mg.L⁻¹ and the maximum value is 3.03 mg.L⁻¹ while more than 25% of the values of the phosphate concentration are greater than 0.84 mg.L⁻¹. The same observation is confirmed for ammonia and sulfate.

Table IV-2 Descriptive statistics for parameters

Statistic	Temperature °C	pH	DO mg/l	Conductivity microS/cm	TDS mg/l	Salinity mg/l	ammoniac mg/l	Nitrite mg/l	Nitrate mg/l	(SO4) mg/l	(PO4) mg/l
Minimum	17.50	7.83	4.17	378.75	274.25	194.33	0.28	0.43	4.25	25.42	0.26
Maximum	21.09	8.63	7.91	496.57	357.14	258.71	1.64	1.42	19.67	44.83	3.03
1st Quartile	18.71	8.07	4.82	403.17	282.17	200.50	0.56	0.45	6.53	26.88	0.45
Median	19.33	8.19	5.94	413.00	288.18	208.92	0.69	0.55	10.00	32.42	0.53
3rd Quartile	20.00	8.44	7.06	456.46	319.73	227.48	1.26	0.62	11.79	35.94	0.84
Mean	19.33	8.22	6.02	428.57	302.31	216.66	0.88	0.62	10.03	32.35	0.81
Standard deviation	0.98	0.28	1.32	43.93	30.82	23.66	0.47	0.29	4.70	6.37	0.79
Variation coefficient	0.05	0.03	0.21	0.10	0.10	0.10	0.51	0.45	0.45	0.19	0.93

Seasonal variation

The average values of the parameters are significant to understand the general evolution of the physico-chemical parameters and to study the evolution of the water quality of the river and the lake as well as the development of the sources of the pollution and their natures. Other factors can influence the quality of water, the most important of these factors is the amount of precipitation. A statistical study was carried out to take into consideration the effect of the amount of precipitation on the values of the physicochemical parameters of the water. The results are summarized in Table

IV-3 and are represented by the histograms of Figure IV-3 in which the parameters are divided into four groups according to the ranges of these average values. Each year has been divided into three seasons (dry, semi dry/wet and wet). The dry months are the months of summer (6, 7 and 8). The wet months are the months of winter (12, 1 and 2) while the semi dry/wet months are the months of autumn and spring (3, 4, 5, 9, 10 and 11). A seasonal average was calculated for each year, then a seasonal average over the 10 years of the study was calculated. TDO and nitrate concentration are the least affected by the variation of seasonal conditions (temperature and precipitation) with a significance (sig.= 0.93) and (sig.=0.88) respectively. Two other parameters have a little more affected by these variations, these parameters are nitrite and sulfate with a significance equal to 0.33 and 0.46 respectively. The other parameters are very affected by seasonal variations with (Sig.=0). Conductivity, TDS, and salinity are influenced by precipitation as the rate of erosions and sediments increases to the river with runoff increasing the concentration of magnesium, sodium, and potassium ions and other inorganic products like carbonate, bicarbonate, sulfate and chloride and therefore increase the turbidity of the water. The resulting runoff of the precipitation increases the amount of ammonia, sulfate and phosphate that reaches the river[211]. So, we observe an increase in the concentrations of these anions in water.

Table IV-3 Seasonal variation of the different physico-chemical parameters

Season		Temperature	pH	DO	Conductivity	TDS	Salinity	Ammonia	Nitrite	Nitrate	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻
Wet	Mean	16.98	7.95	6.02	470.62	330.43	233.08	1.28	0.68	9.88	34.12	1.64
	SD	2.46	0.44	1.23	72.82	50.30	38.38	0.84	0.42	7.20	35.63	4.42
Semi dry/wet	Mean	19.42	8.21	6.14	423.37	298.56	215.91	0.85	0.59	10.27	30.30	0.58
	SD	1.97	0.54	1.92	80.94	58.00	43.13	0.71	0.89	6.05	6.99	0.68
Dry	Mean	22.85	8.55	6.04	361.02	255.25	182.62	0.46	0.45	9.79	30.54	0.32
	SD	2.91	0.60	1.91	52.65	38.26	28.90	0.42	0.19	5.84	7.79	0.46
	Sig.	0.00	0.00	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.88	0.46	0.00

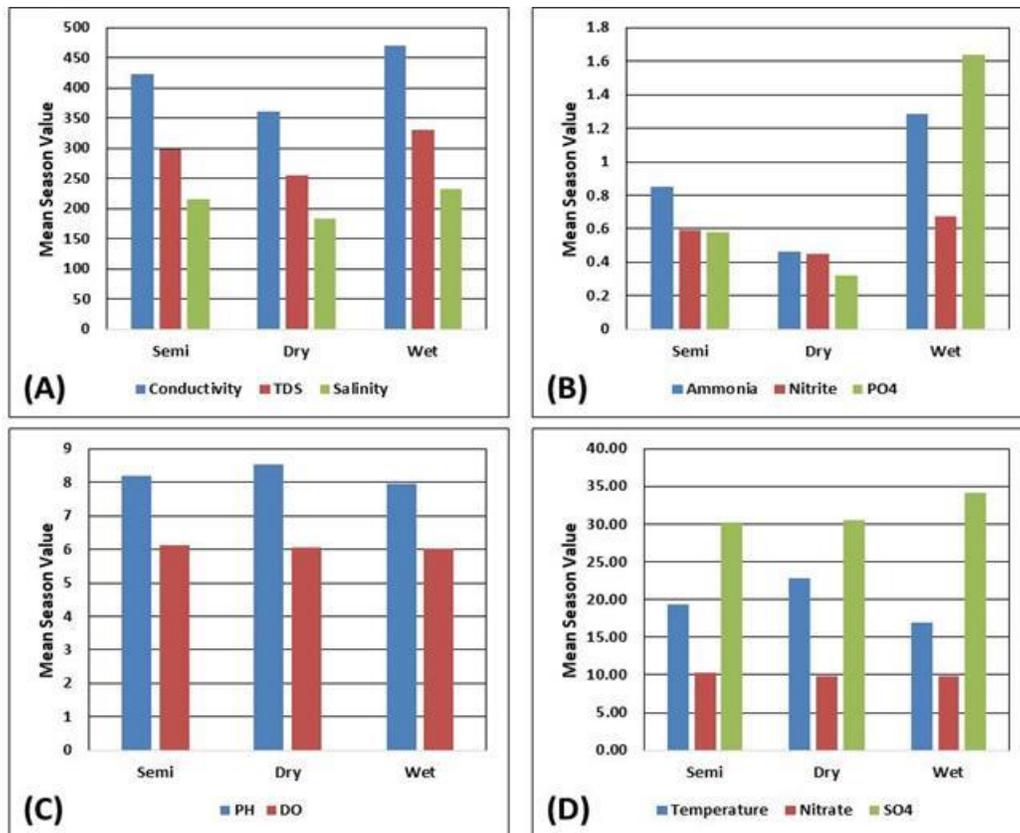


Figure IV-3 Quarterly evolution of the means of the physico-chemical parameters.

Multivariate Statistical Analysis

Correlations between the parameters

The exploitation of the data was only possible through the use of statistical methods, by calculating the correlation coefficient in order to study the relationship between the physicochemical parameters by using the Principal Component Analysis (PCA)[212]. The contribution of the correlation between physicochemical parameters allows giving an approach on the common origin of certain parameters. The results of this study are summarized in Table IV-4.

Referring to Table IV-4, we observe that temperature is an independent parameter while a strong correlation exists between TDS, salinity and conductivity with correlation factors greater than 0.9 (0.98 and 0.97). This is a normal result because the three parameters are influenced by the same conditions that are summarized. Consequently, significant correlation factors are observed between these parameters (TDS, salinity and conductivity) with the concentrations of nitrite and sulfate (of the order of 0.6). The correlation between TDS, salinity and conductivity is negative with temperature due to seasonal conditions especially the precipitation. In the rainy months, the temperature decreases and the precipitation rate increases which leads to a significant runoff towards the water currents, which increases the turbidity of the water and consequently of the TDS, the salinity and the conductivity. The opposite phenomenon is detected in dry months, when temperatures rise and the precipitation rate decreases. To explain the relationship between nitrogen products (ammonia, nitrite and nitrate) it is necessary to rely on the nitrogen cycle. The main source of ammonia (and ammonium) in water is the agriculture. These products exist in fertilizers, and then it gets to surface water with runoff. The nitrogen cycle is important and it is the origin of the balance between the different forms of nitrogen products (ammonium, nitrate and nitrite). Ammonium is transformed into nitrite (bacterial nitrification). The latter oxidizes to nitrate. Nitrate is the least toxic form, while nitrite is the most toxic form. An increase in bacterial activity promotes the transformation of ammonium into nitrite. A high level of oxygen promotes the oxidation of the latter to nitrate. Then a decrease in the oxygen level in the water leads to an increase in the concentration of ammonium (and an increase in the pH of the medium) and nitrite because of the important bacterial activity and to a decrease in the concentration of nitrate. This interpretation results in a positive correlation of ammonia, pH, and nitrite and a negative correlation of ammonia and nitrite with TDO and nitrate. There is a strong positive correlation between TDO and nitrate because high levels of TDO increase the rate of oxidation of nitrite to nitrate. With regard to phosphate, the

correlation with sulfate comes from the fact that the development of industrial pollution and that of pollution by wastewater and domestic water are simultaneous (2011 and 2016 in Figure IV-2 for example). Another very important correlation exists between phosphate, TDO and nitrate which cannot be observed in Table IV-3. This relationship can be detected in Figure IV-3, where the TDO and nitrate concentration decrease with increasing phosphate concentration. Phosphate, with nitrogenous products (ammonia and ammonium, etc.), are the cause of the eutrophication phenomenon. This phenomenon is characterized by excessive growth of plants and algae due to the high availability of nutrients. It is directly related to a decrease in the level of oxygen in water. This slows the conversion of ammonium to nitrite and the oxidation of the latter to nitrate, which is the least toxic. And as a result it leads to an increase in the pH of the middle. But this correlation is not shown in Table IV-4 because the TDO and the nitrate concentration continue to decrease after the re-decrease in phosphate concentration. This phenomenon is due to the fact that the algae continue to develop for a few years during the decrease of the phosphate concentration. The TDO is re-increasing with the decrease in phosphate between 2017 and 2018. We also note that a strong correlation values mean that over the 11 years of study, these parameters have varied in the same direction and that the relationship between them is almost linear.

Table IV-4 Correlation matrix between the parameters.

Parameters (Annual)	Temperature C	DO mg/l	Conductivity microS/cm	TDS mg/l	Salinity mg/l	ammonia mg/l	Nitrite mg/l	Nitrate mg/l	(SO ₄ ²⁻) mg/l	(PO ₄ ³⁻) mg/l
Temperature C	1									
DO mg/l	0.160	1								
Conductivity microS/cm	-0.389	-0.355	1							
TDS mg/l	-0.452	-0.456	0.980	1						
Salinity mg/l	-0.433	-0.484	0.973	0.995	1					

ammonia mg/l	-0.164	-0.880	0.325	0.381	0.419	1				
Nitrite mg/l	-0.140	-0.025	0.607	0.655	0.645	-0.158	1			
Nitrate mg/l	-0.139	0.613	-0.256	-0.330	-0.390	-0.604	-0.103	1		
(SO₄²⁻) mg/l	-0.320	-0.457	0.627	0.593	0.567	0.338	0.152	0.143	1	
(PO₄³⁻) mg/l	-0.030	-0.020	-0.102	-0.138	-0.186	-0.153	-0.127	0.679	0.634	1
<i>Values in bold are different from 0 with a significance level alpha=0.05</i>										

Principal Component Analysis PCA

The main component analysis aims to reduce the number of numerical variables to be analyzed by grouping their information on a strictly lower number of new variables called main components.[213]

In our study, we have introduced 11 physico-chemical parameters that we have available and will be studied over a period between 2008 and 2018. The Table IV-5 below gives in the Extraction column, the percentage of information for each of the 11 variables which are reproduced by the model. First, Kaiser's criterion leads us to select two axes, which retains 63.47% of the total inertia.

Table IV-5 Total explained variance

Component	Initial Eigenvalues		
	Total	% of Variance	Cumulative %
1	4.638	42.165	42.165
2	2.343	21.301	63.466

Then, we can deduct from the Table IV-6 below, the variables "Temperature", "DO", "Conductivity", "TDS", "Salinity", "Ammonia" and "Nitrite" contribute on axis 1. Similarly, we notice that, all the remaining variables are well represented on axis 2, which gives 63.47% of the initial information, which is a completely satisfactory level for this type of analysis.

Table IV-6 Component Matrix

	Component	
	1	2
Temperature C	-.441	-.336
PH	.088	-.719
DO mg/l	-.658	-.147
Conductivity microS/cm	.924	-.004
TDS mg/l	.966	-.044
Salinity mg/l	.974	-.069
ammonia mg/l	.584	.134
Nitrite mg/l	.553	-.348
Nitrate mg/l	-.470	.575
(SO4) mg/l	.618	.702
(PO4) mg/l	-.138	.850
Extraction Method: Principal Component Analysis.		

Finally, to restore the physicochemical parameters we draw the correlation circle using PCA and we obtain the Figure IV-4 where the points constitute a cloud of which only 2 axes realize 63.46% of the inertia table. The first, axis (component 1) is characterized by a percentage of inertia of 42.165%. The parameters (DO, Conductivity, TDS, Salinity, Ammonia, Nitrite) are the best correlated to the axis which show a significant correlation (± 0.5 to ± 0.93) with axis 1.

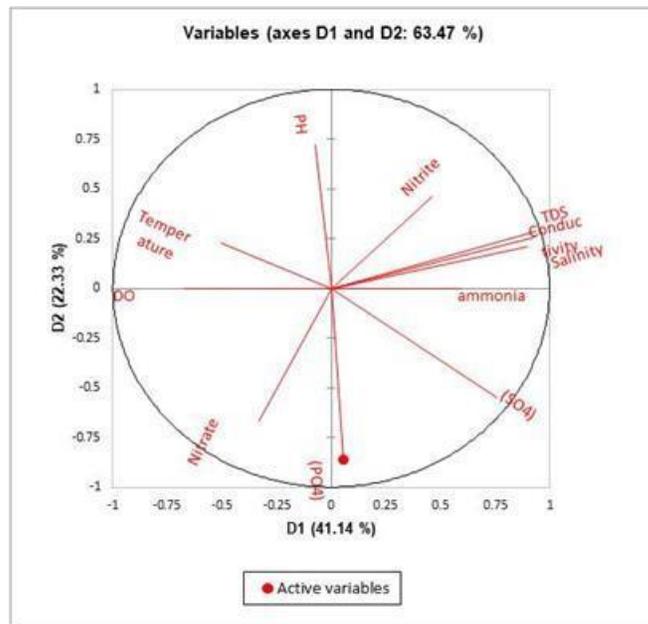


Figure IV-4 Correlation circle of the parameters

From the above Figure IV-4 (correlation circle), we can see that the parameters “conductivity”, “TDS” and “Salinity” are very close to the correlation circle and therefore very well represented on the mapping. The rather closed angle (starting from the origin) formed by the 3 points indicates that these 3 variables are fairly well correlated with each other. On the other hand, the almost right angle formed by the three variables respectively by "PO4", and "PH" indicates that these three variables are independent of "PO4" and "PH". The fact that these three variables are close to axis 1 indicates that they are very well represented by this axis. As they are very far from axis 2, we can conclude that they are little represented by this axis. It can be deduced that a huge increase in the amount of wastewater exposed in the river leads to a significant increase in the phosphate concentration in the water. In addition, phosphate is directly linked to a decrease in the level of oxygen (TDO) in water. This slows the conversion of ammonium to nitrite and the oxidation of the latter to nitrate, which is the least toxic. And as a result it leads to an increase in the pH of the medium. This increase in pH

decreases the rate of dissociation of mineral salts and promotes this precipitation, which leads to a decrease in TDS.

Axis 1 (D1) opposes the physicochemical parameters "conductivity, TDS, Salinity, Ammonia, Nitrite" to the "DO" parameter. This axis is therefore the first main component, measuring the distribution between the parameters. Note that 6 out of 11 parameters are well represented on axis 1 (table: the quality of representation is equal to the squared coordinate, for example the quality of representation of the TDS parameter is equal to $(0.966^2) = 0.933$).

Regarding axis 2, the parameters "PO₄", "PH" are very well correlated with the axis. The parameters "Nitrate", "Temperature" are also correlated but to a lesser extent.

The main origin of sulfate in water is naturally the sulfates which are used in industry. So the origin of sulfate in water is industrial water exposed directly in the river. Sulfite oxidizes to sulfate, so a decrease in the oxygen level in the water slows this oxidation, which decreases the concentration of the sulfate and leads to an increase in the concentration of the sulfite[214]. The decrease in phosphate concentration is directly related to a decrease in the pH of the medium.

A high level of oxygen promotes the oxidation of the latter to nitrate. Then a decrease in the oxygen level in the water due to eutrophication, decreases the bacterial activity and then leads to an increase in the ammonium concentration (increase in the pH of the medium) and a decrease in the concentrations nitrite and nitrate.

Conclusion

Annual average values show that the sources of pollution of the Litani River and the subsequent Qaraoun Lake are diverse. High concentrations of sulfate, ammonia and phosphate were detected.

These anions come from human activities, wastewater and domestic waters are the origin of phosphate. Industrial activities are the main source of sulfate and agricultural activities are the origin of nitrogen products. Other seasonal conditions influence the physicochemical parameters, especially precipitation, which increases the rate of runoff and consequently the organic and inorganic products that come to the river which increases the turbidity of the water and the rate of pollution (sulfate, phosphate, ammonia, TDS, salinity and conductivity). These pollutions are durable and not immediate. Correlations between different parameters were shown by statistical studies reflecting strong positive relationships between TDS, salinity, conductivity, nitrite, nitrate and sulfate. Negative correlations occur between ammonia and nitrite with nitrate. The latter has a strong positive correlation with TDO. A significant negative relationship has been shown between phosphate and TDO that strongly affects the nitrogen cycle.

Conclusion

L'origine principale du phosphate dans l'eau provient essentiellement des eaux usées. Une augmentation énorme de la quantité des eaux usées versées dans la rivière, conduit à une augmentation importante de la concentration du phosphate dans l'eau. Le phosphate, avec les produits azotés (ammoniac et ammonium...), sont les principaux facteurs du phénomène d'eutrophisation. Ce phénomène, due à la forte disponibilité des nutriments, est caractérisé par une croissance excessive des plantes et des phyto et zooplanctons. Il est relié directement à une diminution du taux de l'oxygène (TDO) dans l'eau. Ce qui ralentie la transformation de l'ammonium en nitrite et l'oxydation de ce dernier en nitrate, (qui est le moins toxique). Et par suite, il conduit à une augmentation du pH du milieu. Cette augmentation du pH, diminue le taux de dissociation des sels minéraux et favorise des précipitations chimiques, ce qui conduit à une diminution du TDS.

L'origine principale du sulfate dans l'eau est naturellement les minéraux qui sont utilisé dans l'industrie. Ainsi l'origine du sulfate dans l'eau est principalement due aux déversements des eaux d'origine industrielle dans la rivière. Le sulfite s'oxyde en sulfate, entraînant une diminution du taux d'oxygène dans l'eau, le ralentissement des phénomènes d'oxydation ont pour conséquence la diminution de la concentration du sulfate et conduit à une augmentation de la concentration du sulfite. La diminution de la concentration du phosphate est reliée directement à une diminution du pH du milieu.

Chapitre V Etude de la variation spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques dans la rivière Litani

Nous signalons que ce chapitre fait partie d'un article soumis dans

« Environmental Monitoring and Assessment (EMAS) ».

V.1 Introduction générale

Le chapitre 5 de cette thèse présente l'article « **Multivariate spatial and temporal analysis to study the variation of physico-chemical parameters in Litani River, Lebanon** » qui est soumis dans le journal Environmental Monitoring and Assessment (EMAS). Ce chapitre étudie la variabilité spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques dans plusieurs stations de la rivière Litani. Comme nous l'avons déjà vu dans les chapitres précédents, la variabilité climatique est une réalité qui s'affirme avec des impacts notables sur les ressources en eau au moment où la demande devient de plus en plus prégnante. Or, depuis plusieurs décennies, le changement climatique ainsi que les pollutions de la rivière Litani ont été confrontés à une forte variabilité spatio-temporelle. Ce chapitre étudie la variabilité spatio-temporelle de la qualité d'eau de la rivière Litani qui s'est détériorée en raison de la croissance démographique rapide et de l'activité industrielle et agricole. Nous utilisons l'analyse multivariée de la variation spatio-temporelle de la qualité de l'eau afin d'améliorer les projets de gestion de la qualité de l'eau et le traitement de la rivière sur plusieurs stations localisées sur la rivière Litani échantillonnées sur plusieurs saisons. Nous déterminons avec les méthodes statistiques abordées dans ce chapitre la variation spatio-temporelle des 11 paramètres physico-chimiques durant l'année 2018. De plus, nous abordons dans ce chapitre des techniques statistiques multivariées dont l'objectif est d'étudier l'évolution spatio-temporelle des paramètres choisis ainsi que la corrélation entre les différents paramètres sur plusieurs saisons. Nous utilisons aussi l'analyse en composantes principales (ACP) pour identifier les variations des paramètres durant les saisons humides et sèches. Finalement nous appliquons l'analyse multivariée de la variance (MANOVA), cette méthode nous fournit des résultats robustes pour différencier la liaison des paramètres entre plusieurs stations et ainsi détecter les points noirs de la pollution des eaux agricoles, industrielles et

des eaux usées dans la station de Jeb-Jennine à partir des fortes concentrations d'ammoniac, de sulfate et de phosphate.

V.2 Motivation

La pollution des eaux de surface a retenu l'attention du monde entier tant en recherche qu'en terme de politiques publiques. Les principales causes de dégradation de la qualité des eaux de surface sont les activités anthropiques, telles que les caractéristiques hydrologiques, le changement climatique, les précipitations, les activités agricoles et les rejets d'eaux usées des industries. La qualité de l'eau de nombreuses grandes rivières dans plusieurs pays s'est considérablement détériorée en raison des activités anthropiques au cours des dernières décennies. Différents systèmes de traitement de l'eau, basés sur des méthodes physiques, chimiques et biologiques ont été étudiés et appliqués pour le traitement de la contamination des eaux de surface des rivières comme la coagulation et la filtration membranaire (micro et ultrafiltration), l'adsorption, l'oxydation avancée, la photocatalyse et d'autres méthodes. Le choix de la méthode utilisée dans le système de traitement est basé sur la nature et la concentration des contaminations identifiées. Cependant, dans la gestion de la qualité des eaux de surface, le coût de traitement est de la même importance que la réalisation des normes nationales ou internationales de la qualité de l'eau. Par conséquent, une gestion efficace des ressources en eau nécessite des informations sur la variabilité de la qualité de la rivière et de l'eau de surface. L'analyse spatiale de la qualité des eaux fluviales est importante pour identifier les points noirs de pollution, là où se concentrent les sources de contamination, et ainsi parvenir à l'optimisation des coûts du traitement de l'eau. Cependant, les variations saisonnières, telles que la température et les précipitations, affectent la qualité d'eau de la rivière et entraînent des valeurs différentes entre les saisons. Ainsi, l'analyse d'échantillons provenant de différentes zones (études spatiales) à différentes saisons (étude temporelle) donne un aperçu de l'évolution annuelle de l'écosystème et améliore donc la gestion du traitement des eaux de la rivière et de surface.

Nous rappelons dans ce chapitre quelques descriptions de la rivière Litani. Le bassin du Litani représente l'équivalent de 20% de la superficie du Liban (site officiel libanais sur le fleuve Litani 2019). La rivière Litani constitue une « bouée de sauvetage » hydrologique pour les secteurs industriel et agricole de la Bekaa et du sud du Liban. De plus, la rivière fournit l'eau potable et la production d'énergie nécessaires dans ces régions. Plusieurs études sur la qualité de l'eau de la rivière Litani ont été menées. Les études démontrent que la qualité de l'eau de la rivière s'est détériorée en raison de la pollution des eaux industrielles, agricoles et des eaux usées. Nous avons déjà étudié dans le chapitre précédent l'évolution de la qualité d'eau de la rivière Litani sur une période de 11 années. La quantité d'eau rejetée du bassin équivaut à 24% de la pluviométrie nette reçue par l'ensemble du territoire libanais ; cette quantité représente plus de 40% de la quantité totale d'eau courante dans les rivières internes. Cette caractéristique de la rivière Litani en plus des travaux antérieurs a démontré l'impact des facteurs environnementaux sur la qualité d'eau.

Aucun travail de recherche n'avait relié jusqu'à présent, la variation saisonnière spatiale et temporelle des paramètres physico-chimiques dans la rivière Litani et en particulier sur plusieurs stations. Le but de ce chapitre est donc d'évaluer les valeurs des différents paramètres physico-chimiques en termes d'espace et de saison. L'application de différentes méthodes multivariées telles que, l'analyse en composantes principales (ACP), l'analyse multivariée de la variance (MANOVA) ont été largement utilisées ces dernières années pour analyser les données environnementales.

Trois stations ont été sélectionnées dans le bassin du Litani pour réaliser l'étude spatiale, Jeb-Jenine, le lac Quaroun et Quasmieh. La sélection de ces sites est due à deux choix principaux : la première est la répartition stationnée des zones, à la partie supérieure (station Jeb-Jénine), au milieu (lac Quaroun) et au sud de la rivière (Quasmieh). Le deuxième choix est dû à l'importance des trois zones, Jeb-Janine est située dans la zone des industries complexes avec une grande population,

Quaroun, le seul lac au Liban qui divise la rivière Litani en deux parties, Quasmieh se localise au sud est proche de la mer méditerranée, et qui se caractérise par des restaurants et par plusieurs activités agricoles. Tous les échantillons ont été prélevés aux mêmes points dans les trois stations. La méthode d'échantillonnage a été utilisée pour tous les échantillons, 20 cm de profondeur de la surface libre de l'eau. Chaque échantillon se compose de 5 essais, chaque mesure a été répétée 5 fois auquel la moyenne est enregistrée. Ces échantillons ont été prélevés au début de chaque mois (1^{er} janvier 2018 au 1^{er} décembre 2018).

Article 4: Multivariate spatial and temporal analysis to study the variation of physico-chemical parameters in Litani River, Lebanon.

Abstract:

Water quality of Litani River was deteriorated due to rapid population growth and industrial and agricultural activity. Multivariate analysis of spatio-temporal variation of water quality is useful to improve the projects of water quality management and treatment of the river. In this work, analysis of samples from different locations at different seasons was investigated. The spatio-temporal variation of physico-chemical parameters of the water was determined. A total of 11 water quality parameters were monitored over 12 months during 2018 at 3 sites located in different areas of the river. Multivariate statistical techniques were used to study the spatio-temporal evolution of the studied parameters and the correlation between the different factors. Principal Component Analysis (PCA) was applied to the responsible factors for water quality variations during wet and dry periods. The multivariate analysis of variance (MANOVA) was also applied to the same factors and gives the best results for both spatial and temporal analysis. A black point of agricultural, industrial and sewage water pollution was identified in Jeb-Jennine station from the high concentrations of ammonia, sulfate and phosphate.

Keywords: Water quality, Litani River, Principal component analysis, Seasonal Variation, Spatial variation

Introduction

River water continues to be able to sustain all human beings and other organisms for centuries. Water quality is an important factor in determining environmental change, closely associated with social and economic development [215], [216]. Currently, surface water pollution has received an attention around the world. The main causes of degradation of surface water quality are natural and anthropogenic activities, such as hydrological features, climate change, precipitation, agricultural activities and wastewater discharges from industries [217]–[220]. Water quality of many large rivers in many countries has deteriorated considerably as a result of these anthropogenic activities in recent decades [221], [222]. Several studies on the identification of the nature and sources of contamination of many rivers have been conducted over the last decades [223]–[227]. [223]–[227] In this context, different systems based on physical, chemical and biological methods have been studied and applied for the treatment of river surface water contamination such as coagulation and membrane filtration (micro and ultrafiltration), adsorption, advanced oxidation, photocatalysis and other methods [228]–[232]. The selection of the method used in the treatment system is based on the nature and the concentration of the identified contaminations. However, in surface water quality management, the treatment cost may be as important as the achievement of water quality goals. Therefore, efficient management of water resources requires information about the variability of the river and surface water quality [233]–[236]. Spatial analysis of the quality of river water is important to identify the black points of pollution, where the contamination sources are concentrated, and therefore achieve the cost optimization of the water treatment. However, seasonal variations, such as temperature and precipitation, affect the water quality of the river and lead to different attributes between seasons [227]. Thus, analysis of samples from different locations (spatial studies) at different seasons provides an overview of the seasonal evolution of the ecosystem and therefore improves the management of the river and surface water treatment.

Litani River is the largest and the most important river in Lebanon. Litani basin forms an equivalent of 20% of Lebanon's area (Lebanese Official website on Litani River 2019). Litani River forms a lifeline for the industrial and agricultural sectors in Bekaa and Southern Lebanon areas. In addition, the river provides the portable water and the energy production in these regions. Several studies on the water quality of Litani River have been conducted. The studies demonstrate that the quality of the water in the river have been deteriorated due to industrial, agricultural and sewage water pollution [114], [210]. Other studies have been performed at a long duration (11 years) and have evaluated the evolution of the water quality of the river. These studies are concentrated at the lake Quaroun [227]. The quantity of water discharged from the basin is equivalent to 24% of the net rainfall received by the entire Lebanese territory; this quantity represents more than 40% of the total amount of running water in the internal rivers [227]. This characteristic of the Litani River in addition to the previous works has demonstrated the impact of the environmental factors on the water quality. Therefore, there was not much work that relates the spatial and the temporal seasonal variation of physicochemical parameters in the Litani River and especially on several sites. The purpose of this article was to evaluate the level of different physicochemical parameters in terms of space and season in the Litani River. The application of different multivariate methods such as cluster analysis (CA), principal component analysis (PCA), multivariate analysis of variance (MANOVA) has been used extensively in recent years to analyze environmental data [237]–[239]. In this article, the results of analysis of selected samples are to examine the quality of the water and evaluate the pollution status of the Litani River between various sites. The relationship between sampling sites and the identification of water quality variables responsible for spatial and temporal variations in water quality were studied.

Materials and methods

Site Selection

Three sites have been selected in Litani basin for the sampling to achieve the spatial study, Jeb-Jenine station, Lac Quaroun and Quasmieh. The selection of these sites is due to two main concepts; the first one is the stationed distribution of zones, at the upper (Jeb-Jenine station), the middle (Lac Quaroun) and the bottom (Quasmieh) of the river. The second concept is due to the importance of the three zones, while Jeb-Janine station is located in the zone complex industries and huge population, the second is the Lac of Quaroun, the only lac in Lebanon and divided it into two parts, and the last one is the Quasmieh Station located near the sea, and it is a zone of restaurants and agricultural activities.

Site Description

- Jeb-Jenine (Upper Litani River), with the coordinate: N33° 38' 331" E35° 46' 79", with elevation above the sea level equal to 920 m. Jeb-Jenine is the largest and most populated town in its district
- Quaroun Lac (Middle of Litani River), with the coordinate: N 33° 32' 918" E 35° 41' 765", with elevation above the sea level equal to 864 m. Quaroun is the biggest lac in Lebanon with the total capacity of 220 Million cubic meter.
- Quasmieh (Lower Litani River), With the coordinate: N 33°19' 773" E 35°15' 613", with elevation above the sea level equal to 4m.

Sampling Test

All samplings were taken from the same points in the three stations. The same sampling method was used for all samples, 2 m from the side, 20 cm deep from the free surface of the water. Each

sample consists of 5 trials, while each measurement was performed 5 times and the average is recorded. These samples were taken at the beginning of each month.

Measurement Method

The parameters, the location of the measurement, the analytical method used, the period, the date and the numbers of samples are summarized in Table V-1. The samples were monitored and measured from the first of January 2018 until the first of December 2018.

Table V-1 Description Method of Sampling of Parameters

Parameter	Description	Testing situation	Instrument	Sampling Period	Number of Samples
T (°c)	Temperature	In-Situ	Thermometer	One Sample (5 Trials) Every Month	12
PH	Potential hydrogène	In-Situ + In Lab	PH meter, La Motte	One Sample Every Month	12
EC (µS/cm)	Electrical Conductivity	In-Situ	Conductivity Meter, La Motte	One Sample Every Month	12
TDS (mg/l)	Total Dissolved Solids	In-Situ	TDS Meter, La Motte	One Sample Every Month	12
DO (mg/l)	Dissolved Oxygene	In-Situ	DO Gauge, La Motte	One Sample Every Month	12
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	Sulfate	In Lab	Spectrophotometry. Method H3450-QNT. Powder pillows Hach8051 Cat number 2106769	One Sample Every Month	12
NO ₂ ⁻ (mg/l)	Nitrite	In Lab	Spectrophotometry. Method H2610. FXD Nitrite, low range, Diazotisation method, powder pillows. Hach 8507. NitriVer 3.	One Sample Every Month	12
NO ₃ ⁻ (mg/l)	Nitrate	In Lab	Spectrophotometry. Method H2520. QNT Nitrate, Mid range,	One Sample Every Month	12

			Cadmium reduction method, powder pillows. Hach method 8171 Nitra Ver 5.		
PO ₄ ³⁻ (mg/l)	Phosphate	In Lab	Spectrophotometry. Method H3035-QNT, Phosphorous, reactive, PhosVer 3, Test N, tube procedure. Hach 8048 Cat number 2106069	One Sample Every Month	12
NH ₃ (mg/l)	Ammonia	In Lab	Ammonia Ionic strength adjuster, powder pillows. Cat 2980699. Ion selective electrode	One Sample Every Month	12
Salinity (mg/l)	Salinity	In Lab	Sal Portable meter, La Motte	One Sample Every Month	12

Data Analysis: Results and discussions

The obtained results of all studied parameters were analyzed using statistical methods. All statistical analyses were performed using the statistical software ElliStat, R (4.0.2). However, in this article, several dependent variables were measured for each sampling unit instead of a variable thus the multivariate analysis of variance (MANOVA) determine if the average vectors of several groups (sites) were identical or not i.e in statistical terms, test whether the variables or the physicochemical parameters differed significantly from one group to another. The Principal Component Method (PCA) is used to extract different factors that reduce the contribution of the least significant variables.

Spatial and seasonal Analysis

MANOVA and PERMANOVA statistical method

In this section, the parameters were analyzed in more detail in different stations by using the MANOVA and PERMANOVA multivariate statistical techniques to explore temporal and spatial variations. The non-parametric “Kruskal-Wallis H” tests showed that the water quality parameters were significantly different among the sampling months ($p < 0.05$). Kruskal-Wallis test Table V-2 were performed to compare the water quality parameters among the different sampling stations and revealed that except for temperature, all other parameters were significantly different ($p < 0.05$). Also we used the non-parametric “Mann-Whitney U” test Table V-3 showed that among the 11 water quality parameters, one (temperature) is significantly different between the 2 seasons ($p < 0.01$), whereas the other parameters were not significantly different with regard to seasons ($p > 0.05$).

Table V-2 Kruskal Wallis test. Grouping variable: Station

Test Statistics Parameters											
	Temperature	PH	DO	Conductivity	TDS	Salinity	ammonia	Nitrite	Nitrate	SO ₄	PO ₄
Chi-Square	.374	4.222	22.566	23.027	22.366	21.129	23.438	9.856	12.700	13.322	18.340
Df	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Asymp. Sig.	.829	.121	.000	.000	.000	.000	.000	.007	.002	.001	.000

Table V-3 Mann-Whitney test. Grouping variable: Season

Test Statistics Parameters											
	Temperature	PH	DO	Conductivity	TDS	Salinity	ammonia	Nitrite	Nitrate	SO ₄	PO ₄
Mann-Whitney	70.50	118.0	126.5	154.5	136.5	136.5	141	149	137.5	119	141
Asymp. Sig.	.005	.138	.486	.923	.500	.500	.566	.735	.518	.216	.579

Also, the statistical difference between the three different stations (Quaroun, Jeb-Jenine, Quasmieh) were tested by using a statistical method Permutational Multivariate Analysis of Variance,

“PERMANOVA”, which based on “Bray-Curtis” resemblance matrix of square-root transformed data [240]. We interest in this article, to test the differences of the quality water between the three stations in Litani River, for that we analyzed the density data by using the one-way PERMANOVA which based on the Euclidean distance matrix of untransformed data Figure V-1. For all the PERMANOVAs, P-values were obtained from 9999 permutations. The Monte Carlo tests were also considered in case of low numbers of unique permutations. Also, the PERMANOVA results were visualized by non-metric multidimensional scaling (nMDS) ordinations performed on the Bray-Curtis similarity matrix applied to square root transformed data. The statistical analyses (univariate PERMANOVA and pair-wise t tests) showing significant differences among stations.

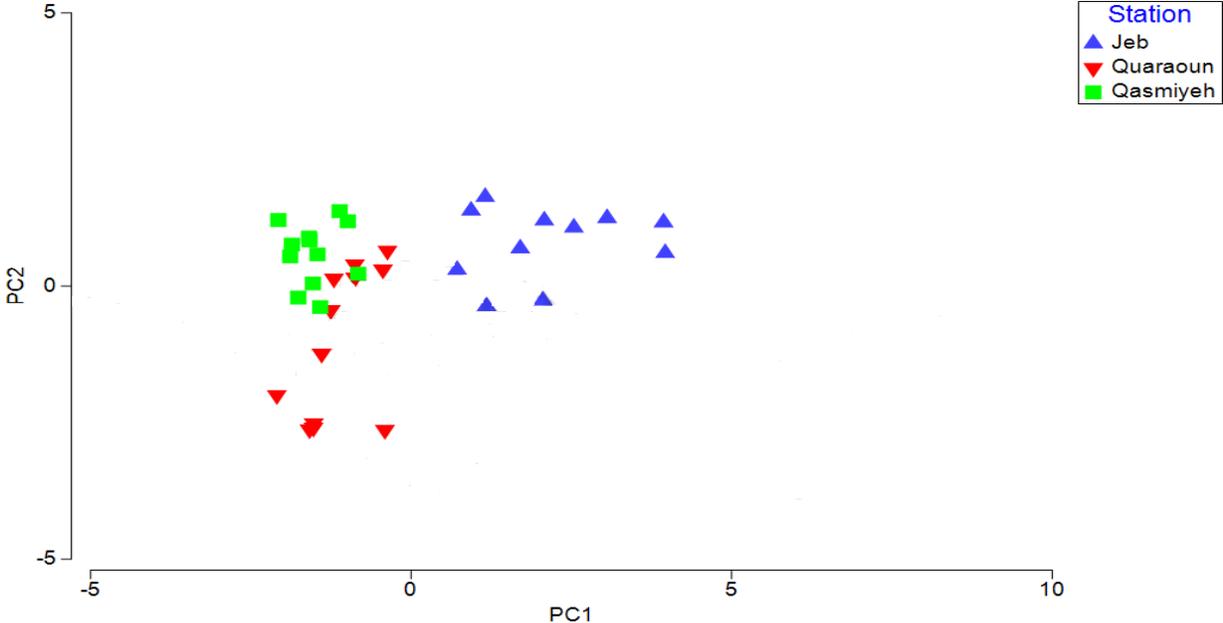


Figure V-1 Schematic diagram of geometric partitioning of the water quality parameters in the three stations ($g = 3$) for one-way PERMANOVA in two dimensional (bivariate, $p = 2$) Euclidean space.

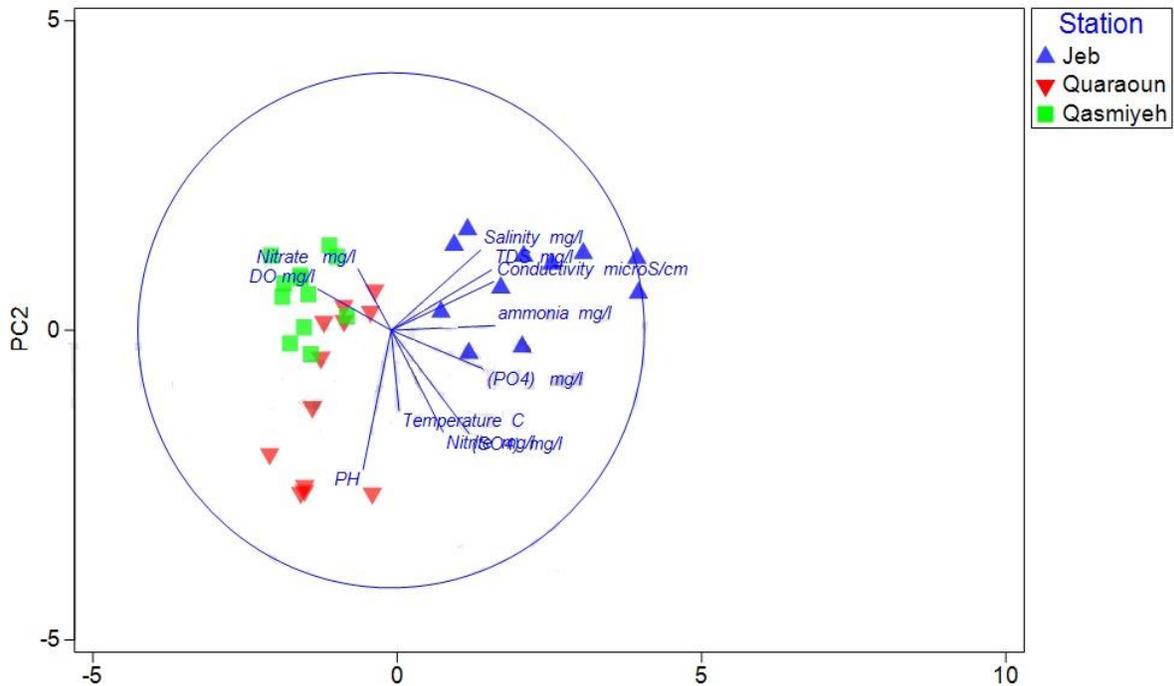


Figure V-2 Stations variations likely physicochemical parameters

In Figure V-2, the multivariate PERMANOVA showed a significant ‘par x Site’ effect ($p < 0.001$) and pair-wise comparisons showed highly significant differences between. In agreement with PERMANOVA results, the points are separated in the nMDS representation, confirming that composition and structure of the parameters of the stations strongly differed among the three sites.

Spatial statistical analysis

The average of each parameter, the standard deviation and the range calculated from the values obtained from the different stations of Litani River are summarized in Table V-4. The results were performed using MANOVA analysis discussed above. The obtained values are compared to the WHO limits.

A description of the geological feature of Litani River is necessary to understand the difference between the values of the studied parameters. Litani River flows from north to south in Bekaa valley, therefore from Jeb-Jenine and inflow in Lac Quaroun. The dam stores the water in the lac and the

flow stops in the wet season (the upper basin of Litani River). The river feeds from other tributaries, the most important is Ein El-Zarka, and continue to Quasmieh (the lower basin of Litani River). The observed deviation around the mean, for the parameters is substantially high and random; this could be due to seasonal changes and different human activities surrounding the stations. In addition, we remark in the table, the average temperature of the water ranged from 19.5°C (Quaroun) to 20.17°C (Jeb-Jenine) with a maximum of 26°C (Quasmieh) and a minimum of 16°C (Quaroun). We know that the temperature variation is usually influenced by precipitation. Based on the results the temperature slightly increased during the dry season. So we can deduce that the temperature on all stations sampled is relatively homogeneous.

Table V-4 Descriptive statistics for the parameters in the 3 different stations.

Station	Jeb-Jenine	Quaroun	Quasmieh	WHO standards
Parameters	$\bar{X} \mp \sigma_{\bar{X}}$ (Range)	$\bar{X} \mp \sigma_{\bar{X}}$ (Range)	$\bar{X} \mp \sigma_{\bar{X}}$ (Range)	
Temperature T (°c)	20.17 \mp 0.505 (23-18)	19.5 \mp 0.52 (24-16)	19.98 \mp 0.76 (26-17.8)
PH	7.73 \pm 0.1 (8.7-7.3)	8.54 \pm 0.32 (10.4-7.3)	7.82 \pm 0.097 (8.27-7.1)	6-9
Dissolved Oxygen DO (mg/l)	2.83 \pm 0.24 (5-2)	5.18 \pm 0.51 (10-4)	8.64 \pm 0.47 (10.3-5)	>4
Electrical Conductivity EC (μ S/cm)	795.42 \pm 31.28 (1100-683)	451.33 \pm 27.62 (608-335)	445.33 \pm 30.46 (675-284)	<770
Total Dissolved Solids TDS (mg/l)	578.08 \pm 23.69 (800-481)	321.92 \pm 22.51 (459-227)	362.583 \pm 26.95 (511-238)	<500
Salinity (mg/l)	401.17 \pm 19.36 (600-349)	232.75 \pm 13.34 (305-167)	332.5 \pm 28.17 (498-213)	<600
Ammonia NH ₃ (mg/l)	9.28 \pm 1.39 (17-2)	0.54 \pm 0.14 (1.55-0.03)	0.26 \pm 0.07 (0.87-0.07)	<0.2
Nitrite NO ₂ ⁻ (mg/l)	0.72 \pm 0.12 (1 -0)	1.040 \pm 0.58 (7.4-0.27)	0.07 \pm 0.009 (0.14-0.03)	<0.01
Nitrate NO ₃ ⁻ (mg/l)	8.5 \pm 3.85 (46-0)	5.44 \pm 1.86 (20-0)	17.5 \pm 1.87 (28-6)	<0.1
Sulfate SO ₄ ²⁻ (mg/l)	60.33 \pm 16.06 (230-23)	35.52 \pm 2.36 (50-23)	17.008 \pm 2.84 (31-3.1)	<250
Phosphate PO ₄ ³⁻ (mg/l)	2.73 \pm 0.30 (5-1)	0.55 \pm 0.15 (1.5-0)	0.805 \pm 0.15 (1.8-0.11)	<0.2

High average concentrations of ammonia, sulfate and phosphate, 9.28, 60.33 and 2.73 mg.L⁻¹ respectively, were observed in Jeb-Jenine station. These values indicate a high agricultural, industrial and sewage water pollution in the area. Jeb-Jenine is located in the middle Bekaa valley. This area is characterized by high agricultural and industrial activities. The three values overshoot the WHO limits for river water quality. The high standard deviation value represented by the table for the three parameters is due to the fact that these values are highly affected by the seasonal parameters. The average concentrations of the three components decrease in Quaroun lac. This decrease is due to two reasons, the first is the very low agricultural and industrial activities in Quaroun region and the second is the other tributaries that feed the river located between Jeb-Jenine and Quaroun especially in the wet season. The values of the average concentrations of ammonia,

sulfate and phosphate are very low at Quasmieh point. This is due to the fact that the two basins are separated for a long period each year in addition to the low agricultural and industrial activity in south Lebanon region. The concentration of ammonia is very close to the WHO limit (<0.2), whereas that of sulfate is under the WHO limit.

The pH results show no remarkable variations with mean pH values ranging from 7.73 (Jeb-Jennine) to 8.54 (Quaroun). The maximum pH value is 10.4 at the Quaroun station during the dry season is above the limit of WHO of river guidelines (6-9), and with a minimum value of pH equal to 7.1 in Quaroun and Jeb-Jenine stations during the rainy season.

Dissolved oxygen (DO) is the most fundamental parameter in the study of water quality that has an important role for water quality analysis which is a vital indicator of physical activity, chemical and biological process of water bodies. A low DO rates were observed in Jeb-Jenine and Quaroun lac for values of 2.83 and 5.18 mg.L^{-1} respectively. Otherwise, high average nitrite concentrations were observed in these two stations for maximum of 1.0 mg.L^{-1} in Jeb-Jennine and 7.4 mg.L^{-1} in Quaroun station compared to a low concentration in Quasmieh station for a maximum value of 0.14 mg.L^{-1} . The low DO and the high nitrite concentrations indicate high bacterial and biological activities in the two stations, Jeb-Jenine and Quaroun, and a low activity in Quasmieh.

Salinity, conductivity and TDS values are related to the concentration of ions in the water. As a result, high average values of the three parameters were observed in Jeb-Jenine station where the very high concentrations of sulfate, phosphate, and nitrite were observed. The averages of the three parameters surpass the WHO standards especially for the electrical conductivity. Otherwise, low averages were observed for salinity, electrical conductivity and TDS in Quaroun lac and Quasmieh station. The obtained values for the three parameters are lower than WHO standards.

Seasonal statistical analysis

Physico-chemical property of water is affected by environmental factors especially temperature and pressure. To study the seasonal evolution of physico-chemical parameters, the samples were divided into two groups according to the temperature and the precipitation of the month. Six samples were taken in dry months characterized by high temperatures and low precipitation, whereas, the other six samples were taken in wet months characterized by low temperature and high precipitation. The results are summarized in Figure V-3. An increase in the total dissolved oxygen was observed in all stations during wet season because of the fresh water reaches the river with runoff. The same observation was detected for TDS, electrical conductivity and salinity in the three stations during the same period. This observation is related to the fact that runoff increase the erosion rate and therefore carries high amount of ions to the riverbed, especially, magnesium, sodium, potassium, carbonate, bicarbonate and chloride, which increase water turbidity. The more important evolution of the three parameters was observed in Quaroun lake for a change ranges between 25 and 30%. The high evolution is due to the geographical feature of the region located between Jeb-Jenine and Quaroun that is formed of a series of highlands and hills more close to the river stream and contain several tributaries flow in the wet season.

The concentration of ammonia doesn't show an important evolution in Quaroun and Quasmieh stations. Otherwise, a very important evolution between the wet and the dry season was observed in Jeb-Jenine stations. Jeb-Jenine is a very important agricultural region. Therefore, in addition to the high concentration of ammonia, present in fertilizers, that is detected in Jeb-Jenine station, the average concentration increases between dry and wet season from 7.57 to 10.98 mg.L⁻¹. The high concentration of nitrite in Jeb-Jenine and Quaroun stations indicates a high bacterial activity in these two regions. The bacterial activity increases in the dry season in Jeb-Jenine. The average concentration of sulfate increases in the three stations in the wet season. The most important increase

from wet to dry season is observed in Jeb-Jenine station for a rise of 50%, from 40.32 mg.L⁻¹ to 80.33 mg.L⁻¹. This increase of sulfate concentration is related to a development in the industrial activity around the river basin during the dry season (especially in summer). Phosphate concentration increases in wet season in Jeb-Jenine station due to the runoff. Otherwise, an increase of the concentration of phosphate was observed in the dry season in Quaroun and Quasmieh that is due to the tourist activity in restaurants located on the river boundaries.

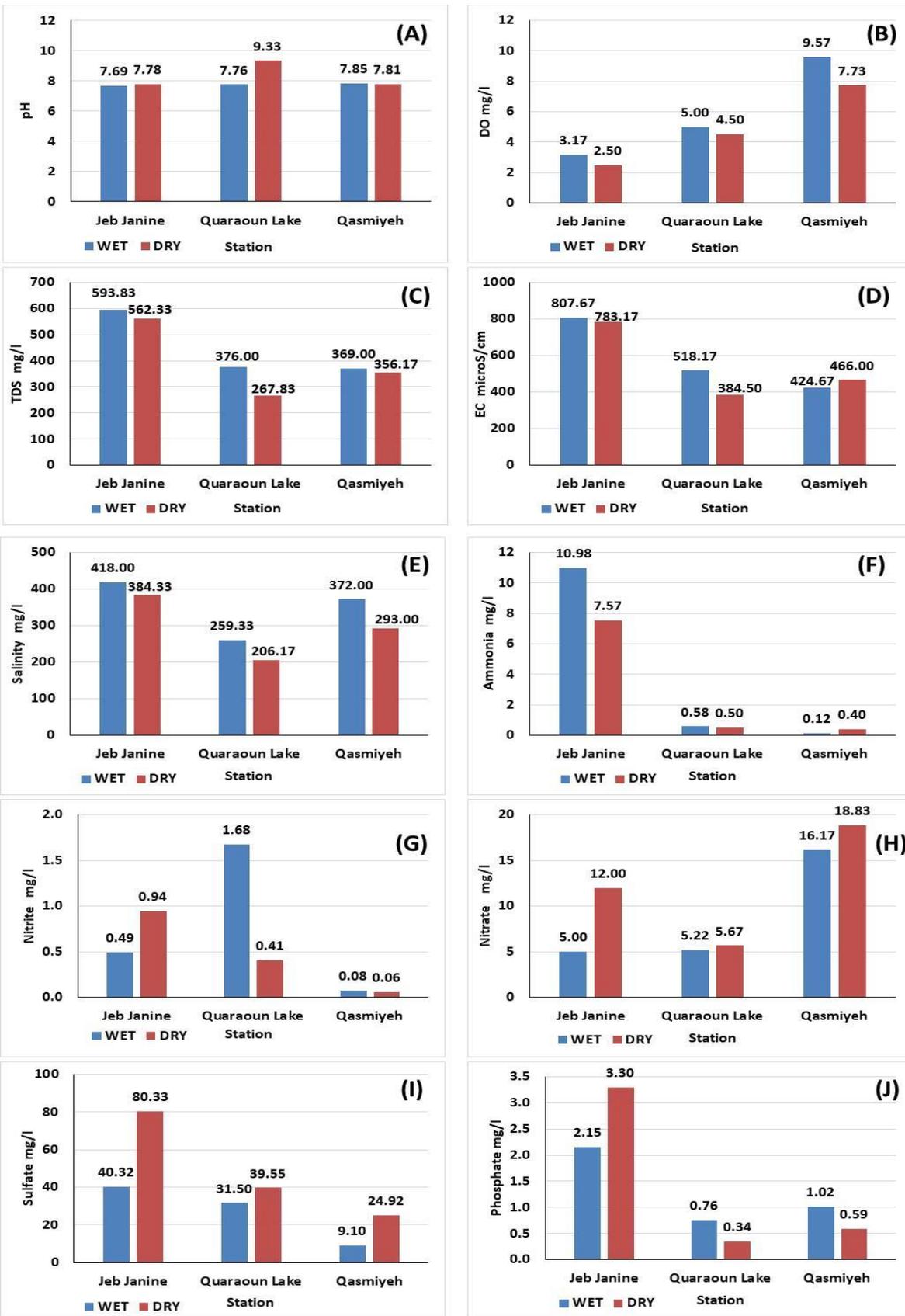


Figure V-3 Seasonal evolution of the different physico-chemical parameters.

Physico-chemical parameters: correlations

Principal Component Analysis (PCA), Statistical method

We use in this section the Principal component analysis (PCA) methods to extract key factors. As show in the section 1, we know that the component loadings are the linear combinations for each principal component, and they express the correlation between the original variables and the newly formed components. In general, the component loadings are used to determine the relative importance of a variable compared to other variables in a principal component. There exists a various approach to choose the number of component loading, such as the eigenvalues greater than 1 were used as a cut-off value to determine the number of factors. Firstly, for the wet season, the first four principal components had eigenvalues greater than 1 and explained approximately 90% of the cumulative variances in the original dataset. Table V-5

Table V-5 Wet season PCA: Total Variance Explained

Total Variance Explained (wet)						
Component	Initial Eigenvalues			Extraction Sums of Squared Loadings		
	Total	% of Variance	Cumulative %	Total	% of Variance	Cumulative %
1	4.782	43.476	43.476	4.782	43.476	43.476
2	2.574	23.396	66.872	2.574	23.396	66.872
3	1.519	13.807	80.679	1.519	13.807	80.679
4	1.066	9.691	90.370	1.066	9.691	90.370

Secondly for the dry season, also the first four principal components had eigenvalues greater than 1 and explained 91% of the total variances in the original dataset. We notice that the first axis or factor (F1) explained 53% of the total variance, so it's remarkable that this factor present a strong positive loading for conductivity, TDS, salinity and ammonia but a weak negative loading for PH, DO and Nitrate Table V-6. Factor 2 (F2) explained 15% of the total variance and had a strong

positive loading for Nitrite, sulfate and phosphate. Factor 3 (F3) explained 13% of the total variance and had a strong positive loading for Nitrate. Factor 4 (F4) explained 11% of the total variance and had a strong positive loading for Temperature and pH.

In the wet season Table V-7, Factor 1 (F1) explained 43% of the total variance and had a strong positive loading for Conductivity, TDS and Salinity. Factor 2 (F2) explained 23% of the total variance and had a strong positive loading for Nitrite and sulfate. Factor 3 (F3) explained 14% of the total variance and had a moderate positive loading for Ammonia, and a strong positive loading for phosphate. Finally, Factor 4 (F4) explained 10% of the total variances and had a strong positive loading for temperature and moderate for Nitrate.

Table V-6 Dry Season. Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotated Component Matrix^a				
Summer	Component			
	1	2	3	4
Temperature C	.047	.005	.219	.936
PH	-.249-	-.026-	-.418-	.699
DO mg.L⁻¹	-.544-	-.177-	.619	-.203-
Conductivity microS.cm⁻¹	.937	.240	-.145-	-.058-
TDS mg.L⁻¹	.948	.221	-.153-	-.067-
Salinity mg.L⁻¹	.915	.216	.002	-.111-
Ammonia mg.L⁻¹	.785	.501	-.238-	.002
Nitrite mg.L⁻¹	.293	.931	-.133-	-.067-
Nitrate mg.L⁻¹	-.159-	-.206-	.943	.109
Sulfate mg.L⁻¹	.144	.958	-.170-	.087
Phosphate mg.L⁻¹	.406	.898	-.069-	-.056-

Table V-7 Wet Season. Extraction Method: Principal Component Analysis.

Rotated Component Matrixa				
Winter	Component			
	1	2	3	4
Temperature C	.091	.151	.034	.969
PH	.011	-.296-	-.923-	.003
DO mg.L ⁻¹	-.434-	-.665-	-.387-	-.064-
Conductivity microS.cm ⁻¹	.850	.390	.290	.040
TDS mg.L ⁻¹	.897	.305	.125	.057
Salinity mg.L ⁻¹	.879	-.158-	-.007-	.028
Ammonia mg.L ⁻¹	.583	-.020-	.681	.399
Nitrite mg.L ⁻¹	-.186-	.875	.153	-.092-
Nitrate mg.L ⁻¹	-.022-	-.572-	.437	.663
Sulfate mg.L ⁻¹	.322	.881	-.060-	.162
Phosphate mg.L ⁻¹	.592	-.167-	.703	.186

Correlation between the different parameters, statistical analysis

Table V-8 and Table V-9 provide the correlation matrix between the water quality parameters for both wet and dry seasons, respectively. The tables were made using PCA method. According to Pejman et al. (2009) [241] when the coefficient of correlation is greater than 0.75, the water quality parameters were considered to be significant parameters for water quality monitoring. The significant water quality parameters that should be used to measure the seasonal variation in water quality of the Litani River are showed in the next section by using MANOVA method. The correlation coefficients of pH with Ammonia and PO₄ were -0.551, -0.626 and -0.315 during the wet season, respectively. However, during the dry season, no correlation coefficients between pH and other parameters were shown. DO is correlated with Conductivity, TDS and Ammonia during the wet season to a significant degree ($p < 0.01$) and ($p < 0.05$), whereas in the dry season, Nitrate is more correlated with DO ($r = 0.662$) to a significant degree ($p < 0.01$). Salinity correlated with PO₄

($r=0.608$) in the wet season but the Salinity correlated with Ammonia, Nitrite and PO_4 in the dry season. TDS values recorded during the dry season correlated with nitrate ($r=0.512$), PO_4 ($r=0.592$), Ammonia ($r=0.87$), and Salinity ($r=0.952$) to a significant degree ($p<0.01$). In contrast, wet season TDS values were positively correlated ($p<0.05$) with PO_4 ($r=0.578$) and Ammonia ($r=0.658$) and Salinity ($r=0.732$).

Table V-8 Correlation matrix of the water quality parameters in wet season

Wet Season	temperature	pH	DO	Conductivity	TDS	Salinity	Ammonia	Nitrite	Nitrate	Sulfate	Phosphate
Temperature	1										
PH	-.031-	1									
DO	-.194-	.489	1								
Conductivity	.169	-.374-	-.779-**	1							
TDS	.174	-.320-	-.620-*	.919**	1						
Salinity	.075	-.200-	-.164-	.631*	.732**	1					
ammonia	.425	-.551-*	-.576-*	.717**	.618*	.492	1				
Nitrite	.089	.496	-.420-	-.097-	-.209-	-.367-	-.172-	1			
Nitrate	.551*	-.109-	.180	-.111-	-.124-	.054	.520*	.024	1		
Sulfate	.286	-.127-	-.665-**	.588*	.504	.116	.193	.189	-.409-	1	
Phosphate	.192	-.626-*	-.358-	.633*	.578*	.608*	.895**	-.346-	.415	.069	1

Table V-9 Correlation matrix of the water quality parameters in dry season

Dry Season	Temperature	pH	DO	Conductivity	TDS	Salinity	Ammonia	Nitrite	Nitrate	Sulfate	Phosphate
Temperature	1										
PH	.415	1									
DO	-.177-	-.030-	1								
Conductivity	-.059-	-.188-	-.601-**	1							
TDS	-.079-	-.166-	-.584-**	.980**	1						
Salinity	-.115-	-.186-	-.398-	.899**	.952**	1					
ammonia	-.014-	-.102-	-.646-**	.877**	.870**	.810**	1				
Nitrite	-.079-	-.079-	-.399-	.526*	.512*	.483*	.710**	1			
Nitrate	.276	-.255-	.662**	-.336-	-.348-	-.208-	-.452-*	-.364-	1		
(SO4)	.049	.075	-.376-	.390	.379	.334	.614**	.944**	-.364-	1	

(PO4)	-.032-	-.146-	-.405-	.603**	.592**	.567**	.800**	.957**	-.333-	.912**	1
--------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	---

Very high correlation between salinity, electrical conductivity and TDS is expected. The three values are affected by the concentration of ions in the water. This relation explain the high values of these three parameters in Jeb-Jenine station where the concentration of phosphate, sulfate, nitrate and ammonia are very high compared to the low values in the two other stations. Another strong negative correlation between the concentration of phosphate and ammonia with the dissolved oxygen (DO) has been demonstrated by Hayek et al [227]. Eutrophication, is a phenomena where an excessive growth of plants and algae occurs in the water because of the availability of nutrients especially phosphate and nitrogenous products. As a result, a high decrease of the concentration of dissolved oxygen is observed in water. Consequently, very low concentration of DO was detected in Jeb-Jenine station where the concentration of ammonia and phosphate are very high. The high correlation, discussed above, between ammonia, TDS, conductivity and DO, observed in wet season, is related to the fact that the values of these parameters increase due to the runoff.

Nitrite is the most toxic components in the nitrogen cycle. It is the intermediate between ammonia and nitrate. The transformation of ammonia into nitrite is due to a bacterial activity. The availability of ammonia increases the bacterial activity in water and therefore the concentration of nitrite, and then a positive correlation was observed between these two components. The low dissolved oxygen inhibits the oxidation of nitrite into nitrate. Therefore, referring to the results in Table V-4, a high bacterial activity is approved in Jeb-Jenine station and in Quaroun lac by the high concentration of nitrite for 1.024 and 1.040 mg.L⁻¹ respectively (100 times greater than that of WHO standard). The low concentration of nitrate observed in the two stations is due to the low DO amount. Otherwise, high concentration of nitrate and low concentration of nitrite were observed in Quasmieh station.

Conclusion

Samples from three locations at Litani River at dry and wet seasons were analyzed. The physico-chemical properties of the water processed were determined by different analytical methods. Multivariate analysis of the different parameters was performed. The statistical methods were helpful to analyze special and seasonal evolution of the water quality. MANOVA and PERMANOVA statistical methods show an important difference of water quality between the three stations. This difference is demonstrated by the major changes in the values of the parameters from one station to the other. Jeb-Jennine represents a main pollution area in the river. The high ammonia, sulfate and phosphate concentrations evidence of important agricultural, industrial and sewage water pollution in the area. High bacterial activity was investigated in Jeb-Jennine and Quaroun stations from the high nitrite concentrations in the two locations. All parameters are highly affected by climate factors, especially temperature and precipitation. TDS, salinity, electrical conductivity and the concentrations of all pollutants increase during wet season affected by the runoff. The bacterial activity increases during dry season where the temperature is convenient. Other factors can affect the water quality of the river for example geographical features of the region and seasonal human activity like tourism. More details and values from these factors, introduced in the statistical techniques, will be helpful to improve the evolution of the water quality. The correlation between different parameters was evaluated using PCA statistical method. This correlation is not stable, and evolves between wet and dry season.

Conclusion

Nous avons traité dans ce chapitre plusieurs paramètres physico-chimiques provenant des échantillons de trois stations de la rivière Litani durant les saisons sèche et humide. Les propriétés physico-chimiques de l'eau ont été déterminées par différentes méthodes d'analyse. Une analyse multivariée des différents paramètres a été réalisée. Les méthodes statistiques ont été utiles pour analyser l'évolution spatiale et saisonnière de la qualité de l'eau. Les méthodes statistiques MANOVA et PERMANOVA ont montré une différence importante de qualité de l'eau entre les trois stations. Cette différence est démontrée par les changements significatifs dans les valeurs des paramètres d'une station à l'autre. Jeb-Jennine présente une des principales zones de pollution de la rivière. Les concentrations élevées d'ammoniac, de sulfate et de phosphate témoignent d'une importante pollution des eaux agricoles, industrielles et des eaux usées dans la région. Une activité bactérienne élevée a été détectée dans les stations Jeb-Jennine et Quaroun à partir des concentrations élevées de nitrite dans les deux stations. Tous les paramètres sont fortement affectés par les facteurs climatiques, en particulier la température et les précipitations. Le TDS, la salinité, la conductivité et les concentrations de tous les polluants augmentent pendant la saison des pluies affectée par le ruissellement. L'activité bactérienne augmente pendant la saison sèche où la température est élevée. D'autres facteurs peuvent affecter la qualité de l'eau de la rivière, par exemple les caractéristiques géographiques de la région et les activités humaines saisonnières comme le tourisme. La corrélation entre les différents paramètres a été évaluée à l'aide de l'analyse en composante principal (ACP). Cette corrélation varie entre la saison humide et la saison sèche.

Conclusion Générale et Perspectives

L'eau est le principal constituant des êtres vivants sur terre et à ce titre, considérée comme une ressource naturelle indispensable à la vie. La qualité de l'eau de surface est une question importante, sensible et surtout une grande préoccupation environnementale à l'échelle mondiale. Nous avons traité dans cette thèse des problèmes majeurs de la pollution des eaux de surface de la rivière Litani au Liban, par l'étude des paramètres physico-chimiques, certains d'entre eux pouvant être considérés comme une plaie pour le pays car comportant des risques majeurs sur le plan sanitaire.

Plusieurs zones d'études ont été étudiées dans ce travail de recherche, réparties entre le bassin supérieur et inférieur de la rivière Litani. Les paramètres mensuels de qualité de l'eau ont été collectés et analysés sur les trois stations (Quaroun, Jebjenine, Quasmiyeh) pendant 10 années de 2008 à 2018. L'analyse de la qualité de l'eau de la rivière Litani ainsi que l'impact des variations climatiques ont été effectuées par des méthodes statistiques avancées telles que le modèle de régression linéaire multiple à décalage « lag-1 » (t-1), la méthode d'optimisation SCM, la théorie des valeurs extrêmes et la théorie de records, l'analyse multivariée de la variance (MANOVA), l'analyse en composantes principales, Analyse de cluster (CA), et l'analyse Spatio-temporel.

Les modélisations sont effectuées en utilisant plusieurs outils informatiques comme C++, package sous R, XLSTAT, ainsi que des simulations avec Matlab.

L'originalité de ce travail de recherche réside dans le fait que nous avons utilisé certaines méthodes statistiques nouvelles, non classiques dans l'ingénierie environnementale, ainsi que dans l'étude de la qualité de l'eau des rivières. Signalons que les études qui ont été faites, jusqu'à présent, au Liban sur l'étude de la qualité d'eau de la rivière Litani, sont des études descriptives comparatives classiques.

Dans ce travail nous avons élaboré de nouvelles méthodes afin de répondre à des questions environnementales concernant d'une part l'étude de la qualité des eaux des milieux aquatiques qui

posent des problèmes cruciaux au Liban et d'autre part l'impact des facteurs environnementaux, température et précipitations susceptibles d'être liées au changement climatique du Liban. Nous avons étudié l'évolution des facteurs climatiques, température et précipitations et leurs impacts sur le débit de la rivière Litani pendant les années 1962 et 2018, dans le but de mettre en évidence un modèle de prévision à décalage temporel et un modèle d'optimisation qui permet d'évaluer l'impact des variations climatiques sur la quantité de l'eau de surface dans la région Bekaa.

Bien que le modèle de régression multiple ait été souvent utilisé dans les travaux de recherche pour créer un modèle entre une variable dépendante et plusieurs variables indépendantes, nous avons pensé à l'utiliser avec un décalage « lag-1 » afin de créer un modèle entre les trois facteurs environnementaux (température, précipitation, débit). Le modèle que nous avons créé est fiable, avec de faibles erreurs entre les valeurs observées et les valeurs prédites. De plus, la validation de ce modèle a été complétée par un modèle d'optimisation SCM qui a été utilisé pour la première fois dans ce domaine. Ce modèle nous a permis de montrer une diminution de la moyenne des précipitations dans la région Bekaa d'environ 160 mm sur cette période de 50 ans. Cette diminution a été accompagnée par une diminution de l'apport de l'eau vers le Lac Quaroun. Cette diminution a été estimée de 279 million de m³. Le débit de la rivière a encore été diminué dans la même période de 14.5 m³/s entre 1962 et 1972 et de 5.6 m³/s entre 2012 et 2017. Ces valeurs ont montré un changement climatique régional important qui a un impact sur la quantité de l'eau et qui peut conduire à une sécheresse importante. De surcroît, le changement climatique a été démontré par une diminution de la température dans les saisons humides de 0.8°C en comparaison de la moyenne des années entre 1962 et 1972 et la moyenne des années entre 2009 et 2017. Par contre, durant les mois secs, une augmentation de la température de 0.2°C a été observée dans la même durée..

Bien entendu nous avons enregistré des erreurs un peu élevées dans le modèle que nous avons proposé, suite à la présence des valeurs extrêmes des deux facteurs température et précipitation.

D'où l'intérêt et la curiosité d'évaluer ces valeurs extrêmes en se basant sur la théorie classique des valeurs extrêmes et sur une nouvelle méthode basée sur la théorie des records. L'intérêt de la méthode de records, d'un point de vue concret, sur le plan opérationnel et le choix du nombre de records comme statistique de test, est robuste. Ainsi la prédiction d'observer un nouveau record en se basant sur le critère BLUP, car d'une part la distribution du nombre de records est indépendante de la distribution sous-jacente des observations et elle est exactement calculée pour chaque observation, et d'autre part le nombre de records dans un intervalle $(1, n]$ est approximativement de l'ordre de $\ln(n)$. Par cette méthode, une augmentation significative de la température a été démontrée ce qui permet de supposer la présence d'une variation climatique dangereuse. Notons qu'en utilisant la théorie des valeurs extrêmes nous avons réussi à calculer la période et le niveau de retour de la température et des précipitations extrêmes sur différentes périodes 10 ans, 15 ans, etc.

Ce travail de recherche a montré, à partir de l'étude bibliographique et des nouveaux résultats obtenus, que l'impact des activités humaines, la modification et l'altération des écosystèmes naturels, deviennent de plus en plus menaçants. Ces impacts touchent aussi bien les écosystèmes terrestres et aquatiques donc globalement l'environnement.

La question de la qualité des eaux est un problème difficile car l'eau est un système physique, biochimique et écologique complexe. Une solution efficace pour analyser et résoudre ces divers problèmes dans les systèmes aquatiques sont des méthodes basées sur l'analyse de statistiques multivariées des facteurs physico-chimiques et biologiques. Les valeurs des paramètres physico-chimiques qui caractérisent la qualité de l'eau dans la rivière Litani, dans la station Quaroun ont été mesurées sur dix-ans entre 2008 et 2018. L'évolution de ces paramètres en fonction du temps a été étudiée graphiquement avec des statistiques descriptives. Les corrélations entre les différents paramètres ont été analysées en appliquant l'analyse en composantes principales. Des valeurs de concentrations croissantes de sulfate, phosphate, ammoniac montrent que l'eau de la rivière est

menacée par une grande pollution provenant de plusieurs sources de natures différentes en relation directe avec l'activité humaine dans la région comme l'agriculture, les activités industrielles et l'eau domestique. Un phénomène d'eutrophisation a été mis en évidence par la grande diminution de la concentration de l'oxygène dissous (DO), la diminution de la concentration de nitrate accompagnée d'une augmentation des concentrations de nitrite et d'ammoniac.

L'évaluation de l'évolution spatio-temporelle des paramètres physico-chimiques de la rivière Litani a été étudiée. Les valeurs des différents paramètres (pH, DO, température de l'eau, TDS, salinité, conductivité, ammonium, nitrate, nitrite, sulfate, phosphate... etc) ont été enregistrées sur trois stations différentes, localisées dans le bassin supérieur, le lac Quaroun et le bassin inférieur de la rivière durant deux saisons de propriétés météorologiques différentes (sec et humide). Cette étude a été effectuée pour vérifier la relation entre les facteurs climatiques et la qualité de l'eau de surface et par suite l'impact des variations climatiques sur la qualité de l'eau dans son ensemble. Les valeurs ont été traitées par deux approches statistiques, MANOVA et PERMANOVA, afin d'étudier ces variations spatio-temporelles. Une zone noire de pollution a été déterminée à Jeb-Jennine qui a montré des concentrations très élevées d'ammonium, sulfate et phosphate. Cette région est caractérisée par des activités agricoles et industrielles très importantes. Les valeurs de la salinité, conductivité, TDS ainsi que la concentration de l'ammonium et de sulfate augmentent durant la saison humide. Le DO et la concentration du nitrate diminuent avec l'augmentation de la température alors que la concentration de nitrite attribuée à une activité bactérienne importante, augmente simultanément. Cette étude montre que la sécheresse augmente significativement l'activité bactérienne et affecte en même temps la qualité de l'eau.

A l'issue de ce travail, plusieurs perspectives se présentent, qui pourraient permettre d'apporter des outils pratiques complémentaires à l'étude de la qualité d'eau de la rivière Litani au Liban et ceci afin de proposer des solutions concernant les sources de pollution au lac Quaroun et de la rivière

Litani. Ces sources de pollution sont nombreuses, citons à titre d'exemple : les déchets déversés par les usines de fabrication de produits agroalimentaires, les pesticides et les herbicides agricoles et surtout les eaux résiduaires d'une centaine de villages et des agglomérations urbaines. Ces études devraient inclure des paramètres biologiques comme des études bactériennes et phytoplanctoniques et des paramètres comme les concentrations des matières organiques polluantes (colorants, pesticides, médicaments...) et des métaux lourds. Ces aspects permettraient de mieux appréhender les risques sanitaires liés à l'ensemble de ces pollutions.

D'autres études pourraient être effectuées concernant les compositions et les propriétés physico-chimiques des systèmes qui sont en contact avec l'eau de surface, où des échanges se produisent au niveau des interfaces, comme l'air et les sédiments. La séquestration et la volatilité des produits de la pollution permettraient une meilleure projection des risques à long terme.

De plus, il faut savoir que la situation démographique et les impacts industriels et agricoles au Liban évoluent et s'amplifient très rapidement. Il serait utile d'étudier dans des futurs travaux la propagation démographique afin de détecter le plus rapidement possible les variations des points noirs de pollution au cours des années et anticiper leurs impacts.

Il existe une autre application possible de l'étude des extrêmes, que nous n'avons pas développée dans notre travail. Nous avons considéré le cas unidimensionnel des extrêmes et des records (une seule station) localisée à la région Bekaa (bassin supérieur), mais il serait également utile de considérer un cas multidimensionnel (plusieurs stations) dont l'intérêt serait de mieux comprendre les variations de manière plus globale. Cette approche mériterait d'être examinée et permettrait d'apporter des éléments concrets aux chercheurs qui travaillent sur la pollution de la mer méditerranée dans cette région du monde.

Dans notre travail nous avons étudié l'évolution des paramètres physico-chimiques sans prendre en compte le temps réel car nous avons considéré le temps comme un indice. Or la prise en compte du temps réel est très importante pour prédire les variations de la pollution de l'eau. De plus les méthodes et les analyses statistiques classiques sont difficilement applicables, présentent plusieurs lacunes et ne fournissent pas des prévisions adéquates. D'où l'intérêt qu'il y aurait à aller plus loin et à modéliser les paramètres physico-chimiques au cours de temps lorsque ces paramètres sont non-linéaires et non stationnaires dus parfois à des facteurs chaotiques, environnementaux et humains. Cela pourrait donner de nouveaux axes de recherches en modélisation environnementale, via des modèles physico-chimiques pertinents, polynôme du Chaos, processus chaotique, équation de diffusion stochastique (Navier-Stokes), équations différentielles de Lorenz et de Rossler.

Or, la modélisation statistique que nous avons développé dans ce travail de recherche nous a aidé à comprendre l'évolution des paramètres physico-chimiques, mais cela n'est pas suffisant pour construire des modèles fiables et les comparer entre eux. D'où l'utilité de penser, dans des futurs travaux, à l'estimation des paramètres physico-chimiques en utilisant des approches de statistiques paramétriques. Nous pourrions aussi envisager d'utiliser des approches d'estimation non-paramétriques à travers l'estimation de la fonction de lien en utilisant des noyaux ou en utilisant les polynômes de Bernstein, ou les polynômes de tchebychev. Bien entendu tous ces modèles mathématiques envisagés, devront être traités par des méthodes de prélèvements d'échantillons d'eau dans plusieurs stations de la rivière Litani et du lac Qaraoun et ce sur différentes périodes.

Le gouvernement libanais développe une stratégie de dépollution de la rivière Litani. Le coût estimé de l'assainissement du fleuve est d'environ 870 millions de dollars. Ce coût est très élevé pour un pays en proie à une crise financière et économique majeure. D'où l'intérêt de notre travail et des autres travaux proposés qui sont essentiels pour proposer des solutions efficaces, durables et économiques sur les problèmes de la pollution des eaux de surface de la rivière Litani au Liban. Les

politiques et les administrations auront des éléments scientifiques solides leur permettant d'élaborer le plan des actions futurs quant aux processus de traitements et pour l'organisation et la gestion du bassin hydrographique.

L'eau de la rivière qui était considérée comme potable pour les habitants il y a quelques années, n'est même plus actuellement correcte pour les activités agricoles. Par conséquent, et en addition aux variations climatiques qui nous disent qu'à l'avenir nous perdrons des quantités de pluie soit en terme de courte période de précipitations, soit en terme de faibles précipitations, une mauvaise alimentation en eau avec un niveau élevé de pollution entraînera le pays dans une crise majeure de l'eau si nous ne sommes pas alertés et opérationnels à partir de maintenant à résoudre ces problèmes. Ce travail est une pierre dans une montagne de données, néanmoins il participe à une prise de conscience et ouvre de grands horizons pour des études plus approfondies et plus complètes au niveau du Liban sur la gestion de son régime hydrographique. Il peut s'étendre à l'ensemble de la région du Moyen-Orient, qui montre globalement une situation et une gestion des ressources en eau aussi désastreuse que celle du Liban. La prochaine étape est une étape de conflit avec deux dangers majeurs pour la vie humaine : le changement climatique et la pollution des eaux, et quiconque ne cherche pas rapidement à remédier à cette situation dramatique devra payer chère la facture sur la santé et l'économie.

Références

- [1] J. W. Tester, “Energy—Production, consumption and consequences: J.L. Helm, (Editor) National Academy Press Washington, DC. 1990. viii + 296 pp.,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 6, no. 2, pp. 171–172, 1992.
- [2] J. Zhang and D. E. Konan, “The Sleeping Giant Awakes: Projecting Global Implications of China’s Energy Consumption,” *Rev. Dev. Econ.*, vol. 14, no. 4, pp. 750–767, 2010.
- [3] US EIA, “International Energy Outlook 2013 - DOE/EIA-0484(2013),” *Outlook 2013*, p. 312, 2013.
- [4] L. Raslavičius, A. Keršys, M. Starevičius, J. Sapragonas, and Ž. Bazaras, “Biofuels, sustainability and the transport sector in Lithuania,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 32, pp. 328–346, 2014.
- [5] M. Palocz-Andresen, “Decreasing Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in Transportation,” *Green Energy Technol.*, vol. 14, no. 0, pp. 121–134, 2013.
- [6] K. Rennings, B. Brohmann, J. Nentwich, J. Schleich, T. Traber, and R. Wüstenhagen, “Sustainable energy consumption in residential buildings,” *ZEW Econ. Stud. Vol. 44*, vol. 53, p. 263, 2013.
- [7] N. J. L. Lenssen *et al.*, “Improvements in the GISTEMP Uncertainty Model,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 124, no. 12, pp. 6307–6326, Jun. 2019.
- [8] S. Bathiany, V. Dakos, M. Scheffer, and T. M. Lenton, “Climate models predict increasing temperature variability in poor countries,” *Sci. Adv.*, vol. 4, no. 5, pp. 1–11, 2018.
- [9] Q. Sun, C. Miao, Q. Duan, H. Ashouri, S. Sorooshian, and K. L. Hsu, “A Review of Global Precipitation Data Sets: Data Sources, Estimation, and Intercomparisons,” *Rev. Geophys.*, vol. 56, no. 1, pp. 79–107, 2018.

- [10] H. ZEKE, “Explainer: What climate models tell us about future rainfall,” 2020. .
- [11] M. Prakash, J. Hilton, C. Miller, V. Lemiale, R. Cohen, and Y. Wang, “Remote Sensing and Physical Modeling of Fires, Floods, and Landslides.” Oxford University Press, 2017.
- [12] J. C. Padowski, “Freshwater: The Importance of Freshwater for Domestic Use,” M. I. Goldstein and D. A. B. T.-E. of the W. B. DellaSala, Eds. Oxford: Elsevier, 2020, pp. 12–21.
- [13] R. I. McDonald *et al.*, “Global Urban Growth and the Geography of Water Availability, Quality, and Delivery,” *Ambio*, vol. 40, no. 5, pp. 437–446, 2011.
- [14] S. Liu *et al.*, “Global river water warming due to climate change and anthropogenic heat emission,” *Glob. Planet. Change*, vol. 193, p. 103289, 2020.
- [15] P. Van Der Linden and M. Office, “Climate Change 2007 : Impacts , Adaptation and Vulnerability INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE Climate Change 2007 : Impacts , Adaptation and Vulnerability Working Group II Contribution to the Intergovernmental Panel on Climate Change Summary for ,” no. March, 2015.
- [16] J. Steinheuer and P. Friederichs, “Vertical profiles of wind gust statistics from a regional reanalysis using multivariate extreme value theory,” *Nonlinear Process. Geophys.*, vol. 27, no. 2, pp. 239–252, 2020.
- [17] C. J. Stevens *et al.*, “The impact of air pollution on terrestrial managed and natural vegetation,” *Philos. Trans. R. Soc. A*, vol. 378, no. 2183, p. 20190317, 2020.
- [18] Z. W. Kundzewicz *et al.*, “Flood risk and climate change: global and regional perspectives,” *Hydrol. Sci. J.*, vol. 59, no. 1, pp. 1–28, 2014.
- [19] T. V Perevolotskaya and A. N. Perevolotskii, “Analysis of the Long-Term Yearly Average Volumetric Activity of Radionuclides and the Yearly Absorbed Dose in the Surface Air with Continuous Radioactive Emissions (For Leningrad NPP-2),” *At. Energy*, vol. 128, no.

3, pp. 177–181, 2020.

- [20] F. Lamperti, I. Monasterolo, and A. Roventini, “Climate risks, economics and finance: Insights from complex systems,” in *The systemic turn in human and natural sciences*, Springer, 2019, pp. 97–119.
- [21] M. D. Flannigan and B. M. Wotton, “Chapter 10 - Climate, Weather, and Area Burned,” E. A. Johnson and K. B. T.-F. F. Miyanishi, Eds. San Diego: Academic Press, 2001, pp. 351–373.
- [22] UNFCCC, “Climate change science - the status of climate change science today,” *United Nations Framew. Conv. Clim. Chang.*, no. February 2011, pp. 1–7, 2011.
- [23] R. A. Pielke, “What is Climate Change?,” *Energy Environ.*, vol. 15, no. 3, pp. 515–520, Jul. 2004.
- [24] R. Maguire, “Gender, climate change and the United Nations Framework Convention on Climate Change,” *Res. Handb. Fem. Engagem. with Int. Law*, pp. 63–80, 2019.
- [25] T. M. L. Wigley, P. D. Jones, and P. M. Kelly, “Global warming?,” *Nature*, vol. 291, no. 5813, p. 285, 1981.
- [26] E. W. Maibach, M. Sarfaty, M. Mitchell, and R. Gould, “Limiting global warming to 1.5 to 2.0°C—A unique and necessary role for health professionals,” *PLoS Med.*, vol. 16, no. 5, pp. 10–13, 2019.
- [27] A. A. Lacis, G. A. Schmidt, D. Rind, and R. A. Ruedy, “Atmospheric CO₂: principal control knob governing Earth’s temperature.,” *Science*, vol. 330, no. 6002, pp. 356–359, Oct. 2010.
- [28] P. Forster and P. Artaxo, “Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing,” *Notes*, vol. 18, 2005.
- [29] Z. Hausfather and G. P. Peters, “Emissions - the ‘business as usual’ story is misleading,”

Nature, vol. 577, no. 7792. England, pp. 618–620, Jan-2020.

- [30] K. E. Trenberth, “Atmospheric Moisture Residence Times and Cycling: Implications for Rainfall Rates and Climate Change,” *Clim. Change*, vol. 39, no. 4, pp. 667–694, 1998.
- [31] K. E. Trenberth, “Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change,” *Clim. Change*, vol. 42, no. 1, pp. 327–339, 1999.
- [32] M. R. Allen and W. J. Ingram, “Allen_Ingram_2002_nature01092,” *Nature*, vol. 419, no. September, 2002.
- [33] K. E. Trenberth, A. Dai, R. M. Rasmussen, and D. B. Parsons, “The changing character of precipitation,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 84, no. 9, pp. 1205-1217+1161, 2003.
- [34] C. Chou and J. D. Neelin, “Mechanisms of global warming impacts on regional tropical precipitation,” *J. Clim.*, vol. 17, no. 13, pp. 2688–2701, 2004.
- [35] J. D. Neelin, M. Münnich, H. Su, J. E. Meyerson, and C. E. Holloway, “Tropical drying trends in global warming models and observations,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 103, no. 16, pp. 6110–6115, 2006.
- [36] C. Chou, J. D. Neelin, C. A. Chen, and J. Y. Tu, “Evaluating the ‘rich-get-richer’ mechanism in tropical precipitation change under global warming,” *J. Clim.*, vol. 22, no. 8, pp. 1982–2005, 2009.
- [37] G. L. Stephens and T. D. Ellis, “Controls of global-mean precipitation increases in global warming GCM experiments,” *J. Clim.*, vol. 21, no. 23, pp. 6141–6155, 2008.
- [38] B. D. Santer *et al.*, “Identification of human-induced changes in atmospheric moisture content,” *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, vol. 104, no. 39, pp. 15248–15253, 2007.
- [39] T. R. Karl and K. E. Trenberth, “Modern Global Climate Change,” *Science (80-.)*, vol. 302, no. 5651, pp. 1719–1723, 2003.
- [40] L. Yu and R. A. Weller, “Objectively analyzed air-sea heat fluxes for the global ice- free

oceans (1981-2005),” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 88, no. 4, pp. 527–539, 2007.

- [41] A. Dai, “Recent climatology, variability, and trends in global surface humidity,” *J. Clim.*, vol. 19, no. 15, pp. 3589–3606, 2006.
- [42] K. M. Willett, P. D. Jones, N. P. Gillett, and P. W. Thorne, “Recent changes in surface humidity: Development of the HadCRUH dataset,” *J. Clim.*, vol. 21, no. 20, pp. 5364–5383, 2008.
- [43] B. J. Soden *et al.*, “The Radiative Signature of Upper Tropospheric Moistening Published by : American Association for the Advancement of Science Stable URL : <http://www.jstor.org/stable/3842762> Linked references are available on JSTOR for this article : The Radiative Signatur,” vol. 310, no. 5749, pp. 841–844, 2016.
- [44] I. Richter and S. P. Xie, “Muted precipitation increase in global warming simulations: A surface evaporation perspective,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 113, no. 24, pp. 1–20, 2008.
- [45] J. H. Yin, “A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 32, no. 18, pp. 1–4, 2005.
- [46] K. E. Trenberth and J. M. Caron, “The southern oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures, and precipitation,” *J. Clim.*, vol. 13, no. 24, pp. 4358–4365, 2000.
- [47] G. A. Vecchi, B. J. Soden, A. T. Wittenberg, I. M. Held, A. Leetmaa, and M. J. Harrison, “Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing,” *Nature*, vol. 441, no. 1, pp. 73–76, 2006.
- [48] P. W. Mote, “Trends in snow water equivalent in the Pacific Northwest and their climatic causes,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 30, no. 12, 2003.
- [49] K. E. Trenberth and A. Dai, “Effects of Mount Pinatubo volcanic eruption on the hydrological cycle as an analog of geoengineering,” *Geophys. Res. Lett.*, vol. 34, no. 15, pp. 1–5, 2007.

- [50] G. Gu, R. F. Adler, G. J. Huffman, and S. Curtis, “Tropical rainfall variability on interannual-to-interdecadal and longer time scales derived from the GPCP monthly product,” *J. Clim.*, vol. 20, no. 15, pp. 4033–4046, 2007.
- [51] N. Knowles, M. D. Dettinger, and D. R. Cayan, “Trends in snowfall versus rainfall in the western United States,” *J. Clim.*, vol. 19, no. 18, pp. 4545–4559, 2006.
- [52] W. Atlas and N. Middleton, “Atlas of.”
- [53] J. L. Cloudsley-Thompson, “Desertification of Arid Lands by Harold Dregne. (Advances in Desert and Arid Land Technology and Development, Volume 3.) Harwood Academic Publishers, Chur–London–Paris–Utrecht–New York: x + 242 pp., figs & tables, 23.5 × 15.5 × 2 cm, hard cover, \$33.2,” *Environ. Conserv.*, vol. 11, no. 2, p. 191, 1984.
- [54] D. Coventry, “World Resources 2000–2001: People and Ecosystems: The Fraying Web of Life,” *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 86, no. 1, pp. 109–110, 2001.
- [55] M. V. K. Sivakumar, “Interactions between climate and desertification,” *Agric. For. Meteorol.*, vol. 142, no. 2–4, pp. 143–155, 2007.
- [56] I. Mpacts, A. Daptation, and V. Ulnerability, “Climate change 2001: impacts, adaptation, and vulnerability,” *Choice Rev. Online*, vol. 39, no. 06, pp. 39-3433-39–3433, 2002.
- [57] “Reduction in Summer Soil Wetness Induced by an Increase in Atmospheric Carbon Dioxide Author (s): S . Manabe and R . T . Wetherald Source : Science , New Series , Vol . 232 , No . 4750 (May 2 , 1986), pp . 626-628 Published by : American Association f,” vol. 232, no. 4750, pp. 626–628, 2016.
- [58] K. A. Emanuel, “The dependence of hurricane intensity on climate,” *Nature*, vol. 326, no. 6112, pp. 483–485, 1987.
- [59] Kenneth M. Strzepek and Joel B. Smith, “As Climate Changes: International Impacts and Implications,” *Am. Sci. Res. Triangle Park*, vol. 85, pp. 281–282, 1997.

- [60] J. J. Feddema, “Estimated impacts of soil degradation on the African water balance and climate,” *Clim. Res.*, vol. 10, no. 2, pp. 127–141, 1998.
- [61] J. J. Feddema, “Future African Water Resources: Interactions between Soil Degradation and Global Warming,” *Clim. Change*, vol. 42, no. 3, pp. 561–596, 1999.
- [62] S. E. Nicholson and J. Kim, “The relationship of the el MNO-southern oscillation to African rainfall,” *Int. J. Climatol.*, vol. 17, no. 2, pp. 117–135, 1997.
- [63] W. H. Schlesinger *et al.*, “in Global Desertification Conceptual Models for Desertification,” *Science (80-.)*, vol. 247, no. 8, pp. 1043–1048, 1990.
- [64] D. Aiguo, E. T. Kevin, and Q. Taotao, “A Global Dataset of Palmer Drought Severity Index for 1870 – 2002 : Relationship with Soil Moisture and Effects of Surface Warming,” *J. Hydrometeorol.*, vol. 5, no. 6, pp. 1117–1130, 2004.
- [65] D. S. Wilks, “Interannual variability and extreme-value characteristics of several stochastic daily precipitation models,” *Agric. For. Meteorol.*, vol. 93, no. 3, pp. 153–169, 1999.
- [66] R. W. Katz, “Extreme value theory for precipitation: Sensitivity analysis for climate change,” *Adv. Water Resour.*, vol. 23, no. 2, pp. 133–139, 1999.
- [67] T. Oikawa, “NII-Electronic Library Service,” *Chem. Pharm. Bull.*, no. 43, p. 2091, 2002.
- [68] C. Frei and C. Schär, “Detection probability of trends in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region,” *J. Clim.*, vol. 14, no. 7, pp. 1568–1584, 2001.
- [69] T. J. Osborn, M. Hulme, P. D. Jones, and T. A. Basnett, “Observed Trends in the Daily Intensity of,” *Int. J. Climatol.*, vol. 364, pp. 347–364, 2000.
- [70] P. Y. Groisman and R. W. Knight, “Prolonged dry episodes over the conterminous United States: New tendencies emerging during the last 40 years,” *J. Clim.*, vol. 21, no. 9, pp. 1850–1862, 2008.
- [71] D. R. Easterling, J. L. Evans, and P. Y. Groisman, “Easterling et al. 2000 (2).pdf,” pp. 417–

425, 1999.

- [72] T. C. Peterson *et al.*, “Recent changes in climate extremes in the Caribbean region,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 107, no. 21, pp. 1–9, 2002.
- [73] A. M. G. Klein Tank *et al.*, “Changes in daily temperature and precipitation extremes in central and south Asia,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 111, no. 16, pp. 1–8, 2006.
- [74] P. C. D. Milly, R. T. Wetherald, K. A. Dunne, and T. L. Delworth, “Increasing risk of great floods in a changing climate,” *Nature*, vol. 415, no. 6871, pp. 514–517, 2002.
- [75] R. P. Allan and B. J. Soden, “Atmospheric Warming and the Amplification of Precipitation Extremes,” *Science (80-.)*, vol. 321, no. 5895, pp. 1481–1484, 2008.
- [76] E. Nin, “1389,” vol. 00, pp. 1389–1390, 2000.
- [77] R. J. Murnane, “Climate research and reinsurance,” *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, vol. 85, no. 5, pp. 697–707, 2004.
- [78] P. (Service de pharmacologie) Lechat, “Université Pierre et Marie Curie,” *Biochimie*, no. January, p. 349, 2008.
- [79] Z. Lomsadze, K. Makharadze, M. Tsitskishvili, and R. Pirtskhalava, “Annals of Agrarian Science Water resources of Kakheti and ecological problems,” *Ann. Agrar. Sci.*, vol. 15, no. 2, pp. 204–208, 2017.
- [80] Y. Lu, H. Xu, Y. Wang, and Y. Yang, “Evaluation of water environmental carrying capacity of city in Huaihe River Basin based on the AHP method: A case in Huai’an City,” *Water Resour. Ind.*, vol. 18, pp. 71–77, 2017.
- [81] P. Négrel *et al.*, “Soil–Sediment–River Connections: Catchment Processes Delivering Pressures to River Catchments,” 2014, pp. 21–52.
- [82] G. Chiogna *et al.*, “A review of hydrological and chemical stressors in the Adige catchment and its ecological status,” *Sci. Total Environ.*, vol. 540, pp. 429–443, 2016.

- [83] Z. Xie, Z. Sun, H. Zhang, and J. Zhai, “Contamination assessment of arsenic and heavy metals in a typical abandoned estuary wetland—a case study of the Yellow River Delta Natural Reserve,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 186, no. 11, pp. 7211–7232, 2014.
- [84] Radoslava Kanianska, *Agriculture and Its Impact on Land-Use, Environment, and Ecosystem Services*. .
- [85] J. Garnier, J. Nemery, G. Billen, and S. Théry, “Nutrient dynamics and control of eutrophication in the Marne River system: modelling the role of exchangeable phosphorus,” *J. Hydrol.*, vol. 304, no. 1–4, pp. 397–412, 2005.
- [86] CNRS, “Etude préliminaire, Projet de pompage d’eau du lac Qaraoun au sud, Évaluation de l’impact environnemental du bassin de la rivière Upper Litani,” Beyrouth, 2012.
- [87] R. Amar, “Impact de l’anthropisation sur la biodiversité et le fonctionnement des écosystèmes marins: exemple de la Manche-Mer du Nord,” *[VertigO] La Rev. électronique en Sci. l’environnement*, no. 8, 2010.
- [88] C. Becouze-Lareure, A. Dembélé, M. Coquery, C. Cren-Olivé, B. Barillon, and J.-L. Bertrand-Krajewski, “Source characterisation and loads of metals and pesticides in urban wet weather discharges,” *Urban Water J.*, vol. 13, no. 6, pp. 600–617, 2016.
- [89] N. Ouali, B.-E. Belabed, and H. Chenchouni, “Modelling environment contamination with heavy metals in flathead grey mullet *Mugil cephalus* and upper sediments from north African coasts of the Mediterranean Sea,” *Sci. Total Environ.*, vol. 639, pp. 156–174, 2018.
- [90] B. Serpaud, R. Al-Shukry, M. Casteignau, and G. Matejka, “Adsorption des métaux lourds (Cu, Zn, Cd et Pb) par les sédiments superficiels d’un cours d’eau: rôle du pH, de la température et de la composition du sédiment,” *Rev. des Sci. l’eau/Journal Water Sci.*, vol. 7, no. 4, pp. 343–365, 1994.
- [91] S. Zgheib, R. Moilleron, and G. Chebbo, “Priority pollutants in urban stormwater: Part 1--

- Case of separate storm sewers,” *Water Res.*, vol. 46, no. 20, pp. 6683–6692, 2012.
- [92] N. W. Arnell, “Climate change and global water resources,” *Glob. Environ. Chang.*, vol. Vol. 9, Su, pp. S31–S49, 1999.
- [93] O. Petit, “La surexploitation des eaux souterraines: enjeux et gouvernance,” *Natures Sci. sociétés*, vol. 12, no. 2, pp. 146–156, 2004.
- [94] J. Anglade, G. Billen, and J. Garnier, “Reconquérir la qualité de l’eau en régions de grande culture: agriculture biologique et reconnexion avec l’élevage,” *Fourrages*, vol. 231, pp. 257–268, 2017.
- [95] C. Faye, “Les défis de la pollution de l’eau, une menace pour la santé publique: atouts et défauts des lois et politiques de l’eau au Sénégal,” *Larhyss J.*, vol. 107, p. 126, 2017.
- [96] B. Festy, P. Hartemann, M. Ledrans, P. Levallois, P. Payment, and D. Tricard, “Qualité de l’eau.”
- [97] N. Nehme, “Évaluation de la qualité de l’eau du bassin inférieur de la rivière du Litani, Liban: approche environnementale,” Université de Lorraine, 2014.
- [98] C. M. Haidar, “Evaluation de la qualité de l’eau du bassin supérieur de la rivière du liban: approche hydrogéochimique,” Université de Lorraine, 2014.
- [99] F. Laurent, “Agriculture et pollution de l’eau: modélisation des processus et analyse des dynamiques territoriales,” 2012.
- [100] S. Ghiotti, “La directive cadre sur l’eau (DCE) et les pays méditerranéens de l’union européenne,” *Pôle Sud*, no. 2, pp. 21–42, 2011.
- [101] R. Fortunier, “Propriété Physiques, Mécaniques, et Électroniques des Matériaux Solides.”
- [102] M. G. Miquel, “Office parlementaire d’évaluation des choix scientifiques et technologiques.”
- [103] N. W. Kpoda, A. Oueda, Y. S. C. Somé, G. Cissé, A. H. Maïga, and G. B. Kabré,

“Physicochemical and parasitological quality of vegetables irrigation water in Ouagadougou city, Burkina-Faso,” *African J. Microbiol. Res.*, vol. 9, no. 5, pp. 307–317, 2015.

[104] F. Marlière, “Pesticides dans l’air ambiant,” 2002.

[105] J. Némery, “Origine et devenir du phosphore dans le continuum aquatique de la Seine des petits bassins amont à l’estuaire: rôle du phosphore échangeable sur l’eutrophisation,” *Univ. Paris*, 2003.

[106] J.-C. Olivry, “Synthèse des connaissances hydrologiques et potentiel en ressources en eau du fleuve Niger,” *World Bank, Niger Basin Authority, provisional Rep.*, vol. 160, 2002.

[107] U. De Lorraine, “A mes parents Nehmet et Khalil dont le soutien a toujours été sans faille durant ces nombreuses années d ’ études et de thèse . A Fadl , Hala , Hassan et Jana sans eux je ne serais pas allé au bout de ce travail . A mon marie Ali source d ’ affection et d,” 2014.

[108] Atlas, “Maps of Lebanon,” 2020. [Online]. Available:
<https://www.worldatlas.com/maps/lebanon>.

[109] Worldometer elaboration of the latest United Nations data, “Population of Lebanon.” [Online]. Available: <https://www.worldometers.info/world-population/lebanon-population/>.

[110] *Le Changement Climatique et l’eau - Document technique du GIEC* . .

[111] A. Eduardo, L. Ricardo, and V. Flavio, “www.econstor.eu,” 2014.

[112] FAO, “Geography, climate and population of Lebanon.” [Online]. Available:
http://www.fao.org/nr/water/aquastat/countries_regions/lbn/print1.stm.

[113] Litani River Authority, “The Characteristics of the Litani River,” 2019. [Online]. Available:
http://www.litani.gov.lb/en/?page_id=63.

[114] C. M. Haydar *et al.*, “Water quality of the upper Litani River Basin, Lebanon,” *Phys.*

Procedia, vol. 55, pp. 279–284, 2014.

- [115] W. Diab, “Étude des propriétés physico-chimiques et colloïdales du bassin de la rivière Litani , Liban Walaa Diab To cite this version : HAL Id : tel-01754658 soutenance et mis à disposition de l ’ ensemble de la Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr,” 2018.
- [116] L. Zerling, C. Hanisch, and F. Junge, “Heavy Metal Inflow into the Floodplains of the Mouth of the River Weiße Elster (Central Germany),” *Acta Hydrochim. Hydrobiol.*, vol. 34, pp. 234–244, 2006.
- [117] Y. Li, H. Zhang, X. Chen, C. Tu, Y. Luo, and P. Christie, “Distribution of heavy metals in soils of the Yellow River Delta: Concentrations in different soil horizons and source identification,” *J. Soils Sediments*, vol. 14, 2014.
- [118] O. Fatoki, N. Muyima, and N. Lujiza, “Situation analysis of water quality in the Umtata River catchment,” *Water SA*, vol. 27, 2001.
- [119] Q. Tang *et al.*, “Sedimentation and associated trace metal enrichment in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China,” *Sci. Total Environ.*, vol. 479–480, pp. 258–266, 2014.
- [120] “A la mémoire de mon père , ma mère et ma soeur.”
- [121] R. Riachi, “Agriculture et système alimentaire sous la mission hydraulique libanaise,” *Méditerranée. Rev. géographique des pays méditerranéens/Journal Mediterr. Geogr.*, no. 119, pp. 35–43, 2012.
- [122] H. H. Ramadan, R. E. Beighley, and A. S. Ramamurthy, “Modélisation des tendances de débits pour un bassin versant avec des données limitées: Le cas du bassin du Litani, au Liban,” *Hydrol. Sci. J.*, vol. 57, no. 8, pp. 1516–1529, 2012.
- [123] A. Fadel, A. F. Physico-chemical, A. Fadel, and S. Dorner, “Physico-chemical functioning and development of phytoplankton in Karaoun reservoir (Lebanon) : application of a hydrodynamic-ecological model A Dissertation presented to obtain Doctoral degree from

Université Paris-Est Speciality : Sciences and Techniqu,” 2015.

- [124] B. Bou-Fakhreddine, I. Mougharbel, A. Faye, and Y. Pollet, “Estimating daily evaporation from poorly-monitored lakes using limited meteorological data: A case study within Qaraoun dam-Lebanon,” *J. Environ. Manage.*, vol. 241, pp. 502–513, 2019.
- [125] A. Atoui, H. Hafez, and K. Slim, “Occurrence of toxic cyanobacterial blooms for the first time in Lake Karaoun , Lebanon,” pp. 1–8, 2012.
- [126] M. Wazne and S. Korfali, “Spatial and temporal assessment of metal pollution in the sediments of the Qaraoun reservoir, Lebanon,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 23, no. 8, pp. 7603–7614, 2016.
- [127] Z. El Hassan, “état de l’environnement et ses tendances au Liban,” Beirut, 2010.
- [128] D. D. P. and R. L. Rothstein, *The Challenge of Climate Change: Which Way Now?* John Wiley & Sons, 2011.
- [129] M. Brouwer, F. and Falkenmark, “Climate-Induced Water Availability Changes in Europe,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 13 (1), pp. 75–98, 1989.
- [130] A. V. Milly, P.C.D., Dunne, K.A. and Vecchia, “Global Pattern of Trends in Streamflow and Water Availability in a Changing Climate,” *Nature*, vol. 438, pp. 347–350, 2005.
- [131] M. O. Vörösmarty, C.J., McIntyre, P.B. and Gessner, “Global Threats to Human Water Security and River Biodiversity,” *Nature*, vol. 467, pp. 555–561., 2010.
- [132] M. T. & H. L. M. S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K. B. Averyt, “IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2007) Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” UK and New York, NY, USA, 2007.
- [133] P. L. F. Giorgi, “Climate change projections for the Mediterranean region,” *Glob. Planet. Chang.*, vol. 63, pp. 90–104, 2008.

- [134] “Litani River Authority (LRA),” 2011. [Online]. Available:
<http://www.litani.gov.lb/river.html>. [Accessed: 08-Mar-2011].
- [135] R. L. Freeze, R. A. and Harlan, “Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model,” *J. Hydrol.*, vol. 9, pp. 237–258, 1969.
- [136] J. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O’Connell, P. E., and Rasmussen, “An introduction to the European Hydrologic System Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 2: Structure of a physically based, distributed modelling system,” *J. Hydrol.*, vol. 87, pp. 61–77, 1986.
- [137] J. Abbott, M. B., Bathurst, J. C., Cunge, J. A., O’Connell, P. E., and Rasmussen, “An introduction to the European Hydrologic System Systeme Hydrologique Europeen, SHE, 1: History and philosophy of a physically based, distributed modelling system,” *J. Hydrol.*, vol. 87, pp. 45–59, 1986.
- [138] B. . M. S. Refsgaard, J. C. and Storm, *Computer models of watershed hydrology*. USA: Water Resources Publications, 1995.
- [139] W. L. Calver, A and Wood, *The Institute of Hydrology distributed model*. USA: Water Resources Publications, 1995.
- [140] T. A. Grayson, R. B., Moore, I. D., and McMahon, “Physically based hydrologic modeling, 1, A terrain-based model for investigative purposes,” *Water Resour. Res.*, vol. 28, pp. 2639–2658, 1992.
- [141] K. J. Beven, “Changing ideas in hydrology: the case of physically based models,” *J. Hydrol.*, vol. 105, pp. 157–172, 1989.
- [142] M. B. Refsgaard, J. C., Storm, B., and Abbott, *Comment on “A discussion of distributed hydrological modelling” by K. Beven, in: Distributed hydrological modelling*. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1996.

- [143] P. E. and T. E. O'Connell, "Modelling of rainfall, flow and mass transport in hydrological systems: an overview," *J. Hydrol.*, vol. 175, pp. 3–16, 1996.
- [144] "World Bank (2017). Country data. Accessed on-line in November 2017," 2017. [Online]. Available: <https://data.worldbank.org/country/lebanon>.
- [145] A. A. D. Mohammad Zarenistanak, Amit G. Dhorde, R. H. Kripalani, "Trends and projections of temperature, precipitation, and snow cover during snow cover-observed period over southwestern Iran," *Theor. Appl. Climatol.*, vol. 122, no. 3–4, pp. 421–440, 2015.
- [146] A. M. G. K. T. T. A. Buishand, "Regression model for generating time series of daily precipitation amounts for climate change impact studies," *Stoch. Hydrol. Hydraul.*, vol. 10, no. 2, pp. 87–106, 1996.
- [147] Arnab Kumar Laha, *Linear Regression for Predictive Analytics*. 2018.
- [148] A. M. Varnousfaderani, H. A. Pahlavan, B. Zahraie, M. Nasser, "Improvement of multiple linear regression method for statistical downscaling of monthly precipitation," *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 15, no. 9, pp. 1897–1912, 2018.
- [149] 1972 Daniel A. Cluis, "Relationship between stream water temperature and ambient air temperature - A simple autoregressive model for mean daily stream water temperature fluctuations," *Nord. Hydrol.*, vol. 3, no. 2, pp. 65–71, 1972.
- [150] P. E. B. Stefan H.G., "Stream temperature estimation from air temperature," *Water Resour. Bull.*, vol. 29, no. 1, pp. 27–45, 1993.
- [151] S. H. G. Mohseni O., "Stream temperature/air temperature relationship: a physical interpretation," *J. Hydrol.*, vol. 218, pp. 128–141, 1999.
- [152] C. C. Y. Song C.C.S., "Stochastic properties of daily temperature in rivers," *J. Environ. Eng. Div.*, vol. Paper N 12, pp. 217–231, 1977.

- [153] J. J. E. Hertig, “Predictability of Mediterranean climate variables from oceanic variability. Part II: Statistical models for monthly precipitation and temperature in the Mediterranean area,” *Clim. Dyn.*, vol. 36, no. 5–6, pp. 825–834, 2011.
- [154] J. A. F. S Weisberg, *An R Companion to Applied Regression*. Sage Publications, 2011.
- [155] M. P. Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D.; Vecchi, *Optimization by Simulated Annealing*. Science 220 (4598):, 1983.
- [156] D. E. Goldberg, *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley, 1989.
- [157] V. K. Duan, Q., Sorooshian, S., and Gupta, “Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models,” *Water Resour. Res.*, vol. 28, no. 4, pp. 1015– 1031, 1992.
- [158] S. Duan, Q. A., Gupta, V. K., and Sorooshian, “Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization,” *J. Optim. Theory Appl*, vol. 76, no. 3, pp. 501– 521, 1993.
- [159] Bates B.C., “Calibration of the SFB model using a simulated annealing approach,” *Proc. Int. Hydrol. Water Resour*, vol. 3, pp. 1–6, 1994.
- [160] Efstratiadis A. and Koutsoyiannis D., “An evolutionary annealing-simplex algorithm for global optimisation of water resource systems,” in *Hydroinformatic 2002 : Proceedings of the fifth international conference on hydroinformatics*, 2002, p. pages 1423-1428.
- [161] Franchini M., “Use of genetic algorithm combined with a local search method for the automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models,” *Hydrol. Sci. J.*, vol. 42, no. 3, pp. 357–379, 1996.
- [162] Franchini, M. & Galeati, G., “Comparing several genetic algorithm schemes for the calibration of conceptual rainfall-runoff models,” *Hydrol. Sci. J.*, vol. 41, no. 1, pp. 21–39,

1997.

- [163] Franchini M. Galeati G. and Berra S., “Global techniques for the calibration of conceptual rainfall-runoff models,” *Hydrol. Sci. J.*, vol. 43, pp. 443–458, 1998.
- [164] S. S. and Y. P. O. Gupta H.V., “Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration,” *J. Hydrol. Eng.*, pp. 135–143, 1999.
- [165] Thyer M. , Kuczera G. and Bates B. C., “Probabilistic optimisation for conceptual rainfall-run-off models : A comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms,” *Water Resour. Res.*, vol. 35(3), pp. 767–773, 1999.
- [166] G. Kuczera, “Efficient subspace probabilistic parameter optimization for catchment models,” *Water Resour. Res.*, vol. 33, pp. 177–185, 1997.
- [167] S. Y. Muttill, N. and Liong, “Improved Robustness and Efficiency of the SCE-UA Model-calibrating Algorithm,” in *The Asia Oceania Geosciences Society’s 2nd Annual Meeting (AOGS 2005)*, 2005, pp. 20–24.
- [168] S. Y. Muttill, N and Liong, “Superior exploration–exploitation balance in shuffled complex evolution,” *J. Hydr. Engrg.*, vol. 130, no. 12, pp. 1202–1205, 2004.
- [169] D. Nunoo, C. and Mrawira, “Shuffled complex evolution algorithms in infrastructure works programming.,” *ASCE J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 18, no. 3, pp. 257–266, 2004.
- [170] and G. V Duan Q., Sorooshian S., “Effective and Efficient Global Optimization for Conceptual Rainfall-Runoff Models,” *Water Resour. Res.*, vol. 28, no. 4, pp. 1015–1031, 1992.
- [171] L. Tubiana, A. Magnan, and F. Gemenne, *Anticiper pour s’ adapter: le nouvel enjeu du changement climatique*. Pearson Education France, 2010.
- [172] K. E. Kunkel, R. A. Pielke, and S. A. Changnon, “Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review,” *Bull. Am.*

Meteorol. Soc., vol. 80, no. 6, pp. 1077–1098, 1999.

- [173] F. W. Zwiers and V. V. Kharin, “Changes in the extremes of the climate simulated by CGC GCM2 under CO₂ doubling,” *J. Clim.*, vol. 11, no. 9, pp. 2200–2222, 1998.
- [174] D. Cooley, “Extreme value analysis and the study of climate change: A commentary on Wigley 1988,” *Clim. Change*, vol. 97, no. 1, pp. 77–83, 2009.
- [175] T. M. L. Wigley, “The effect of changing climate on the frequency of absolute extreme events,” *Clim. Change*, vol. 97, no. 1, pp. 67–76, 2009.
- [176] F. Giorgi and P. Lionello, “Climate change projections for the Mediterranean region,” *Glob. Planet. Change*, vol. 63, no. 2–3, pp. 90–104, 2008.
- [177] P. Lionello *et al.*, “The Mediterranean climate: An overview of the main characteristics and issues,” in *Mediterranean*, vol. 4, P. Lionello, P. Malanotte-Rizzoli, and R. B. T.-D. in E. and E. S. Boscolo, Eds. Elsevier, 2006, pp. 1–26.
- [178] P. Lionello, F. Dalan, and E. Elvini, “Cyclones in the Mediterranean region: The present and the doubled CO₂ climate scenarios,” *Clim. Res.*, vol. 22, no. 2, pp. 147–159, 2002.
- [179] X. Zhang *et al.*, “Trends in Middle East climate extreme indices from 1950 to 2003,” *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 110, no. 22, pp. 1–12, 2005.
- [180] J. Lelieveld, Y. Proestos, P. Hadjinicolaou, M. Tanarhte, E. Tyrlis, and G. Zittis, “Strongly increasing heat extremes in the Middle East and North Africa (MENA) in the 21st century,” *Clim. Change*, vol. 137, no. 1–2, pp. 245–260, 2016.
- [181] B. Grassi, G. Redaelli, and G. Visconti, “Arctic sea ice reduction and extreme climate events over the mediterranean region,” *J. Clim.*, vol. 26, no. 24, pp. 10101–10110, 2013.
- [182] E. Sánchez, C. Gallardo, M. A. Gaertner, A. Arribas, and M. Castro, “Future climate extreme events in the Mediterranean simulated by a regional climate model: A first approach,” *Glob. Planet. Change*, vol. 44, no. 1–4, pp. 163–180, 2004.

- [183] G. Lenderink and E. van Meijgaard, "Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes," *Nat. Geosci.*, vol. 1, no. 8, pp. 511–514, 2008.
- [184] A. J. De Vries, E. Tyrlis, D. Edry, S. O. Krichak, B. Steil, and J. Lelieveld, "Extreme precipitation events in the Middle East: Dynamics of the Active Red Sea Trough," *J. Geophys. Res. Atmos.*, vol. 118, no. 13, pp. 7087–7108, 2013.
- [185] R. Cheddadi and C. Khater, "Climate change since the last glacial period in Lebanon and the persistence of Mediterranean species," *Quat. Sci. Rev.*, vol. 150, pp. 146–157, 2016.
- [186] C. P. Kitsos, T. A. Oliveira, A. Rigas, and S. Gulati, "Theory and Practice of Risk Assessment: ICRA 5, Tomar, Portugal, 2013," *Springer Proc. Math. Stat.*, vol. 136, 2015.
- [187] Z. Khraibani, C. Jacob, C. Ducrot, M. Charras-Garrido, and C. Sala, "A Non Parametric Exact Test Based on the Number of Records for an Early Detection of Emerging Events: Illustration in Epidemiology," *Commun. Stat. - Theory Methods*, vol. 44, no. 4, pp. 726–749, 2015.
- [188] Z. Khraibani, H. M. Badran, and H. Khraibani, "Records Method for the Natural Disasters Application to the Storm Events Records Method for the Natural Disasters Application to the Storm Events," no. April 2019, 2011.
- [189] S. Gulati, F. George, and B. M. Golam Kibria, "Analysis of hurricane extremes and record values in the Atlantic," *Commun. Stat. Case Stud. Data Anal. Appl.*, vol. 5, no. 2, pp. 101–110, 2019.
- [190] G. Sneh, G. Florence, G. K. B. M., H. Shahid, C. Steve, and P. Jean-Paul, "Probable Maximum Loss for the Florida Public Hurricane Loss Model: Comparison," *ASCE-ASME J. Risk Uncertain. Eng. Syst. Part A Civ. Eng.*, vol. 3, no. 4, p. 4017009, Dec. 2017.
- [191] "Handbook of Financial Econometrics and Statistics," *Handb. Financ. Econom. Stat.*, 2015.
- [192] Claeskens, Gerda & Hjort, Nils Lid, *Model Selection and Model Averaging*. Cambridge

Books, Cambridge University Press, number 9780521852258, December, 2008.

- [193] F. E. Harrell, “With applications to linear models, logistic regression, and survival analysis (Book Section),” *Regres. Model. Strateg.*, pp. 106–107, 2001.
- [194] A. S. Hoayek, G. R. Ducharme, and Z. Khraibani, “Distribution-free inference in record series,” *Extremes*, vol. 20, no. 3, pp. 585–603, 2017.
- [195] B. C. Arnold, N. Balakrishnan, and H. N. Nagaraja, “Records,” 2011.
- [196] R. Ballerini and S. I. Resnick, “Embedding sequences of successive maxima in extremal processes, with applications,” *J. Appl. Probab.*, vol. 24, no. 4, pp. 827–837, 1987.
- [197] I. H. Witten, E. Frank, M. A. Hall, and C. J. Pal, “Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques,” *Data Min. Pract. Mach. Learn. Tools Tech.*, vol. 31, pp. 1–621, 2016.
- [198] S. Mullainathan and J. Spiess, “Machine Learning: An Applied Econometric Approach,” *J. Econ. Perspect.*, vol. 31, no. 2, pp. 87–106, 2017.
- [199] R. A. Fisher and L. H. C. Tippett, “Limiting forms of the frequency distribution of the largest or smallest member of a sample,” *Math. Proc. Cambridge Philos. Soc.*, vol. 24, no. 2, pp. 180–190, 1928.
- [200] B. Gnedenko, “Sur La Distribution Limite Du Terme Maximum D’Une Serie Aleatoire,” *Ann. Math.*, vol. 44, no. 3, pp. 423–453, 1943.
- [201] J. I. Pickands, “Statistical inference using extreme value order statistics,” *Ann. Stat.*, vol. 3, pp. 119–131., 75AD.
- [202] A. A. Balkema and L. de Haan, “Residual Life Time at Great Age,” *Ann. Probab.*, vol. 2, no. 5, pp. 792–804, 1974.
- [203] B. C. Arnold and J. A. Villasenor, “The Asymptotic Distributions of Sums of Records,” *Extremes*, vol. 1, no. 3, pp. 351–363, 1999.

- [204] W. Bank, "Retrieved from Country data. Accessed on-line in July 2019," 2019. .
- [205] K. N. Chandler, "The Distribution and Frequency of Record Values," *J. R. Stat. Soc. Ser. B*, vol. 14, no. 2, pp. 220–228, Jul. 1952.
- [206] G. R. Dargahi-Noubary, "Seismic hazard assessment using the theory of records," *Nat. Hazards*, vol. 3, no. 2, pp. 161–171, 1990.
- [207] R. S. Linder, "Parametric and Nonparametric Inference From Record-Breaking Data," *J. Am. Stat. Assoc.*, vol. 99, no. 465, pp. 297–297, 2004.
- [208] M. Abramowitz and S. Irene, *Handbook of Mathematical Functions, Graphs, and Mathematical Tables*. New York: Wiley, 1970.
- [209] M. Finlayson *et al.*, "Millennium Ecosystem Assessment: Ecosystems and human well-being: wetlands and water synthesis," 2005.
- [210] W. M. A. Khalifa, S. M. Abdel-Gawad, and N. M. Abdel-Hamid, "Water Quality Simulation of Lake Qaroun Using Two Dimensional Models," *Proc. Water Environ. Fed.*, vol. 2001, no. 16, pp. 803–812, 2012.
- [211] F. Al-badaii, M. Shuhaimi-othman, and M. B. Gasim, "Water Quality Assessment of the Semenyih River , Selangor , Malaysia," vol. 2013, 2013.
- [212] V. Zitko, M. C. Division, C. S. Branch, and B. Station, "Principal Component Analysis in the Evaluation of Environmental Data," vol. 28, no. 12, pp. 718–722, 1994.
- [213] I. T. Jolliffe, J. Cadima, and J. Cadima, "Principal component analysis : a review and recent developments Subject Areas : Author for correspondence ;," 2016.
- [214] C. Feng, G. Tollin, and J. H. Enemark, "Sulfite oxidizing enzymes," vol. 1774, pp. 527–539, 2007.
- [215] M. A. House, "A WATER QUALITY INDEX FOR USE IN THE OPERATIONAL MANAGEMENT OF RIVER WATER QUALITY IN EUROPE," D. WHEELER, M. L.

RICHARDSON, and J. B. T.-W. 89 BRIDGES, Eds. Pergamon, 1989, pp. 159–168.

- [216] E. Srikanth, S. Kumar, E. B. Sudhakar, K. S. R. Krishna, and P. V. Rao, “Determining Water Quality Index for the Evaluation of Water Quality of River Determining Water Quality Index for the Evaluation of Water Quality of River Godavari,” no. August, 2014.
- [217] S. Ravichandran, “Hydrological Influences on the Water Quality Trends in Tamiraparani Basin, South India,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 87, no. 3, pp. 293–309, 2003.
- [218] N. Gantidis, M. Pervolarakis, and K. Fytianos, “Assessment of the quality characteristics of two lakes (Koronia and Volvi) of N. Greece.,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 125, no. 1–3, pp. 175–181, Feb. 2007.
- [219] M. B. Arain, T. G. Kazi, M. K. Jamali, N. Jalbani, H. I. Afridi, and A. Shah, “Total dissolved and bioavailable elements in water and sediment samples and their accumulation in *Oreochromis mossambicus* of polluted Manchar Lake.,” *Chemosphere*, vol. 70, no. 10, pp. 1845–1856, Feb. 2008.
- [220] T. Hamieh, “Modeling of Runoff as a Function of Temperature and Precipitation: Application to the Litani River in Lebanon,” vol. 10, no. 9, 2019.
- [221] O. Altansukh and G. Davaa, “Application of Index Analysis to Evaluate the Water Quality of the Tuul River in Mongolia,” *J. Water Resour. Prot.*, vol. 03, no. 06, pp. 398–414, 2011.
- [222] R. C. Ferrier, A. C. Edwards, D. Hirst, I. G. Littlewood, C. D. Watts, and R. Morris, “Water quality of Scottish rivers: spatial and temporal trends.,” *Sci. Total Environ.*, vol. 265, no. 1–3, pp. 327–342, Jan. 2001.
- [223] N.-B. Chang, H. W. Chen, and S. K. Ning, “Identification of river water quality using the Fuzzy Synthetic Evaluation approach,” *J. Environ. Manage.*, vol. 63, no. 3, pp. 293–305, 2001.
- [224] W. Petersen, L. Bertino, U. Callies, and E. Zorita, “Process identification by principal

- component analysis of river water-quality data,” *Ecol. Modell.*, vol. 138, no. 1, pp. 193–213, 2001.
- [225] H. Huang and J. Lu, “Identification of river water pollution characteristics based on projection pursuit and factor analysis,” *Environ. Earth Sci.*, vol. 72, no. 9, pp. 3409–3417, 2014.
- [226] Y. Zhang, F. Guo, W. Meng, and X.-Q. Wang, “Water quality assessment and source identification of Daliao river basin using multivariate statistical methods,” *Environ. Monit. Assess.*, vol. 152, no. 1, p. 105, 2008.
- [227] A. Hayek *et al.*, “Evaluation of the Physico-Chemical Properties of the Waters on the Litani River Station Quaraoun,” *Am. J. Anal. Chem.*, vol. 11, pp. 90–103, 2008.
- [228] C. Y. P. Ayekoe, D. Robert, and D. G. Lanciné, “Combination of coagulation-flocculation and heterogeneous photocatalysis for improving the removal of humic substances in real treated water from Agbô River (Ivory-Coast),” *Catal. Today*, vol. 281, pp. 2–13, 2017.
- [229] K. D. Balke and Y. Zhu, “Natural water purification and water management by artificial groundwater recharge,” *J. Zhejiang Univ. Sci. B*, vol. 9, no. 3, pp. 221–226, 2008.
- [230] H. Selcuk, J. J. Sene, H. Z. Sarikaya, M. Bekbolet, and M. A. Anderson, “An innovative photocatalytic technology in the treatment of river water containing humic substances,” *Water Sci. Technol.*, vol. 49, no. 4, pp. 153–158, 2004.
- [231] D. Săkol and K. Konieczny, “Application of coagulation and conventional filtration in raw water pretreatment before microfiltration membranes,” *Desalination*, vol. 162, pp. 61–73, 2004.
- [232] K. Konieczny, D. Sakol, J. Płonka, M. Rajca, and M. Bodzek, “Coagulation-ultrafiltration system for river water treatment,” *Desalination*, vol. 240, no. 1–3, pp. 151–159, 2009.
- [233] K. Singh, A. Malik, and S. Sinha, “Water Quality Assessment and Apportionment of

Pollution Sources of Gomti River (India) Using Multivariate Statistical Techniques – A Case Study,” *Anal. Chim. Acta - ANAL CHIM ACTA*, vol. 538, pp. 355–374, May 2005.

- [234] X. Qin, G. Huang, B. Chen, and B. Zhang, “An Interval-Parameter Waste-Load-Allocation Model for River Water Quality Management Under Uncertainty,” *Environ. Manage.*, vol. 43, no. 6, pp. 999–1012, 2009.
- [235] C.-S. Lee and C.-G. Wen, “Application of Multiobjective Programming to Water Quality Management in a River Basin,” *J. Environ. Manage.*, vol. 47, no. 1, pp. 11–26, 1996.
- [236] A. Barakat, M. El Baghdadi, J. Rais, B. Aghezzaf, and M. Slassi, “Assessment of spatial and seasonal water quality variation of Oum Er Rbia River (Morocco) using multivariate statistical techniques,” *Int. Soil Water Conserv. Res.*, vol. 4, no. 4, pp. 284–292, 2016.
- [237] M. Vega, R. Pardo, E. Barrado, and L. Debán, “Assessment of seasonal and polluting effects on the quality of river water by exploratory data analysis,” *Water Res.*, vol. 32, no. 12, pp. 3581–3592, 1998.
- [238] J. Y. Lee, J. Y. Cheon, K. K. Lee, S. Y. Lee, and M. H. Lee, “Statistical evaluation of geochemical parameter distribution in a ground water system contaminated with petroleum hydrocarbons,” *J. Environ. Qual.*, vol. 30, no. 5, pp. 1548–1563, 2001.
- [239] R. Reghunath, T. R. S. Murthy, and B. R. Raghavan, “The utility of multivariate statistical techniques in hydrogeochemical studies: an example from Karnataka, India,” *Water Res.*, vol. 36, no. 10, pp. 2437–2442, 2002.
- [240] M. J. Anderson, “Permutation tests for univariate or multivariate analysis of variance and regression,” *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, vol. 58, no. 3, pp. 626–639, 2001.
- [241] A. H. Pejman, G. R. N. Bidhendi, A. R. Karbassi, N. Mehrdadi, and M. E. Bidhendi, “Evaluation of spatial and seasonal variations in surface water quality using multivariate statistical techniques,” *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, vol. 6, no. 3, pp. 467–476, 2009.

ANNEXE I : (Logiciel R 3.5.3/ Théorie des valeurs extrêmes):

Programme 1/Calcul du temps et niveau de retour/GEV

.....

```
temp=read.table(file="Temperature journaliere.csv",header=TRUE)
plot(temp)
plot(density(temp))
plot(prec,type="l",main="Temperature",xlab="Year",ylab="Temperature")
temp1=read.table(file="Temperature Maximum.csv",header=TRUE)
ams=as.numeric(as.character(unlist(temp1[[1]])))
fit_mle <- fevd(as.vector(ams), method = "MLE", type="GEV")
fit_mle
ci(fit_mle,type="parameter")
plot(fit_mle)
rl_mle <- return.level(fit_mle, conf = 0.05, return.period= c(15,30,40,50))
rl_mle
plot(rl_mle)
ci(rl_mle, type = "parameter")
fit0 <- fitdistr(ams, "Weibull")
fit0
wb1=rweibull(195,7.0610784,27.6837406)
ks.test(ams, wb1)
mrlplot(temp,main="Mean Residual Life Plot For Temperature")
simgpd=fpot(temp,28,std.err=FALSE)
simgpd
low=simgpd$estimate-1.96*simgpd$std.err
up=simgpd$estimate+1.96*simgpd$std.er
fit <- fevd(temp,threshold=28, type="GP")
fit
plot(fit)
fit1 <- fevd(temp,threshold=28, type="Exponential")
fit1
plot(fit1)
```

```

fit2 <- fevd(temp,threshold=28, type="Gumbel")
fit2
plot(fit2)
ci(fit, type="parameter")
prec=read.table(file="Precipitation.csv",header=TRUE)
plot(prec)
plot(density(prec))
plot(prec,type="l",main="Precipitation",xlab="Year",ylab="Precipitation")
prec1=read.table(file="Precipitation Maximum.csv",header=TRUE)
ams=as.numeric(as.character(unlist(prec1[[1]])))
fit_mle <- fevd(as.vector(ams), method = "MLE", type="GEV")
fit_mle
ci(fit_mle,type="parameter")
plot(fit_mle)
rl_mle <- return.level(fit_mle, conf = 0.05, return.period= c(15,30,40,50))
rl_mle
plot(rl_mle)
ci(rl_mle, type = "parameter")
fit0 <-fitdistr(ams, "Weibull")
fit0
wb1=rweibull(116,3.920154 ,180.232817)
ks.test(ams, wb1)
mrlplot(prec,main="Mean Residual Life Plot For Precipitation")
simgpd=fpot(prec,170)
simgpd
low=simgpd$estimate-1.96*simgpd$std.err
up=simgpd$estimate+1.96*simgpd$std.er
simexp=fpot(prec,threshold=163.35,shape=0)
simexp
par(mfrow=c(2,2))
plot(simexp)
fit <- fevd(prec,threshold=170, type="GP")
fit
plot(fit)
fit1 <- fevd(prec,threshold=170, type="Exponential")

```

```

fit1
plot(fit1)
fit2 <- fevd(prec,threshold=170, type="Gumbel")
fit2
plot(fit2)
rl <- return.level(fit, conf = 0.05, return.period= c(15,30,40,50))
rl
plot(rl)
ci(fit, type="parameter")
donne=read.table(file="Temp and Prec.txt",header=TRUE)
summary(donne)
attach(donne)
plot.ts(donne)
plot(Years, Temperature, type="o", col="blue", lty=1, ylim=c(0,50))
Precipitation1=Precipitation/10
plot(Years, Precipitation, type="o", col="blue", lty=1, ylim=c(0,1000))
par(mfrow=(c(3,2)))
plot(Years,Temperature, type="l", col="blue", lty=1, ylim=c(20,35))
plot(Years,Precipitation, type="l", col="blue", lty=1, ylim=c(300,1000))
par(mfrow=(c(1,1)))
adf.test(Temperature)
stationary.test(Temperature,method=c("adf"))
ur.df(Temperature, lags = 6, selectlags = "AIC", type = "drift")
ndiffs(Temperature)
Temperature1=diff(Temperature,differences=1)
ndiffs(Temperature1)
adf.test(Temperature1)
adf.test(Precipitation)
stationary.test(Precipitation,method=c("adf"))
ur.df(Precipitation, lags = 6, selectlags = "AIC", type = "drift")
ndiffs(Precipitation)
Precipitation1=diff(Precipitation,differences=1)
ndiffs(Precipitation1)
adf.test(Precipitation1)
varmat=as.matrix(cbind(Dc,Dy))

```

```

varfit=VAR(varmat)
Prec11=log(Precipitation)
Temp11=log(Temperature)
Prec12=diff(Prec11,differences=1)
PP.test(Prec12)
PP.test(Prec)
ndiffs(Prec)
Prec1=diff(Prec,differences=1)
PP.test(Prec1)
PP.test(Temp11)
ndiffs(Temp11)
Temp12=diff(Temp11,differences=1)
PP.test(Temp12)
PP.test(Temp)
ndiffs(Temp)
Temp1=diff(Temp,differences=1)
PP.test(Temp1)
varfit=VAR(y, p = 1, type = "both")
AIC(varfit)
x=cbind(Temp1,Temp12)
varfit1=VAR(x, p = 1, type = "both")
summary(varfit1,equation="Temp1")
AIC(varfit1)
summary(ca.jo(y, type = c("eigen", "trace"), ecdet = c("none", "const", "trend"), K = 2,
spec=c("longrun", "transitory"), season = NULL, dumvar = NULL))
summary(ca.jo(x, type = c("eigen", "trace"), ecdet = c("none", "const", "trend"), K = 2,
spec=c("longrun", "transitory"), season = NULL, dumvar = NULL))

```

.....

ANNEXE II : (Théorie des records)

Programme 2/Calcul de nombre de records/Stirling number

```
Nmax=input('valeur de n; nombre de ligne :');

Nbrec=input('valeur de m; nombre de record:');

%%calcul de stirling number par deux methodes%%
%%1-de la formule directement%%

%for n=1:Nmax

% for m=1:Nbrec

%S(n,m)=0.;

% for k=0:n-m

%S2=0.;

%for j=0:k
%S2=S2+((-1)^(k-j))*(nchoosek(k,j))*((j)^(n-m+k));
%end

%S2=S2/gamma(k+1);

%S(n,m)=S(n,m)+((-1)^(k))*(nchoosek(n-1+k,n-m+k))*(nchoosek((2*n)-m,n-m-k))*S2;

%end

% end

% end

%S,

for n=2:Nmax+1
for k=2:Nbrec+1
Strec(n,n)=1;
%if (n>1 && k==1) | (n==1 && k>1)
Strec(1,1)=1;
Strec(n,1)=0.;
Strec(1,k)=0.;
```

```

        Strec(n+1,k)=Strec(n,k-1)-(n-1).*Strec(n,k);
    end
end
Strec;
% suppression de premier ligne et colonne de la matrice Strec%
Strec(1,:)=[];
Strec(:,1)=[];
St=Strec,

    %Calcul de la probablilité du nombre de record non triviaux, m<=n %%
Pexact(1)=1/(Nmax+1);
% for n=2:Nmax
for m=2:Nbrec
Pexact(m)=abs(St(Nmax+1,m))/factorial(Nmax+1);
%end
end
Pexact,

%cumulative distribution fonctionexacte%

cdfexact(1)=Pexact(1);
cumulative(1)=1-Pexact(1);
probstrict(1)=0.%; % P(N_n<0)
alpha(1)=1-probstrict(1);
    for m=2:Nbrec
        cdfexact(m)=cdfexact(m-1)+Pexact(m); % P(N_n<=m)
        probstrict(m)=probstrict(m-1)+Pexact(m-1);%P(N_n<m)
        cumulative(m)=1-cdfexact(m); % P(N_n>m)
        alpha(m)=1-probstrict(m);%alpha=P(N_n>=m)
    end
cumulative,
probstrict,
alpha,
    *****
%calcul de la probabilité excat et asymptotique du nombre de record non
%trivial sous H_0

Nmax= input('valeur de n; nombre de ligne :'); %nombre de ligne; taille de l'echantillon

Nbrec=input('valeur de m; nombre de record:'); %nombre de colonne; nombre de records

%%calcul de stirling number par deux methodes%%
%% 1-de la formule directement%%

% for n=1:Nmax

% for m=1:Nbrec

```

```

%S(n,m)=0.;

%   for k=0:n-m

%S2=0.;

%for j=0:k
%S2=S2+((-1)^(k-j))*(nchoosek(k,j))*((j)^(n-m+k));
%end

%S2=S2/gamma(k+1);

%S(n,m)=S(n,m)+((-1)^(k))*(nchoosek(n-1+k,n-m+k))*(nchoosek((2*n)-m,n-m-k))*S2;

%end

% end

% end

%S,

for n=2:Nmax+1

    for k=2:Nbrec+1

        Strec(n,n)=1;
        Strec(1,1)=1;
        Strec(n,1)=0.;
        Strec(1,k)=0.;
        Strec(n+1,k)=Strec(n,k-1)-(n-1).*Strec(n,k);

    end

end

Strec;

% suppression de premier ligne et colonne de la matrice Strec%
Strec(1,:)=[];
Strec(:,1)=[];
St=Strec,

%Calcul de la probablilité du nombre de record non triviaux, m<=n %%

Pexact(1)=1/(Nmax);

for n=2:Nmax

```

```

for m=2:Nbrec

    Pexact(m)=abs(St(n,m))/gamma(n+1);

end

end
Pexact,

%cumulative distribution functionexacte%

cdfexact(1)=Pexact(1);
cumulative(1)=1-Pexact(1);
probstrict(1)=0.;% P(N_n<0)
alpha(1)=1-probstrict(1);

for m=2:Nbrec

    cdfexact(m)=cdfexact(m-1)+Pexact(m); % P(N_n<=m)

    probstrict(m)=probstrict(m-1)+Pexact(m-1);%P(N_n<m)

    cumulative(m)=1-cdfexact(m); % P(N_n>m)

    alpha(m)=1-probstrict(m);%alpha=P(N_n>=m)

end

cumulative,

probstrict,

alpha,

%calcul de la probabilité asymptotique du nombre de record non trivial

Pasym(1)=1./Nmax;

for m=2:Nbrec

    Pasym(m)=((log(Nmax))^(m-1))./(Nmax.*factorial(m-1));

end
Pasym,

%Graphics%
hold on;

```

```
plot([0:Nbrec-1],[Pexact], 'o-b');
plot([0:Nbrec-1], [Pasym], 'o-r');
xlabel('m');
ylabel('P_{H_0}(N_n^{ntr}=m)');
title(['Exact and asymptotic probability distributions of N_n^{ntr} under H_0'
',n=',num2str(Nmax-1)]);
legend('Exact','Asymptotic',2);
hold off;
```



ANNEXE III: Shuffled Complex Evaluation Method

Code utilisée pour optimiser la relation entre les facteurs environnementaux
(Débit, Température et Précipitation)

```
#include <iostream>
#include <stdlib.h>
# include <cstdlib>
# include <iomanip>
# include <ctime>
# include <cmath>
# include <math.h>
#include <vector>

# include <string>
# include <fstream>
# include <cstring>

using namespace std;
# include "latinize.hpp"
# include "eispack.hpp"

        ofstream fichier("test.txt", ios::out | ios::trunc);
        ofstream fichierA("opt.txt", ios::out | ios::trunc);

        int ctee=1;
                const int pp =3;
        const int cs =pp+1;
const int mm= 2*cs+1; // pp>1 implique "SCE2", donc m=2*n+1
int beta;
double Ma[mm][cs];
double *xxi1;
double *yyi1;
double zs;int kjj=0; int kjj1=0;double *At;
#define Essai 1
int icounttotal;
int deno=1;
#define limit 5000
```

```

void timestamp ( void )
{
# define TIME_SIZE 40

static char time_buffer[TIME_SIZE];
const struct tm *tm;
size_t len;
time_t now;

now = time ( NULL );
tm = localtime ( &now );

len = strftime ( time_buffer, TIME_SIZE, "%d %B %Y %I:%M:%S %p", tm );

cout << time_buffer << "\n";

fichier << time_buffer << "\n";
return;
# undef TIME_SIZE
}

```

```

void r8mat_latinize ( int m, int n, double table[] )
{
int i;
int *indx;
int j;
double *v;
double v_max;
double v_min;

v = new double[n];

for ( i = 0; i < m; i++ )
{
for ( j = 0; j < n; j++ )
{
v[j] = table[i+j*m];
}
v_min = r8vec_min ( n, v );
v_max = r8vec_max ( n, v );
indx = r8vec_sort_heap_index_a_new ( n, v );

for ( j = 0; j < n; j++ )
{
table[i+indx[j]*m] = ( ( double ) ( n - j - 1 ) * v_min
+ ( double ) ( j ) * v_max )
/ ( double ) ( n - 1 );
}
}

```

```
    delete [] indx;  
}  
delete [] v;
```

```
return;  
}
```

```
double r8vec_max ( int n, double r8vec[] )  
{  
    int i;  
    double value;  
  
    value = r8vec[0];  
  
    for ( i = 1; i < n; i++ )  
    {  
        if ( value < r8vec[i] )  
        {  
            value = r8vec[i];  
        }  
    }  
    return value;  
}
```

```
double r8vec_min ( int n, double r8vec[] )  
{  
    int i;  
    double value;  
  
    value = r8vec[0];  
  
    for ( i = 1; i < n; i++ )  
    {  
        if ( r8vec[i] < value )  
        {  
            value = r8vec[i];  
        }  
    }  
    return value;  
}
```

```
int *r8vec_sort_heap_index_a_new ( int n, double a[] )  
{  
    double aval;  
    int i;  
    int *indx;  
    int indxt;  
    int ir;  
    int j;  
    int l;  
  
    indx = new int[n];
```

```

for ( i = 1; i <= n; i++ )
{
    indx[i-1] = i;
}

l = n / 2 + 1;
ir = n;

for ( ;; )
{
    if ( l < 1 )
    {
        l = l - 1;
        indxt = indx[l-1];
        aval = a[indxt-1];
    }
    else
    {
        indxt = indx[ir-1];
        aval = a[indxt-1];
        indx[ir-1] = indx[0];
        ir = ir - 1;

        if ( ir == 1 )
        {
            indx[0] = indxt;
            for ( i = 0; i < n; i++ )
            {
                indx[i] = indx[i] - 1;
            }
            break;
        }
    }

    i = l;
    j = l + 1;

    while ( j <= ir )
    {
        if ( j < ir )
        {
            if ( a[indx[j-1]-1] < a[indx[j]-1] )
            {
                j = j + 1;
            }
        }
    }

    if ( aval < a[indx[j-1]-1] )
    {
        indx[i-1] = indx[j-1];
        i = j;
        j = j + j;
    }
}

```

```

    }
    else
    {
        j = ir + 1;
    }
}
indx[i-1] = indxt;
}
return indx;
}
//*****80

```

```

int s_len_trim ( string s )
{
    int n;

    n = s.length ( );

    while ( 0 < n )
    {
        if ( s[n-1] != ' ' )
        {
            return n;
        }
        n = n - 1;
    }

    return n;
}

```

```

void test01a ( double At[(cs-1)*mm] );

void test01a ( double At[(cs-1)*mm] )
{
    int ma;
    int na;int kp;
    double *tablea;
    ma=cs-1;na=mm;

    tablea = new double[ma*na];

    for(kp=0; kp<ma*na;kp++){ tablea[kp]=At[kp];}

    r8mat_latinize ( ma, na, tablea );

    for(kp=0; kp<ma*na;kp++){ At[kp]=tablea[kp];}

    delete [] tablea;

    return;
}

```

```

}

// Generate a random number between 0 and 1
// return a uniform number in [0,1].
unsigned int rti;int iterationsr;

double reall()
{rti = time(NULL);
iterationsr = rti % 3;
for (int i=0; i <= iterationsr; i++) rti = (rand()*rti + rand())%ULONG_MAX; rti=rti/2;
return double(rti)/double(INT_MAX);
}

double reall0()
{
return rand() / double(RAND_MAX);
}
//
// Generate a random number in a real interval.
// param a one end point of the interval
// param b the other end of the interval
// return a inform rand numberin [a,b].
double unifRand(double a, double b)
{
return (b-a)*reall() + a;
}

void nelmin ( double fn ( double x[] ), int n, int konvge, int *icount)
{
double ccoeff = 0.5;

double dn;
double dnn;
double ecoeff = 2.0;

int i;
int ihi;

int j;
int jcount;

int nn;
double *p;
double *p2star;
double *prand;
double *prandc;double *prandcc;
double *pbar;
double *pstar;
double rcoeff = 1.0;

```

```

double *y;
double *rhoe;
double *crhoe;

```

```

double y2star;

```

```

double ystar;
int ibeta=0;
double z;
extern int beta;
int *Tr;

```

```

double ab;double aa;

```

```

p = new double[n*(n+1)];
Tr = new int[n+1];
pstar = new double[n];
prand = new double[n];
prandc = new double[n];
prandcc = new double[n];
p2star = new double[n];
pbar = new double[n];
y = new double[n+1];
rhoe=new double[mm+1];
crhoe=new double[mm+1];
double face;
*icount = 0;

```

```

dn = ( double ) ( n );
nn = n + 1;
dnn = ( double ) ( nn );

```

```

for ( ; ; )
{
extern double Ma [mm][cs];
int iiy=0;;double yu=0;
for ( i = 0; i < mm; i++ ){iiy=i+1;rhoe[iiy]=2.0*(mm+1-iiy)/(mm*(mm+1));crhoe[iiy]=yu+rhoe[iiy];
yu=crhoe[iiy];
fichier<<"\n";}

```

```

rhoe[0]=crhoe[0]=0.0;

```

```

for( i = 0; i < nn; i++ ){Tr[i]=1000;};

```

```

int qq;
for ( qq = 0; qq < nn; qq++ ){face= unifRand (0, 1);
for ( iiy = 0; iiy <= mm; iiy++ ){if(crhoe[iiy+1] > face && face >
crhoe[iiy]){/*fichier<<"face="<<face;*/if(qq==0){Tr[qq]=iiy;};
if(qq>0){for ( j = 0; j < qq; j++ ){if(iiy==Tr[j]){qq--;break;} else{Tr[qq]=iiy;}};break;}}}

```

```

kjj=0;
for ( qq = 0; qq < nn; qq++ )
  {y[qq]=Ma[Tr[qq]][0];
for ( i = 0; i < n; i++ ) {p[n*qq+i]=Ma[Tr[qq]][i+1];}};

for (int it = 0; it < nn; it++)
for (int jt = it;jt < nn; jt++)
{if(y[it]>y[jt]) { aa=y[it]; y[it]=y[jt];y[jt]=aa;for(i=0;i<n;i++){ ab=p[n*it+i]; p[n*it+i]=
p[n*jt+i];p[n*jt+i]=ab; };int ta=Tr[it]; Tr[it]=Tr[jt];Tr[jt]=ta;}}

jcount = konvge;
for ( ; ; )
{
  ihi=n;

// Calculate PBAR, the centroid of the simplex vertices

  for ( i = 0; i < n; i++ )
  {
    z = 0.0;
    for ( j = 0; j < n; j++ ) //on utilise pas les "p" de la derniere fonction (mauvaise fonction)
    {
      z = z + p[i+j*n];
    }
    // z = z - p[i+ihi*n];
    pbar[i] = z / dn;
  }

  int no=0; At= new double [(cs-1)*mm];
  for ( i = 0; i < mm; i++ )
  for ( j = 1; j < cs; j++ )
    { At[no]=Ma[i][j];no++;}
  test01a (At);

int bae=n*(rand() % mm);
  for ( i = 0; i < n; i++ ){prand[i]=At[bae+i];/*prand[i]= unifRand (xxi1[i], yyi1[i]);*/}
// Reflection through the centroid.
  for ( i = 0; i < n; i++ )
    { pstar[i] = pbar[i] + rcoeff * ( pbar[i] - p[i+ihi*n] );
      if(xx1[i]>pstar[i] || pstar[i]>yy1[i]) {for( j = 0; j < n; j++
)/*fichier<<pstar[i];*/pstar[j]=prand[j];};break;}
  } ystar = fn ( pstar ); *icount = *icount + 1;

  if ( ystar < y[n] )
  {
    for ( i = 0; i < n; i++ )
    {
      p[i+ihi*n] = pstar[i];
    }
    y[n] = ystar;
  }

```

```

    // Contraction through the centroid.
else
{
for ( i = 0; i < n; i++ )
{
p2star[i] = pbar[i] + ccoeff * ( p[i+ihi*n] - pbar[i] );
} y2star = fn ( p2star ); *icount = *icount + 1;

if (y2star < y[n] )
{
for ( i = 0; i < n; i++ )
{
p[i+ihi*n] = p2star[i];
}
y[n] = y2star;
}

else
{
int bae1=n*(rand() % mm);
for ( i = 0; i < n; i++ )
{prandcc[i]=At[bae1+i];/*prandcc[i]= unifRand (xxi1[i], yyi1[i]);*/
p[i+ihi*n] = prandcc[i];
}y[n] = fn (prandcc); *icount = *icount + 1;
}
}

jcount = jcount - 1; // "jcount" c'est "alfa" dans shuffled

if ( 0 ==jcount )
{
break;
}
}

kjj1=0;
for ( i = 0; i < nn; i++ )
{Ma[Tr[i]][0]=y[i]; for ( j = 0; j < n; j++ ){Ma[Tr[i]][j+1]=p[n*i+j];}}

for (int i = 0; i < mm; i++ )
{for (int j = i; j < mm; j++ )
{if(Ma[i][0]>Ma[j][0]) {for(int it=0;it<nn;it++){aa=Ma[i][it]; Ma[i][it]=Ma[j][it];Ma[j][it]=aa;}}}}

ibeta++;fichier<<"\n"<<"ibeta="<<ibeta<<endl;fichier<<"\n"<<"\n";

if (ibeta == beta)
{fichier<<"fini B"; icounttotal = icounttotal + *icount; break;}
}
delete [] At;

```

```

delete [] prand;
delete [] prandc;
delete [] prandcc;
delete [] rhoe;
delete [] crhoe;
delete [] Tr;
delete [] p;
delete [] pstar;
delete [] p2star;
delete [] pbar;
delete [] y;

```

```

return;
}

```

```

using namespace std;

```

```

void Projett ( );
double MRAD ( double x[cs-1] );

```

```

double *sty0; double *start;int n=cs-1;

```

```

        ifstream fft ("temp.txt");ifstream ffp ("pre.txt"); ifstream ffd ("debit.txt");

```

```

        const int npp=56;double*expT,*expP, *expD,*Fn,Moy=0;

```

```

ofstream pbest ("best value.txt");
ofstream fbest ("fbest value.txt");
ofstream pfx ("fx.txt");
ofstream px0 ("x0.txt");
ofstream px1 ("x1.txt");
ofstream px2 ("x2.txt");
ofstream px3 ("x3.txt");
ofstream px4 ("x4.txt");
double Mfbest[limit+100][Essai]={0};
double Mfx[limit+100][Essai]={0};
double Mx0[limit+100][Essai]={0};
double Mx1[limit+100][Essai]={0};
double Mx2[limit+100][Essai]={0};
double Mx3[limit+100][Essai]={0};
double Mx4[limit+100][Essai]={0};
double Mfxp[100][Essai]={0};

```

```

int i01,j01,i001;

```

```

double DD[pp*mm][cs]={0};

```

```

int main()

```

```

{ expT=new double[npp]; expP=new double[npp];expD=new double[npp];Fn=new double[npp];
  for (int il = 0; il < npp ; il++) { fft >> expT [il];ffp >> expP [il];ffd >> expD [il];Moy +=expD [il];}

```

```

        int i,j, it,ps;
        double aa;
xxi1= new double[n]; yyi1= new double[n];

xxi1[0]=-1000; yyi1[0]=1000;
xxi1[1]=-1000; yyi1[1]=1000;
xxi1[2]=-1000; yyi1[2]=1000;

double mvaleur=1.0*pow(10.0,-3);
timestamp ( );

fichier<<"\n\n"<<pp<<" complexes et "<<mm<<" points par complexe."<<endl;
fichier<<"Il faut que la meilleure valeur fx est plus petite que "<<mvaleur<<endl;

start = new double[n];
int conver=0;

beta=mm;
int nu1; double nu2=0.0; j01=-1;

for(int sh=0; sh<Essai;sh++)
{
j01++;
i01=0;i001=0;
for(ps=0; ps<mm*pp;ps++)
{
for(int re=0; re<n;re++)      { for(nu1=0;nu1<deno;nu1++){nu2= nu2+ unifRand (xxi1[re],
yyi1[re]);};start[re] =nu2/deno; nu2=0;}
DD[ps][0] = MRAD ( start ); for(int ps0=0; ps0<n;ps0++) {DD[ps][ps0+1]=start[ps0];} }

// Mettre la matrice "DD" de S points en ordre croissante de la fonction cout "fx";
        for ( i = 0; i < mm*pp; i++ )
            for ( j = i; j < mm*pp; j++ )
                {if(DD[i][0]>DD[j][0]) {for(it=0;it<n+1;it++){aa=DD[i][it];
DD[i][it]=DD[j][it];DD[j][it]=aa;}}}

                for ( it = 0; it < pp*mm; it++ )
                    {for(i=0;i<n+1;i++){cout<<DD[it][i]<<"\t";fichier<<DD[it][i]<<"\t";}
                    cout<<"\n";fichier<<"\n";}
                    icounttotal=mm*pp;

for ( ; ; )
{ int ki=0;

Mfxp[i001][j01]=DD[0][0];i001++;
double Ak[pp][mm][cs];

for (int k=0;k<pp;k++)
{
for (i=0;i<mm;i++)
{
for (j=0;j<cs;j++)
{

```

```

        Ak[k][i][j]=DD[ki+i][j];cout<<Ak[k][i][j]<<endl; } ki=ki+mm;}

for(ps=0; ps<pp;ps++)
    { for (i=0;i<mm;i++) for (j=0;j<cs;j++) { { Ma[i][j]=Ak[ps][i][j];cout<<Ma[i][j]<<endl; } }

        // la fct Thermak fait pp complexes, chaque complexe contient mm points et le sous-
        complexe contient n+1 points.

        Projezt ();

        for (i=0;i<mm;i++)for (j=0;j<cs;j++){ { Ak[ps][i][j]=Ma[i][j]; } }

ki=0;
for (int k=0;k<pp;k++){ for (i=0;i<mm;i++) { for (j=0;j<cs;j++) { DD[ki+i][j]= Ak[k][i][j]; } ki=ki+mm; }

        for ( i = 0; i < mm*pp; i++ )
        for ( j = i; j < mm*pp; j++ )
            { if(DD[i][0]>DD[j][0]) { for(it=0;it<n+1;it++){ aa=DD[i][it];
DD[i][it]=DD[j][it];DD[j][it]=aa; } }

            fichier<<"\n"<<"\n";
            for ( it = 0; it < pp*mm; it++ )
            { for(i=0;i<n+1;i++){ cout<<DD[it][i]<<"t";fichier<<DD[it][i]<<"t";}
            cout<<"\n";fichier<<"\n";}

        conver++;

        double za;double xa;
        za = 0.0;
        for ( i = 0; i < n+1; i++ )
            { za = za + DD[i][0]; } xa = za / (n+1);

        za = 0.0;for ( i = 0; i < n+1; i++ ) { za = za + pow ( DD[i][0] - xa, 2); }

        int jfault=0;
        if( DD[0][0]<mvalueur){ fichier<<"C'est bon"; jfault=2;}
        if ( limit < icounttotal ){ fichier<<"Beaucoup d'iterations"; jfault=2;}

        if ( za <= -1*pow(10.0,-7) ) { fichier<<"C'est bon pour z";jfault=2;}
        if(jfault==2){break;}
        else { fichier<<"\n"<<"Continue"<<endl;}

        };

        for (int ut=0; ut<npp; ut++)
        fichierA<<Fn[ut]<<endl;
        fichierA<<endl<<endl;
        };

        for(int i=0; i<limit; i++)
        { for(int j=0; j<Essai; j++)          { if(Mfx[i][j]>1e+100) pfx<<1e+100; else pfx<<Mfx[i][j]<<"t";
        fbest<<Mfbest[i][j]<<"t";
        px0<<Mx0[i][j]<<"t";px1<<Mx1[i][j]<<"t";px2<<Mx2[i][j]<<"t";px3<<Mx3[i][j]<<"t";px4<<Mx4[i][j]<<"
        t";}

```

```

fbest<<endl;px0<<endl;px1<<endl;px2<<endl;px3<<endl;px4<<endl;pfx<<endl;}

for(int i=0; i<50; i++)
    {for(int j=0; j<Essai; j++) pbest<<Mfxp[i][j]<<'\t';
    pbest<<endl;}

system("PAUSE");

return 0;
}
    double fx, result,Tn,Tn1,Pn,Pn1,Fn1,Fn2,Fn3;

    double MRAD ( double x[cs-1] )
{
    fx=0.0;
for (int il = 0; il < npp ; il++)
{if(il<ctee){Fn[il]=expD[il];}

else{
Fn[il]=x[0] + x[1]*pow(expP[il],1)+ x[2]*pow(expD[il-1],1) + x[3]*pow(expT[il-1],1);
Fn[il]= x[0]*pow(expP[il],1)+ x[1]*pow(expD[il-1],1) + x[2]*pow(expT[il-1],1);
    result= pow(Fn[il] - expD [il],2);
    fx += result; }
}
Mfx[i01][j01]=sqrt(fx/(npp-ctee));

Mx0[i01][j01]=DD[0][1];
Mx1[i01][j01]=DD[0][2];
Mx2[i01][j01]=DD[0][3];
Mx3[i01][j01]=DD[0][4];
Mfbest[i01][j01]=DD[0][0];

if(i01==1) {
    Mfbest[i01-1][j01]=Mfbest[i01][j01];
    Mx0[i01-1][j01]=Mx0[i01][j01];
    Mx1[i01-1][j01]=Mx1[i01][j01];
    Mx2[i01-1][j01]=Mx2[i01][j01];
    Mx3[i01-1][j01]=Mx3[i01][j01];
}
i01++;
return sqrt(fx/(npp-ctee));
}

    void Projet ( )
{
int icount; int konvge;
    konvge = 1;
    nelmin ( MRAD, n,konvge, &icount);
    cout << "\n";
    cout << " Number of total iterations = " << icounttotal << "\n";
    fichier << "\n";
    fichier << " Number of total iterations = " << icounttotal << "\n";

return;
}

```

ANNEXE IV : Publications

Articles Publiées

1- Analysis of the extreme and records values for temperature and precipitation in Lebanon.

Journal: Communications in Statistics: Case Studies, Data Analysis and Applications

DOI : 10.1080/23737484.2020.1765899 – **Date :** 18 May 2020.

2-Evaluation of the Physico-Chemical Properties of the Waters on the Litani River Station Qaraoun

Journal: Chemistry & Materials Science (AJAC)

DOI: 10.4236/ajac.2020.112007 – **Date:** February 2020

3- Modeling of Runoff as a Function of Temperature and Precipitation: Application to the Litani River in Lebanon

Journal: Earth Science & Climatic Change

Volume 10 - Issue 9 - 1000526 – **Date:** 19 October 2019

Article Soumis

4- Multivariate spatial and temporal analysis to study the variation of physico-chemical parameters in Litani River, Lebanon.

Journal: Environmental Monitoring and Assessment

Submission ID: EMAS-D-20-04888

ANNEXE V : Conférence Et Journée Scientifique

Conférence	ASMDA 2019 – DEMOGRAPHICS 2019 18th Applied Stochastic Models and Data Analysis International Conference & Demographics 2019 Workshop	
	11/Juin – 14/Juin 2019	Florence, Italy
	Sujet	Modeling of the extreme and records values for precipitation and temperature in Lebanon

Journées Scientifiques	FORUM DOCTORAL EDST-2019	
	18-19/Sep/2019	EDST, Liban
	Sujet	Evaluation of the quality of water in Litani River by testing the physicochemical parameters of water and comparing with WHO Standard

Journées Scientifiques	LEESURIALES 2018	
	20/Dec/2018	Creteil, France
	Sujet	Evaluation of the physicochemical Parameters of water in Litani River - Quaroun station

Journées Scientifiques	FORUM DOCTORAL EDST-2018	
	19/Sep/2018	EDST, Liban
	Sujet	L' impact du changement climatique sur le cycle hydrologique

Journées Scientifiques	FORUM DOCTORAL EDST-2017	
	18/Sep/2017	EDST, Liban
	Sujet	Présentation de sujet + objectives de thèse et le plan de travail

ANNEXE VI : Les Points noirs de la pollution (Nord Litani + Lac Qaraoun)

