

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار- عنابة

ANNEE 2015

Faculté des Sciences de la Terre
Département de Géologie

MÉMOIRE DE MAGISTER

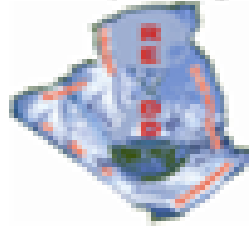
Option: Hydrogéologie

THÈME

**Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre
irrigué dans le bassin du Saf-Saf Skikda
(Nord-Est Algérien)**

Réalisé par

ALLOUCHE Meriem



Directeur de Mémoire : Pr. HANI. A

Président du Jury : Pr. DJABRI. L

Examineurs: Pr. CHAFFAI. H

Dr. B. SAAIDIA

U.B.M- Annaba

U.B.M- Annaba

U.B.M- Annaba

U.B.M- Annaba

Remerciement

A mon Dieu Le Clément et Le Miséricordieux, le grand merci Lui revient de nous avoir à élaborer ce mémoire de dissertation scientifique.

La réalisation de ce travail n'aurait pu être menée à terme sans le support constant de mon encadreur de mémoire Pr HANI Azzedine, je désire lui adresser un merci tout particulier, ses précieux commentaires, et ses conseils pertinents m'ont grandement aidé tout au long des différentes étapes inhérentes au processus de recherche et à l'élaboration de ce mémoire.

Merci à Mr DJABRI Larbi, professeur à l'université Badji Mokhtar Annaba, mon directeur de magister d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Je voudrais également remercier les membres de jury Pr. CHAFFAI H et Dr. SAAIDIA B, pour avoir bien voulu lire, commenter, et débattre mon mémoire.

Je tiens aussi à remercier Mr BELOULOU Laroussi, Mr MAHIA Mohamed ; Mr BOUGHRIRA Nabil et Mr SAYAD Lamine de m'avoir toujours encouragé.

Je voudrais remercier infiniment le staff (ONID) l'Office National d'irrigation et de drainage d'El-Harrouch ; Mr le directeur, Mr..... ?Messaoud, Wehheb, Salah, Fatima, Dounia.

Je remercie tous les gens qui m'ont aidé à réaliser ce travail, ((ONEDD) station de surveillance de Skikda, (DE) Direction d'Environnement, (DSA) Direction de l'Agriculture de Skikda,(ANRH)L'Agence Nationale des Ressources Hydriques Constantine,(DRH) la Direction des Ressources Hydriques Skikda) auxquelles je dois avec plaisir, présenter mes remerciements.

Je remercie toute personne, qui de près ou de loin ayant généreusement contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Je voudrais remercier encore mes enseignants du département de Géologie de l'université d'Annaba, et mes collègues de la promotion de Poste Graduation hydrogéologie 2013.

Si par mégarde, j'ai oublié quelqu'un, qu'il me pardonne et qu'il soit remercié pour tous.

ALLOUCHE Meriem

DEDICACES

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères dans ma vie, mes parents à qui je ne pourrais jamais les remercier assez, pour leur soutien moral et matériel, leur compréhension, leur tendresse, leurs amours et leurs sacrifices :

Ma très chère mère : Malika; et ma grande mère ;

Mon père : Ali;

A ma tante Ouarda : Je désire lui adresser un dédicace tout particulier, ses précieux conseils pertinents m'ont grandement aidé tout au long des différentes étapes inhérentes au processus de toute ma vie sociale et intellectuelle.

A mes frères : Ilyes, Rezk Allah, Mohamed El Fatah ;

A mes sœurs : Sana, Sabrina, Razika, Rachda; ma tante Dalila.

A ma nièce : Rihab.

A mes neveux : Mohamed Amin, Anis Abd Ehay, Wacim, Mazen Abd Ilah.

Mes cousines : Ahlem, Lamia, Karima.

A mes amies: Ghadir, Wafa, Zahira, Asma et sa fille, Hiba et son fils, Abir, et Amel.

A mes amis : Fatah, Bilel.

A tous les gens qui j'aime et qui m'aiment

ALLOUCHE Meriem

Table des matières

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Résumé..... *i*
Abstract..... *ii*
ملخص.....*iii*
Sommaire.....*v*
Liste des figures.....*vi*
Liste des tableaux.....*vii*

Résumé

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Les pressions accrues sur les ressources en eau liées aux changements climatiques et d'usages de l'eau ainsi que les compétitions grandissantes entre usagers sont reconnues comme des enjeux mondiaux. La gestion des ressources en eau est l'un des grands soucis et défis relevés par les pays du monde, et surtout la région méditerranéenne. Atteindre à une gestion durable des ressources en eau est un objectif global commun dans cette région.

La gestion durable des ressources en eau dans le bassin versant de Saf-Saf est tenue comme une étude de cas d'un problème complexe qui nécessite une nouvelle approche de la gestion durable des ressources en eau. Afin de gérer cette ressource il faut trouver un équilibre entre les besoins des personnes et la protection des ressources naturelles. Ses ressources en eau sont renouvelables mais limitées, or les besoins ne cessent à croître en importance sous le double effet de la croissance démographique et de l'augmentation des besoins par habitant. Ainsi, les milieux sont de plus en plus transformés par l'homme ce qui présente de nombreuses incidences sur l'eau, en quantité comme en qualité.

Le nouveau modèle conceptuel de gestion intégrée de l'eau est proposé dans pour la gestion de l'eau sur la base de la relation de cause-effet.

Ce travail a porté le but de savoir comment établir les relations prévisibles à utiliser comme outils d'aide à la décision. Le (DPSIR) a été choisi comme un cadre bien établi pour développer les variables possibles en cinq catégories qui sont : les variables forces motrices, les variables de pression, variables de la qualité de l'eau, les variables d'impact et les variables réponse.

Les variables efficaces ont été caractérisées et arrangées en utilisant une analyse multicritères avec les réseaux de neurones artificiels (ANN) et les avis des experts. Les variables retenues ont été classées et organisées en utilisant les techniques exploratoires multivariées (ACP et AF).

Mots Clés : GIRE ; bassin versant du Saf-Saf ; ressources en eau ; variable ; modèle DPSIR ; ANN; les avis des experts ; techniques exploratoires multivariées (ACP, AF).

Abstract

The model DIPSIR of management the irrigate perimeter in the Saf-Saf watershed (North-Est Algerian)

***The model DPSIR of management the irrigate perimeter in the
Saf-Saf watershed (North-Est Algerian)***

Increasing water resources due to the climate change and water use as well as growing competition between users are widely recognized as global issues.

Water resources management is one of the major concerns and challenges for each country worldwide, especially for the Mediterranean region. Achieving a sustainable management of water resources is a common objective in this area.

Sustainable water resources management in the Saf-Saf watershed, taken as case study, is a complex problem that requires a new approach to sustainable water resources management. In order to manage this resource, it is to find a balance between people needs and the protection of natural resource. These water resources are renewable and limited; however, the water needs continue to grow up due to increasing population and per capita needs. Thus, the natural media are increasingly by man impact on water quantity and quality.

The new conceptual model of integrated water management is proposed for water management based on the relation of cause and effect. The purpose of this work is to know how to establish predictable relationships to be used as decision support tools. The DPSIR model has been chosen as a well-established framework to develop the possible variables into five categories which are: the driving forces variables, pressure variables, impact variables and response variable.

Effective variables have been characterized and arranged using a multi-criteria analysis with artificial neural networks (ANN) and expert opinions. The retained variables were classified and organized using multivariate exploratory techniques (APC, AF).

Keywords : IWRW, Saf-Saf watershed, water resource, variable, model DPSIR, expert opinions, multivariate exploratory techniques.

ملخص

النموذج DPSIR لتسيير محيط للري في حوض
الصفصاف الشمال-الشرقي الجزائري

النموذج DPSIR لتسيير محيط للري في حوض الصفصاف (الشمال-الشرقي الجزائري)

تنامي الضغط على الموارد المائية المترتبة على التغيرات المناخية و استعمالات المياه المختلفة، إضافة التنافس المستمر بين جميع المستخدمين يعد ذلك من اكبر الرهانات و القضايا على المستوى العالمي .

التسيير الفعال و الدائم للموارد المائية يعتبر من الانشغالات التحديات المسطرة من طرف دول العالم خاصة دول البحر الابيض المتوسط.

التوصل الى التسيير الدائم للموارد المائية هو الهدف المشترك المطلق في المنطقة و قد اخدت مشكلة التسيير في حوض الصفصاف كحالة لدراستها في هذا العمل نظرا لتعقيدها و التي تتطلب اتخاذ نهج جديد،اذ ينبغي ان تستند على البيانات العلمية للتحسين و المحافظة على هذه الموارد المحدودة و لكن متجددة.

في نهاية تسيير هذه الموارد يجب ايجاد توازن بين متطلبات الاشخاص و حماية الموارد، و في هذا العمل هدفنا تحقيق نموذج جديد(DPSIR) للتسيير المتكامل و الدائم للمياه يعتمد على العلاقة بين السبب و النتيجة، بالإضافة الى كيفية إقامة علاقة يمكن التنبؤ بها كأدوات لاتخاذ القرار.

و لقد اخترنا نموذج لتطوير المتغيرات المحتملة في خمس فئات هي: متغيرات القوى المحركة، متغيرات ضغط، متغيرات الحالة البيئة للماء، متغيرات على البيئة، و متغيرات الاستجابة. و لتمييز الفعالة منها و تصنيفها استخدمنا التحليل المتعدد المعايير مع الشبكات العصبية الاصطناعية(ANN) و رأي الخبراء، و تم تصنيفها و تنظيمها باستخدام تقنيات استكشافية (ACP et AF).

كلمات مفتاحية:

نموذج DPSIR ; الشبكات العصبية الاصطناعية (ACP, AF); الموارد المائية؛ معايير ؛ تقنيات استكشافية (ANN) التسيير الدائم للموارد المائية GIRE،حوض الصفصاف ، رأي الخبراء.

Sommaire

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Introduction générale.....	01
-----------------------------------	-----------

Chapitre 1 : Généralité

Introduction.....	05
1.1 Provenance de l'eau d'irrigation.....	05
1.2 L'irrigation dans le monde.....	06
1.3 Importance de l'irrigation.....	06
1.3.1 Les avantages.....	07
1.3.1.1 Apport sur le plan économique.....	07
1.3.1.2 La satisfaction.....	08
1.3.1.3 L'irrigation un rempart à la famine	08
1.3.2 Les inconvénients.....	09
1.3.3 La qualité de l'eau d'irrigation.....	11
1.4 Les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation.....	14
1.5 L'irrigation en Algérie.....	15
1 Des grands périmètres irrigués (GPI).....	15
2 De la « Petite et Moyenne Hydraulique »	16
1.6 Résultat à l'horizon 2015.....	17
1.6.1 L'irrigation dans la wilaya de Skikda.....	17
1. Grande hydraulique	18
2. Petite et moyenne hydraulique.....	19
1.6.2 Mise en œuvre du programme d'économie de l'eau agricole (2010-2014).....	19
1.6.2.1. Valorisation du potentiel existant (GPI).....	19
1.7 Evaluation des superficies irriguées 2010-2014 de la wilaya de Skikda.....	21
1.8 Les risques de pollution liés à l'agriculture.....	24
Conclusion.....	26

Chapitre 2 : Présentation de la zone d'étude

Introduction.....	28
2.1 Géomorphologie générale et chevelu hydrographique du bassin du Saf-Saf.....	30
2.1.1. Ensembles morpho-structuraux du bassin.....	30
2.1.2. Chevelu hydrographique.....	31

2.1.3	Forme du bassin.....	31
2.1.3.1	Dimensions du rectangle équivalent.....	32
2.1.3.2	Répartition des tranches d'altitudes et la courbe hypsométrique.....	32
2.2.	Aperçu socio-économique.....	35
2.2.1.	Contexte démographique et administratif du bassin du Saf-Saf.....	35
2.2.2.	Contexte industriel.....	36
2.2.3.	Contexte agricole.....	37
2.3	La géologie de la zone d'étude.....	39
2.3.1.	Cadre géologique régional.....	39
2.3.1.1.	Domaine interne.....	40
2.3.1.1.1.	Socle kabyle (Paléozoïque).....	40
2.3.1.1.2.	Chaîne calcaire ou la dorsale kabyle.....	41
a)	Chaîne calcaire interne.....	41
b)	Chaîne calcaire médiane.....	41
b)	chaîne calcaire externe.....	41
2.3.1.2.	Domaine des flyschs.....	42
a)	Flysch Mauritanien.....	42
b)	Flysch Massilien.....	42
c)	Flysch Numidien (Oligocène moyen- Burdugalien).....	42
2.3.1.3.	Domaine externe.....	43
a)	Séries ultra telliennes.....	43
b)	Séries telliennes.....	43
c)	Séries péni telliennes.....	43
2.3.1.4.	Néritique constantinois.....	43
2.3.2.	Classification des formations géologiques selon leurs intérêts hydrogéologiques..	48
2.3.2.1.	Formations favorables au développement d'aquifères.....	48
2.3.2.1.1.	Formations favorables au développement d'aquifères poreux.....	48
a)	Formations du Quaternaires.....	48
1.	Alluvions.....	48
2.	Dunes anciennes.....	48
2.3.2.1.2.	Formations favorables au développement d'aquifères Karstiques.....	49
2.3.2.2.	Formations non favorables au développement d'aquifères.....	50
2.3 .3.	Tectonique du bassin.....	53

2.3.4. Paléogéographie du bassin.....	53
2.3.4.1. Longue période de sédimentation du Secondaire au Tertiaire.....	53
2.3.4.2 Mise en place des volumes montagneux de la fin du Tertiaire.....	54
2.3.4.3 Quaternaire.....	55
2.4 Contexte hydroclimatologique.....	59
2.4 .1 Equipement hydro-pluviométrique du bassin.....	59
2.4.1.1 Précipitations du barrage Zerdézas.....	61
2.4.1.2 Précipitations du barrage Guenitra.....	61
2.4.1.3 Précipitations de la station Ramdane Djemel.....	62
2.4.2 Température.....	63
2.4.3 Les vents.....	64
2.4.4 L'humidité.....	65
2.5 Présentation du Périmètre.....	66
2.5.1 Situation géographique.....	66
2.5.2 Répartition du périmètre.....	66
2.5.3 Ressource et besoins en eau du périmètre.....	68
2.5.4 Présentation physique du périmètre Saf-Saf.....	68
2.5.5 Canalisation et Equipements du périmètre Saf-saf.....	69
2.5.6 Réservoirs et stations de pompages.....	69
2.5.7 Assolements pratiqués au niveau du périmètre.....	70
2.6 Exploitation du Périmètre Saf-saf.....	71
2.7 Objectif et impact sur le périmètre.....	72
2.8 L'évolution des superficies irriguées dans le périmètre du Saf-Saf.....	72
Conclusion.....	75

Chapitre 3 : Caractéristiques hydrogéologiques du bassin

Introduction.....	78
3.1 Horizons aquifères.....	78
3.1.1 L'aquifère poreux.....	78
3.1.2. L'aquifère Karstique.....	78
3.1.3. L'aquifère à système binaire.....	79
3.2. Profils hydrogéologiques.....	79
3.3 Inventaire des points d'eau.....	81

3.4. Etude de la piézométrie de l'aquifère superficiel.....	83
3.4.1. Limites et l'alimentation de l'aquifère superficiel.....	83
3.4.2. Piézométrie.....	83
3.5. Etude de la piézométrie de l'aquifère profond.....	85
3.5.1. Limites et alimentation de l'aquifère profond	85
3.5.2. Piézométrie.....	85
Conclusion.....	87

Chapitre 4 : Diagnostic de la potentialité hydrique dans bassin du Saf-Saf

Introduction.....	89
4.1. Diagnostic quantitatif des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf.....	89
4.1.1 Potentialités hydriques dans le bassin du Saf-Saf.....	89
4.1.1.1 Potentiel hydrique superficiel.....	89
4.1.1.2. Potentiel hydrique souterrain.....	96
4.1.2. Mobilisation des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf.....	97
4.1.2.1 Mobilisation des eaux de surface.....	99
4.1.2.2. Mobilisation des eaux souterraines.....	100
4.2 Affectation des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf.....	101
4.3 Alimentation en eau dans le bassin du Saf-Saf.....	101
Conclusion.....	103

Chapitre 5 : Chimie et qualité des eaux

Introduction.....	105
5.1 Chimie et qualité des eaux.....	106
5.1.1. Mesures in situ.....	106
• Paramètres physiques.....	106
a. Température.....	106
b. Potentiel d'Hydrogène (pH).....	106
c. Conductivité électrique.....	106
d. Salinité.....	107
e. Oxygène dissous.....	107
5.1.2. Analyses aux laboratoires.....	107
5.1.2.1. Eléments majeurs	107

a. Calcium (Ca^{2+}).....	107
b. Potassium (K^+).....	107
c. Sodium (Na^+).....	108
d. Magnésium (Mg^{+2}).....	108
e. Chlorures (Cl^-).....	108
g. Carbonates (CO_3^-).....	108
5.1.2.2 Métaux lourds et Nitrates.....	108
a. Fer (Fe^{2+}).....	108
b. Manganèse (Mn^{2+}).....	108
c. Nitrates (NO_3^-).....	109
5.1.2.3 Analyses physico-chimiques.....	109
a. Turbidité.....	109
b. Demande biologique et chimique en Oxygène (DBO_5 , DCO).....	109
c. Matières en suspension (MES).....	109
5.1.2.4. Analyses bactériologiques.....	109
a. Germes totaux.....	109
b. Coliformes totaux à 37 °C et fécaux à 44°C.....	109
c. Streptocoques fécaux 37°C.....	110
d. Clostridium sulfito-réducteurs 46°C.....	110
5.1.3. Représentation graphique des analyses chimiques.....	110
a) Le diagramme de Stabler.....	110
b) Diagramme de Schoëller-Berkaloff.....	111
c) Diagramme de Piper.....	112
d) Diagramme de Stiff.....	113
5.2. Qualité des eaux du barrage de Zerdézas.....	115
5.2.1. Représentation graphique des analyses chimiques.....	115
a) Le diagramme de Stabler.....	115
b) Diagramme de Schoëller-Berkaloff.....	116
c) Diagramme de Piper.....	117
d) Diagramme de Stiff.....	118
5.2.2 Aptitude des eaux à l'irrigation.....	119
5.2.2.1 Principe du diagramme.....	119
Conclusion.....	122

Chapitre 6 : Modélisation de la gestion intégrée des ressources en eau (Application du modèle DPSIR)

Introduction.....	125
6.1 Développement Durable et Durabilité de la Ressource en Eau.....	125
6.1.1 L'objectif de développement.....	126
6.1.2 Qu'est-ce que la « gestion intégrée des ressources en eau ?.....	128
6.2 Principes de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau.....	130
6.3 Développement et Validation des Indicateurs.....	132
6.3.1 Qu'appelle-t-on indicateur ?.....	133
6.3.2 Description du modèle de GIRE appliqué (DPSIR).....	134
6.3.2.1 Description analytique du modèle de GIRE appliqué (DPSIR).....	137
6.4 L'Application du Nouveau Modèle Conceptuel de la GIRE dans le périmètre d'irrigation de Saf-Saf.....	143
6.4.1 La Description des Variables (Indicateurs).....	144
6.4.1.1. La Mobilisation de la Ressource en Eau (MRE).....	144
6.4.1.2 Le Total des Solides Dissous (TDS).....	144
6.4.1.3 Les variables forces motrices (Driving forces).....	144
6.4.1.4 Les variables de Pression.....	145
6.4.1.5 Les variables d'État de la qualité de l'eau des barrages (State).....	145
6.4.1.6 La Catégorie des variables d'Impact.....	148
6.4.1.7 La Catégorie des variables de Réponse.....	148
6.4 Les Statistiques Descriptives des Variables Dépendantes et Indépendantes.....	149
6.5.1 Les Variables Dépendantes, la MRE et le TDS.....	149
6.5.2 Les Variables indépendantes de la force motrice (Driving force).....	151
6.5.3 Les Variables indépendantes de Pression.....	152
6.5.4 Les Variables indépendantes de l'État (State) de la qualité des eaux de surface.....	153
6.5.5 Les Variables indépendantes d'Impact.....	154
6.5.6 Les Variables indépendantes de Réponse.....	154
6.6 Les Outils et le Plan d'Analyse.....	155
6.6.1 Le Plan d'Analyse.....	155
6.6.2 Les étapes de l'analyse	156
6.6.3 Les Outils d'Analyse.....	157
6.6.3.1 Les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN).....	157

6.6.3.2 Le Logiciel.....	176
6.6.3.3 Les Matrices de Corrélation.....	177
6.6.3.4 Les Techniques d'Exploration Multivariée.....	178
6.6.3.4.1 L'Analyse en Composantes Principales (ACP).....	178
6.6.3.4.2 L'Analyse Factorielle (AF).....	178
Conclusion.....	180

Chapitre 7 : Synthèse des analyses

Introduction.....	182
7.1 L'Analyse par les RNA et la Comparaison avec les Avis des Experts.....	182
7.1.1 Les variables de la force motrice (Driving force).....	182
7.1.2 Les variables de Pression.....	186
7.1.3 Les variables de l'État de la Qualité de l'Eau (State).....	190
7.1.4 Les variables d'Impact.....	193
7.1.5 Les variables de Réponse.....	196
7.2 Les Matrices de Corrélation.....	200
7.2.1 Les variables de la force motrice (Driving force).....	200
7.2.2 Les variables de Pression.....	203
7.2.3 Les variables de l'État de la Qualité de l'Eau (State).....	203
7.2.4 Les variables d'Impact.....	205
7.2.5 Les variables de Réponse.....	205
7.3 L'Analyse en Composantes Principales (ACP).....	206
7.3.1 Les variables de la force motrice (Driving force).....	206
7.3.2 Les variables de Pression.....	208
7.3.3 Les variables de l'État de la Qualité de l'Eau (State).....	211
7.3.4 Les variables d'Impact.....	213
7.3.5 Les variables de Réponse.....	215
7.4 L'Analyse des Facteurs (AF).....	216
7.4.1 Les variables de la force motrice (Driving force).....	217
7.4.2 Les variables de Pression.....	219
7.4.3 Les variables de l'État de la Qualité de l'Eau (State).....	220
7.4.4 Les variables d'Impact.....	221
7.4.5 Les variables de Réponse.....	223

Conclusion et remarque.....225
Conclusion générale et recommandation.....227

Liste des figures

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Fig n°1.1 : Courbe d'évolution de la superficie irrigable dans la wilaya de Skikda durant (2010-2014).....	22
Fig n°1.2 : Carte d'identification des zones céréalières potentiellement irrigables dans la wilaya de Skikda.....	23
Fig n°1.3 : Photographie d'une terre céréalicultures.....	24
Fig n° 2.1 : Carte de Situation Géographique du Bassin Versant de l'Oued Saf-Saf.....	28
Fig n°2.2: Site du bassin versant du Saf-Saf.....	30
Fig n° 2.3 : Carte de la situation géographique du bassin versant Constantinoise.....	34
Fig n° 2.4 : Carte de la situation géographique du bassin versant de Saf-Saf.....	38
Fig n° 2.5: Schéma structurale des Maghrebides.....	40
Fig n° 2.6 : Ensembles morphi structuraux et bassins hydrologiques de l'Est Algérien.....	45
Fig n°2.7 : Colonnes Stratigraphiques Synthétiques des séries du flysch Mauretarien et Flysch Massylien.....	46
Fig n° 2.8 : Colonnes Stratigraphiques Synthétiques de la Chaîne Calcaire.....	47
Fig n° 2.9 : Coupe Géologique Schématique (WSW-ENE).....	52
Fig n° 2.10 : Carte lithologique du bassin versant du Saf-Saf.....	56
Fig n° 2.11 : Carte géologique de la région d'étude d'après la carte géologique de l'extrême Nord-Est Algérien.....	58
Fig n° 2.12 : Carte du réseau d'observation pluviométrique dans le bassin du Saf-Saf.....	60
Fig n° 2.13 : Variations des précipitations annuelles entre 1970 et 2013 dans la région du barrage Zerdézas.....	61
Fig n° 2.14 : Variations des précipitations annuelles entre 1970 et 2013 dans la région du barrage Guenitra.....	62
Fig n° 2.15 : Variations des précipitations annuelles entre 1970 et 2013 dans la région du la station Ramdane Djamel.....	62
Tab n° 2.16 : Histogrammes des variations des températures moyennes mensuelles de la station de Skikda.....	63
Tab n° 2.17 : Histogrammes des variations des températures moyennes mensuelles de la station de Zerdézas.....	63
Tab n° 2.18 : Histogrammes des variations des températures moyennes mensuelles de la station de Guenitra.....	64

Fig n° 2.19: Schéma directeur de distribution de l'eau dans le périmètre.....	67
Fig n° 2.20 : Courbe d'évolution de la superficie irriguée dans le périmètre de Saf-Saf.....	73
Fig n° 2.21 : Schéma synoptique et principe de distribution hydraulique du périmètre Saf-Saf Skikda.....	74
Fig n° 3.1: Profil hydrogéologique schématique de la nappe alluviale du bassin Saf-Saf NW-SE.....	81
Fig n° 3.2 : Profil hydrogéologique schématique de la nappe alluvial du bassin Saf-Saf SW-NE.....	82
Fig n° 3.3 : la carte des forages et puits dans le bassin de Saf-Saf.....	83
Fig n° 3.4 : Carte piézométrique de la nappe superficielle de la plaine du Saf-Saf.....	84
Fig n° 3.5 : Carte piézométrique de la nappe profonde de la plaine du Saf-Saf.....	87
Fig n°4.1 : Carte hydrographique indiquée la localisation des barrages (Guenitra, et Zerdézas).....	92
Fig n° 4.2 : Photographie montrant une vue générale du barrage Zerdézas en période de dévasement.....	93
Fig n°4.3: Photographie du barrage Guenitra.....	95
Fig n°4.4: Répartition du potentiel hydrique dans le bassin du Saf-Saf.....	99
Fig n°4.5: Répartition des ressources mobilisées dans le bassin du Saf-Saf.....	100
Fig n°4.6 : Taux de mobilisation des ressources en eau de surface.....	101
Fig n° 4.7 : Taux de mobilisation des ressources en eaux souterraines dans le bassin.....	101
Fig n° 4.8 : Affectation des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf.....	102
Fig n° 5.1: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de surface en amont du bassin sur le diagramme de Stabler (2012-2013).....	112
Fig n° 5.2: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de surface en amont du bassin sur le diagramme de Schöoller-Berkaloff (2012-2013).....	113
Fig n°5.3: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de surface en amont du bassin sur le diagramme de Piper (2012-2013).....	114
Fig n°5.4 : Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de surface en amont du bassin sur le diagramme de Stiff (2012-2013).....	115
Fig n°5.5: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux du barrage de Zerdézas sur le diagramme de Stabler (2000-2013).....	117
Fig n° 5.6: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux du barrage de Zerdézas (2000-2013) sur le diagramme de Schöoller- Berkaloff.....	118

Fig n°5.7: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux du barrage de Zerdézas (2000-2013) sur le diagramme de Piper.....	119
Fig n° 5.8: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux du barrage de Zerdézas (2000-2013) sur le diagramme de Stiff.....	120
Fig n°5.9: Représentation graphique des eaux du barrage de Zerdézas sur le diagramme de Wilcox (2000-2013).....	122
Fig n° 6.1: Les trois piliers du développement durable.....	126
Fig n°6.2 : Étapes de la planification et la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau.....	127
Fig n° 6.3 : Le modèle DPSIR pour développer les indicateurs.....	135
Fig n°6.4: Les indicateurs de pression environnementale.....	137
Fig n°6.5 : Pyramide de démarche de la GIRE.....	139
Fig n°6.6 : Le diagramme des catégories du modèle conceptuel du DPSIR.....	140
Fig n° 6.7: Le cycle de vie dans le cadre de la gestion des ressources en eau.....	143
Fig n° 6.8.a: la boîte a Tukey pour le TDS.....	150
Fig n° 6.8.b: la boîte à Tukey pour la MRE.....	150
Fig n°6.9.a: Histogramme pour le TDS.....	151
Fig n° 6.9.b: Histogramme pour la MRE.....	151
Fig n° 6.10: Les Étapes de l'Analyse des Données.....	157
Fig n° 6.11: Modèle du neurone biologique.....	159
Fig n° 6.12: Modélisation du neurone artificiel.....	162
Fig n°6.13: Graphe de la fonction de Heaviside.....	163
Fig n°6.14 : Graphe de la fonction Sigmoidé.....	163
Fig n°6.15 : La fonction XOR n'est pas linéairement séparable.....	166
Fig n°6. 16: Modélisation du perceptron multicouche.....	173
Fig n°7.1: Le réseau MLP à trois couches pour les variables de la catégorie D.....	185
Fig n°7.2 : La MRE observée en fonction de la MRE simulée.....	186
Fig n°7.3: Le réseau MLP à trois couches pour les variables de Pression.....	189
Fig n° 7.4 : Le TDS observé en fonction du TDS simulé.....	190
Fig n°7.5 : Le réseau MLP à trois couches pour les variables de la qualité de l'eau (S).....	192
Fig n°7.6: Le TDS observé en fonction du TDS simulé.....	194
Fig n° 7.7 : Le réseau MLP à trois couches pour les variables d'Impact (I).....	196
Fig n° 7.8: Le TDS observé en fonction du TDS simulé.....	197

Fig n°7.9: Le réseau MLP à trois couches pour les variables de la catégorie R.....	199
Fig n° 7.10: La MRE observée en fonction de la MRE simulée.....	200
Fig n° 7.11 Histogramme de l'Occupation du Sol.....	201
Fig n°7.12 : Histogramme log Occupation du Sol.....	201
Fig n°7.13a, b: La projection des variables D sur les plans factoriels, a (1x2) et b (1x3).....	208
Fig n° 7.14a, b: La projection des municipalités sur les plans factoriels, a (1x2) et b (1x3).	209
Fig n° 7.15a, b: La projection des variables P sur les plans factoriels.....	211
Fig n° 7.16a, b : La projection des municipalités sur les plans factoriels.....	212
Fig n° 7.17 : La projection des variables S.....	214
Fig n°7.18: La projection des municipalités sur le plan factoriel 1x2.....	214
Fig n°7.19 : La projection des variables I sur le plan factoriel 1x2.....	215
Fig n°7.20 : La projection des municipalités sur le plan factoriel 1x2.....	215
Fig n°7.21: La projection des variables R pf 1x3.....	217
Fig n°7.22: La projection des municipalités sur le plan factoriel 1x3.....	217
Fig n°7.23 : Projection des poids factoriels des variables D (Varimax normalisé).....	219
Fig n°7.24: Projection des poids factoriels des variables P (Varimax normalisé).....	221
Fig n°7.25: Projection des poids factoriels des variables I (Varimax normalisé).....	223
Fig n° 7.26: Projection des poids factoriels des variables R (Varimax normalisé).....	224

Liste des tableaux

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Tab n°1.1 : Barème de qualité pour l'eau d'irrigation.....	11
Tab n°1.2 : Superficies des GPI équipées, irrigables et irriguées par grande région.....	15
Tab n°1.3 : Répartition territoriale des superficies de PMH selon le mode d'irrigation.....	16
Tab n°1.4 : Evolution des surfaces irriguées de 2000 à 2008.....	17
Tab n°1.5 : les quatre barrages qui ont des volumes d'eau destiné à l'irrigation.....	18
Tab n°1.6 : Les barrages qui sont en cours de projets destiné pour appuyer l'irrigation.....	19
Tab n°1.7 : Evaluation des superficies irriguées 2010-2014 de la wilaya de Skikda.....	21
Tab n°1.8 : La répartition des cultures dans la SAU.....	22
Tab n°1.9 : la quantité des pesticides et engrais délivré par le DSA pour l'année 2014.....	26
Tab n°2.1 : Répartition des superficies en fonction des tranches d'altitude dans le bassin versant du Saf-Saf.....	33
Tab n° 2.2 : Le nombre de population, superficie et densité dans les communes de bassin Saf-Saf.....	35
Tab n°2.3 : Le tableau suivant présente les différentes stations fonctionnelles dans le bassin du Saf-Saf.....	59
Tab n°2.4 : Vitesse moyenne des vents à la station de Skikda (1970/71- 2011/12).....	64
Tab n°2.5 : Moyennes mensuelles de l'humidité relative (1970/71 – 2011/13).....	65
Tab n°2.6 : Les différents secteurs du périmètre Saf-Saf.....	66
Tab n°2.7 : L'alimentation des secteurs du périmètre.....	68
Tab n°2.8 : Canalisation et équipements du périmètre Saf-Saf.....	69
Tab n°2.9 : Réservoirs et leurs capacités du périmètre Saf-Saf.....	70
Tab n°2.10 : les gestionnaires des stations de pompage du périmètre Saf-Saf.....	70
Tab n°2.11 : La pratique des assolements A, B et C et des arbres fruitiers par secteur.....	70
Tab n°2.12 : L'évolution des superficies irrigués dans le périmètre de Saf-Saf.....	72
Tab n° 4.1 : Fiche technique du barrage Zerdézas.....	93
Tab n° 4.2 : Fiche technique du barrage Guenitra.....	94
Tab n° 4.3 : Les différentes retenues collinaires dans le bassin versant du Saf-Saf.....	95
Tab n°4.4 : Potentiel hydrique global dans le bassin du Saf-Saf.....	98
Tab n° 4.5 : Répartition des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf.....	99
Tab n°5.1 : Représentation des formules ioniques et les faciès chimiques.....	111
Tab n°5.2 : Représentation des formules ioniques et les faciès chimiques.....	116
Tab n°5.3 : Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation (méthode du SAR) du barrage de Zerdézas (2000-2013).....	121

Tab n°6.1 : Données de l'index proposé pour l'agriculture.....	144
Tab n°6.2 : Les normes des Nitrate recommandées par OMS 1994.....	146
Tab n°6.3 : Les normes des Phosphates recommandées par OMS 1994.....	146
Tab n°6.4 : Les normes des Ammoniums recommandées par OMS 1994.....	146
Tab n° 6.5 : Les normes d'oxygène dissous recommandées par OMS 1994.....	147
Tab n°6.6 : Les statistiques descriptives des variables dépendantes, la MRE et le TDS....	150
Tab n°6.7 : Les statistiques descriptives des variables Force motrice (D).....	152
Tab n°6.8 : Les statistiques descriptives des variables de Pression (P).....	154
Tab n°6.9 : Mes statistiques des variables de l'état (S) de la qualité des eaux de surface...	154
Tab n° 6.10 : Les statistiques descriptives des variables de d'Impact (I).....	154
Tab n°6.11 : Les statistiques descriptives des variables de Réponse (R).....	155
Tab n°7.1 : La SOSE pour les divers ANN des variables D.....	184
Tab n° 7.2 : Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (MRE).....	184
Tab n°7.3 : L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables D.....	186
Tab n° 7.4 : Classement des variables de la force motrice D via les avis des experts.....	187
Tab n° 7.5 : La SOSE pour les divers ANN des variables P.....	188
Tab n° 7.6 : Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (TDS).....	188
Tab n° 7.7 : L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables P.....	189
Tab n° 7.8 : Classement des variables Entrées de Pression via les avis des experts.....	190
Tab n° 7.9 : La SOSE pour les divers ANN des variables S.....	191
Tab n° 7.10 : Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (TDS) pour la catégorie S.....	191
Tab n° 7.11 : L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables S.....	193
Tab n°7.12 : Classement des variables Entrées de la catégorie S via les avis des experts..	193
Tab n°7.13 : La SOSE pour les divers ANN des variables d'Impact.....	195
Tab n° 7.14 : Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (MRE) pour la catégorie I.....	195
Tab n° 7.15 : L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables I.....	196
Tab n°7.16 : Classement des variables Entrées de la catégorie I via les avis des experts....	197
Tab n°7.17 : La SOSE pour les divers ANN des variables de Réponse.....	198
Tab n°7.18 : Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (MRE).....	198
Tab n° 7.19 : L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables R.....	199

Tab n°7.20 : Classement des variables Entrées de la catégorie R via les avis des experts...	200
Tab n°7.21: La matrice de corrélation pour les variables forces motrices.	203
Tab n°7.22 : La matrice de corrélation pour les variables de Pression.....	204
Tab n° 7.23: La matrice de corrélation pour les variables de la qualité de l'eau.....	205
Tab n° 7.24 : La matrice de corrélation pour les variables d'Impact.....	206
Tab n°7.25: La matrice de corrélation pour les variables de Réponse.....	206
Tab n° 7.26 : Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie D).....	207
Tab n° 7.27: Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie P).....	210
Tab n°7.28 : Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie S).....	213
Tab n° 7.29: Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie I).....	214
Tab n°7.30: Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie R).....	216
Tab n°7.31: Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie D).....	218
Tab n°7.32: Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie P).....	220
Tab n°7.33 : Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie S).....	222
Tab n° 7.34: Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie I).....	222
Tab n°7.35 : Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie R).....	224

Introduction générale

*Le modèle DPSIR pour la gestion d'un
périmètre irrigué dans le bassin versant
du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)*

L'eau source de vie est le fondement essentiel de tout développement durable. La mobilisation de l'eau, enjeu particulier de ce troisième Millénaire et son utilisation rationnelle dans l'agriculture sont indispensables pour assurer à notre pays une sécurité alimentaire raisonnable grâce au développement de l'irrigation particulièrement dans les Grands Périmètres Irrigués (GPI) pour lesquels la ressource est généralement garantie à partir des ouvrages pluriannuels revêtant un caractère stratégique.

L'atteinte progressive des objectifs arrêtés sur une vingtaine d'années pour un développement harmonieux de l'irrigation suppose un rythme de livraison moyen de 30.000 ha/an, toutes irrigations confondues (GPI: Grand Périmètre Irrigué, PMH: Petite et Moyenne Hydraulique, SUD).

L'Algérie, tout comme la plupart des pays en voie de développement, subventionne considérablement l'irrigation dans les périmètres publics. Les droits et les redevances payés par les agriculteurs ne permettent pas de couvrir la totalité des coûts de distribution et de maintenance des réseaux collectifs.

Selon le rapport du METAP (Mediterranean Environment Technical Assistance Program 2001), l'irrigation en Algérie a beaucoup perdu en proportion d'allocation par rapport à la consommation totale depuis les années 1960 au profit des autres secteurs et ce à Ferrah et Yahiaoui (2004), cause des orientations économiques du pays tourné plutôt vers l'industrie et l'énergie délaissant l'agriculture au troisième rang, mais aussi à cause de la croissance démographique urbaine qui accroît de plus en plus les besoins en eau potable.

La gestion de l'eau agricole et potable se fonde essentiellement sur l'offre, or la demande est amplement plus importante en raison de la population grandissante des villes comme Alger, et d'une faible tarification qui n'encourage pas les consommateurs à l'économie de l'eau.

L'Algérie est classée parmi les pays les plus défavorisés en termes de potentialités hydriques. En effet, actuellement le seuil théorique de rareté fixé par la banque mondiale à 1 000 m³/habitant/an est loin d'être atteint avec une disponibilité moyenne de 500m³/habitant/an (Loucif, 2002).

Le recours aux nappes souterraines devient de plus en plus indispensable estimant le nombre de forages illicites dans le pays à 20 000 (un chiffre qui ne cesse d'augmenter).

Dans le cadre du PNDA (Plan National pour le Développement Agricole) lancé en 2002, l'Etat algérien a mis en place une nouvelle politique d'irrigation afin d'assurer une meilleure utilisation de l'eau. Cette nouvelle politique vise à encourager les techniques d'irrigation modernes afin d'économiser l'eau et d'étendre les superficies irriguées. Des subventions importantes (parfois à hauteur de 100 %) ont été accordées aux agriculteurs dans ce cadre (Imache, 2004).

La grande majorité des surfaces irriguées concerne la PMH (petite et moyenne hydraulique) avec une superficie moyenne annuelle de 300 000 ha (Agid, Agence nationale de réalisation et de gestion des infrastructures hydrauliques 2003) ; ce qui représente aujourd'hui environ 88 % du total des superficies irriguées du pays. Dans les grands périmètres irrigués qui représentent une superficie de 173 000 ha, seuls 40 000 ha ont été effectivement irrigués ces vingt dernières années (DSA, 2014).

La Problématique de ce travail :

Un recours sécurisant à l'eau souterraine qui est officiellement interdite pour l'irrigation (Journal officiel, n°30,1983), avec des coûts qu'ils doivent entièrement supporter. Cela empêche les agriculteurs d'avoir une vision d'exploitation à long terme en raison des conflits internes dans les exploitations agricoles collectives qui aboutissent à des scissions, des locations et des ventes officieuses de terres. Ensuite, un problème de conciliation, pour les agriculteurs, entre l'eau du réseau collectif desservie de manière irrégulière et incertaine. L'absence actuelle des stratégies efficaces dans la gestion des ressources en eau est devenue l'un des problèmes auxquels sont confrontés les bassins versants exoréiques en général et le bassin versant du Saf-Saf en particulier. En terme de potentialités hydriques, le bassin versant du Saf-Saf reçoit des précipitations moyennes annuelles de l'ordre de 700mm/an, c'est-à-dire le vrai problème de l'eau dans ce bassin n'est pas le manque de ressources, mais l'absence d'une politique de gestion intégrée de l'eau pour alléger les conditions tragiques actuels.

Les Objectifs du travail :

L'objectif de ce travail consiste à :

- *Définir et valider un nouveau modèle conceptuel de gestion intégrée des ressources en eau pour assister les gestionnaires des secteurs de l'eau;*

- *Caractériser les indicateurs effectifs de chaque catégories de gestion intégrée des ressources en eau, et définir spatialement les municipalités sous stress d'eau ;*
- *Etablir des relations par prévision entre la mobilisation des ressources en eau et la catégorie socioéconomique, la catégorie de pression, la catégorie de l'état de la qualité de l'eau, la catégorie de réponse et la catégorie d'impact;*
- *Classifier les municipalités en groupes associés avec les indicateurs de l'eau qui les distinguent, par l'analyse en composantes principales ACP et l'analyse des facteurs AF.*

Généralité

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Introduction :

L'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés pour en augmenter la production et permettre leur développement normal en cas de déficit d'eau induit par un déficit pluviométrique, un drainage excessif ou une baisse de nappe, en particulier dans les zones arides et semi-arides (El-Asslouj et al,2007).

1.1 Provenance de l'eau d'irrigation :

De tout temps, les sociétés humaines ont déployé des trésors d'imagination pour détourner de multiples manières l'eau nécessaire à leur culture et irriguer leurs champs.

Certaines méthodes se contentent de mobiliser les eaux de crues des rivières ou les eaux de pluie. Elles interviennent peu sur le cours des rivières et déplacent peu les eaux dans l'espace. Au bord de certains grands fleuves africains par exemple, les paysans cultivent les terrains susceptibles d'être légèrement inondés par les eaux grossies du fleuve à la saison des pluies, qu'ils ensemencent juste avant la montée des eaux. Très utilisée en Asie, mais également en Afrique, notamment pour la culture du riz, la construction de tout un réseau de petits canaux et de digues permet de récolter les eaux de crue des rivières, de les distribuer en contrôlant leur niveau dans chaque parcelle et de les y retenir. En Inde et au Brésil, se développe également l'usage de petites retenues d'eau, dites collinaires, édifiées en amont des vallées. Ces petits barrages en terre, de faible profondeur, récupèrent et stockent, pendant la saison des pluies, les eaux de ruissellement et les eaux de pluie, lesquelles peuvent ensuite être utilisées au profit des cultures. Cas des lacs de l'arborétum de Djebel El Ouahch (Constantine).

D'autres méthodes cependant consistent à pratiquer de véritables détournements d'eau. Le recours aux puits, notamment, permet de prélever toute l'année l'eau de certaines nappes souterraines, en d'autant plus grandes quantités que l'on sait aujourd'hui forer jusqu'à de grandes profondeurs et pomper l'eau mécaniquement.

Une autre pratique consiste à détourner l'eau des rivières, et à la transporter par canaux, parfois très loin de son lieu de prélèvement, jusqu'à des régions moins bien dotées où elle manque.

Enfin, une technique qui s'est beaucoup développée au cours du XXe siècle est la construction, sur le cours des rivières, d'immenses barrages capables de stocker

d'énormes réserves d'eau. De tels aménagements offrent un accès quasi permanent à l'eau (Ollier et Poirée, 1983). Mais, si elles permettent de bénéficier toute l'année de grandes quantités d'eau, de telles pratiques ne vont pas sans présenter des inconvénients. Ainsi, la multiplication de canaux et réservoirs en tout genre accroît-elle la perte d'eau par évaporation; en outre, les grands barrages modifient les régimes hydrauliques, la qualité des eaux et les équilibres de la flore et de la faune des cours d'eau sur lesquels ils sont établis.

1.2L'irrigation dans le monde :

La consommation d'eau agricole est très variable d'un pays à l'autre. Elle n'intéresse que 273 millions d'hectares dans le monde éparpillés très irrégulièrement sur tous les continents.

Contrairement à ce que l'on pourrait penser, les pays qui irriguent le plus ne sont pas les pays au climat aride ou semi-aride. Dans ces régions, en effet, il ne peut y avoir de culture sans irrigation. Aussi, toutes les surfaces cultivées sont-elles irriguées. Mais, comme il ne peut y avoir d'irrigation sans eau, les surfaces cultivées demeurent réduites en superficie, limitées par la faiblesse des ressources en eau, et localisées là où ces ressources sont disponibles. C'est le cas de pays comme l'Égypte par exemple où l'agriculture s'est développée sur les bords du Nil, ou de certains pays de l'Amérique latine comme le Mexique.

À l'inverse, dans les régions qui reçoivent suffisamment d'eau de pluie, la superficie des terres cultivées peut être très importante, surtout si le relief le permet. Bien que l'irrigation n'y soit pas indispensable, elle est néanmoins utilisée, et ce d'autant plus facilement que l'eau est disponible, afin de diversifier et d'améliorer les cultures, d'obtenir des récoltes multiples, ou encore d'augmenter les rendements. Même si elle n'est pas systématique, l'irrigation peut donc être conséquente. C'est ce qui se passe au Japon, en Chine, en Inde et au Pakistan (Milos, 1971).

Des facteurs autres que la situation géographique interviennent également, qui doivent être pris en compte pour expliquer la répartition mondiale de l'irrigation. Par exemple, l'irrigation nécessitant des infrastructures parfois très onéreuses, la richesse des pays considérés est un élément important. Il explique notamment qu'en Afrique ou au Brésil l'irrigation soit moins développée.

En conséquence, les pays qui irriguent le plus sont ceux situés dans le sud-ouest asiatique, lesquels rassemblent plus de 60 % des terres irriguées de la planète, et certains pays du pourtour méditerranéen, comme l'Italie ou la Grèce.

1.3 Importance de l'irrigation :

1.3.1 Les avantages:

Tant qu'on ne saura pas faire pleuvoir où et quand on veut, l'irrigation restera le seul moyen d'augmenter les rendements et de les régulariser dans bien des régions du monde. En effet, selon les espèces et variétés cultivées, selon les terres, et selon les techniques utilisées, l'irrigation peut permettre d'obtenir de deux à cinq fois plus (et même dix en zone aride) de production (Plauchu, 2003).

L'irrigation n'est pas uniquement un apport d'eau sur une terre cultivée en vue de compenser l'insuffisance des précipitations et de permettre le plein développement des cultures. Elle est considérée plutôt comme un ensemble d'actions de développement intégré des milieux agricole et rural qui doit se traduire non seulement par l'augmentation de la production et l'amélioration du niveau de vie de l'agriculteur, mais doit se traduire également par la préservation du milieu, notamment des terres agricoles, et par une économie de l'eau d'irrigation qui elle-même se traduit par une économie dans l'utilisation de l'énergie (électricité, fuel, etc).

1.3.1.1 Apport sur le plan économique :

Depuis les années 60 la pratique de l'irrigation est à l'origine d'une augmentation de la production alimentaire globale dans l'ensemble des pays du tiers monde (De Regt, 1990). Répondant ainsi à une demande de produits alimentaires qui a considérablement augmentée par suite de l'essor démographique qui s'est manifesté dans la plupart des pays en voie de développement où, dans certains, la population double tous les 25 ou 30 ans. L'irrigation n'a pas été seulement un atout dans l'augmentation de la production, elle a favorisé l'extension des surfaces agricoles mais également une diversification de produits plus large consommation que dans le passé. Cette évolution explique l'élévation du niveau de vie et les progrès de la diététique. Les changements dans les habitudes alimentaires ont souvent donné la préférence à des produits irrigués (légumes et fruits notamment). L'amélioration des conditions écologiques par l'intermédiaire de l'irrigation a permis à des régions ou à des pays en voie de développement de se spécialiser dans les productions pour lesquelles la demande était en augmentation.

1.3.1.2 La satisfaction :

Tous les pays cherchent à satisfaire la demande nationale, mais ceux qui le peuvent s'efforcent d'exporter leurs surplus agricoles ou la totalité de certaines productions qui ne trouvent pas ou peu de débouchés sur le marché national. Certaines cultures de plantations irriguées, souvent héritage d'une colonisation, donnent des produits qui doivent être nécessairement exportés, c'est le cas par exemple de l'Algérie ou le Maroc qui doivent trouver des clients pour leurs agrumes (Conac, 1978).

1.3.1.3 L'irrigation un rempart à la famine :

L'irrigation bien maîtrisée est un rempart utilisé de longue date pour endiguer la sous-alimentation et renforcer la sécurité alimentaire des sociétés, la preuve en est que:

- Le boom de la production agricole mondiale entre 1950 et 1990 doit beaucoup à l'irrigation (FAO, 1975). Entre ces deux années le rendement en céréales a plus que doublé et la récolte a presque triplé. Au début des années 50 on a étendu la surface cultivée, mais le boom, sans précédent historique, de la croissance des rendements et de la production est associé au doublement des surfaces irriguées, soutenue à partir des années 60 par la mise au point de nouvelles variétés de riz et de blé réagissant de manière optimale aux engrais et à l'eau (Tiercelin, 1998).

- La surface minuscule à l'échelle de la planète, fournit 55% des produits alimentaires de base, dont le riz et le blé. «...C'est l'irrigation qui a le plus contribué à l'accroissement de la production agricole enregistré dans une grande partie de l'Asie, de l'Afrique du Nord et du Moyen-Orient» (Maton, 2006).

En conclusion, nous pouvons dire que l'usage de l'irrigation présente de nombreux avantages.

- Il permet d'augmenter la superficie des surfaces cultivées, en particulier dans les zones arides, d'assurer parfois deux récoltes (ou plus) au lieu d'une seule dans l'année, notamment dans certaines zones tropicales humides, d'améliorer les rendements, et d'une façon générale d'intensifier et stabiliser la production en se libérant des variations climatiques.

Enfin, les techniques modernes d'irrigation permettent aussi dans le même temps de fertiliser les sols.

1.3.2 Les inconvénients :

L'irrigation présente deux inconvénients majeurs pour les milieux aquatiques. Elle est grande consommatrice d'eau et peut accélérer la désertification de certaines régions.

- L'agriculture irriguée rencontre de nos jours de nouveaux problèmes tels que le risque de salinisation qui peut être apprécié par la conductivité électrique (C_E) et celui de l'alcalinisation des sols. Cette dernière, due aux échanges ioniques, concerne surtout le sodium, le calcium et le magnésium, entre l'eau et les argiles du sol; il est évalué par le coefficient d'absorption du sodium (SAR).

- Mal conduite, elle peut être néfaste pour les sols. Lorsqu'ils sont trop secs, l'infiltration de l'eau se fait mal et si l'apport est trop important, une grande partie de l'eau stagne ou ruisselle le long des pentes. En s'évaporant, l'eau stagnante laisse en dépôt les sels qu'elle contient, favorisant une salinisation des sols qui deviennent progressivement incultes et doivent être abandonnés; c'est un phénomène que l'on observe surtout dans les régions arides et semi-arides.

- Quant au ruissellement de l'eau, il favorise l'érosion des sols, surtout lorsqu'ils sont secs. À l'inverse, des sols trop imbibés sont néfastes pour la plupart des végétaux dont ils asphyxient les racines. Les sols doivent donc être convenablement drainés afin de permettre à l'eau en excès de s'évacuer.

- L'irrigation est l'activité qui consomme le plus d'eau, elle absorbe plus de 85% de l'eau maîtrisée par l'homme (Horning, 1973, Plauchu, 2004). D'importantes quantités d'eau sont en effet nécessaires pour compenser les pertes des plantes et des sols par évapotranspiration. En outre une majeure partie de l'eau d'irrigation retourne directement dans l'atmosphère, où elle est momentanément perdue pour d'autres usages. Cela est d'autant plus vrai que plus une plante dispose d'eau, plus son évaporation n'est importante. Il existe cependant une limite à ce phénomène au-delà de laquelle un apport supplémentaire d'eau n'augmentera pas la transpiration végétale. Pour éviter d'utiliser trop d'eau, les quantités justes nécessaires aux cultures doivent donc être soigneusement estimées et l'irrigation contrôlée. Quoi qu'il en soit, pour irriguer les champs, il faut de l'eau et beaucoup d'eau, une eau que l'on doit parfois aller chercher très loin.

Au niveau mondial, les prélèvements en eau de l'irrigation représentent aujourd'hui environ 70 % des prélèvements totaux, ce qui est énorme (Plauchu, 2004).

À l'échelle locale, la consommation immodérée d'eau d'irrigation peut même parfois conduire à une réduction considérable des volumes disponibles. Ainsi, le lac Tchad, autrefois la plus grande réserve d'eau douce du continent africain, est aujourd'hui 20 fois plus petit qu'il n'était il y a 35 ans.

Les agriculteurs des pays limitrophes puisent en effet toujours plus d'eau pour irriguer leurs champs et lutter contre la sécheresse grandissante de cette région du globe. En outre, toute cette eau ne parvient pas aux plantes car les pertes sont importantes, surtout lorsqu'il s'agit de techniques d'irrigation traditionnelles. Or, celles-ci sont employées sur les deux tiers des surfaces irriguées du globe. Ces pertes sont dues soit à des fuites sur canalisations, soit à l'évaporation de l'eau qui stagne sur les sols. On estime qu'en Afrique, environ 40 à 60 % de l'eau d'irrigation est ainsi perdue.

Mal conduite, l'irrigation peut également avoir des conséquences dramatiques sur les sols, surtout dans les régions au climat sec et chaud où l'on irrigue toute l'année. En effet, si l'eau d'irrigation n'est pas drainée, elle stagne dans les champs, et s'évapore lentement, laissant en dépôt les sels dissous qu'elle contient. Cet excès de sels stérilise progressivement les terres qui doivent être abandonnées.

Le pompage abusif d'eau fluviale à des fins d'irrigation peut aussi progressivement conduire à l'assèchement des territoires situés plus en aval. À ce titre, l'exemple de la catastrophe écologique de la mer d'Aral, qui fut le quatrième lac du monde par sa superficie, est édifiant. Il illustre bien les très graves conséquences que peuvent engendrer des prélèvements excessifs d'eau.

Dans les années 1960, pour développer la culture irriguée du coton dans la région désertique du Kazakhstan, la majeure partie des eaux des deux fleuves qui alimentaient la mer d'Aral a été détournée. Ces prélèvements considérables ont abaissé de 15 mètres le niveau de la mer et diminué sa surface de 40 %. Dans le même temps, la salinité de ses eaux est passée de 10 à 30 grammes par litre. La faune a presque entièrement disparu et la pêche avec elle. Une mauvaise gestion de l'irrigation et une utilisation abusive d'engrais et de pesticides ont conduit à la salinisation des sols et à la désertification d'immenses étendues dans la région. La qualité des eaux souterraines s'est également dégradée et le niveau des nappes phréatiques a fortement baissé.

1.3.3 La qualité de l'eau d'irrigation :

Il arrive que, devant la rareté des ressources conventionnelles, les exploitants agricoles sont amenés à se rabattre sur différentes sources d'eaux pour l'irrigation de leurs cultures. Sur certains sites, ils utilisent des eaux usées non traitées, pouvant provenir aussi bien des ménages que des industries ou pompées directement des oueds.

La réutilisation agricole des eaux usées a toujours existé et est aujourd'hui une pratique largement répandue sur le pourtour sud de la Méditerranée, de l'Espagne à la Syrie. En effet, le bassin méditerranéen est une région où la pénurie en eau est particulièrement ressentie. C'est aussi l'une des régions où la réutilisation agricole des effluents urbains est la plus pratiquée.

Dans ce contexte, les eaux usées sont valorisées comme une ressource supplémentaire en eau et comme apport appréciable en fertilisants. Cependant cette réutilisation engendre des risques pour l'environnement et pour les populations en contact permanent avec les eaux usées ou consommant les produits agricoles irrigués avec ces eaux ; d'où :

- Il est recommandé, voire impératif aux autorités, de mesurer l'impact de cette réutilisation sur la qualité physico-chimique du sol ;
- D'évaluer quantitativement et qualitativement le flux de pollution provenant des eaux usées.

Cinq principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation ont été dégagés (Couture, 2006 a) :

- 1. Salinité :** contenu total en sels solubles.
- 2. Sodium :** proportion relative des cations sodium (Na^+) par rapport aux autres.
- 3. Alcalinité et dureté :** concentration d'anions carbonate (CO_3^{2-}) et bicarbonate (HCO_3^-) en relation avec la concentration en calcium (Ca^{2+}) et en magnésium (Mg^{2+}).
- 4. Concentration en éléments qui peuvent être toxiques.**
- 5. pH :** de l'eau d'irrigation.

Les deux premiers critères sont d'importance majeure car un excès de sels augmente la pression osmotique de l'eau du sol et provoque des conditions qui empêchent les racines d'absorber l'eau. Ces conditions provoquent une sécheresse physiologique. Même si le sol semble avoir beaucoup d'humidité, les plantes

flétrissent parce que les racines n'absorbent pas suffisamment d'eau pour remplacer celle perdue par évapotranspiration.

Les principaux sels responsables de la salinité de l'eau sont les sels de calcium (Ca^{2+}), de magnésium (Mg^{+2}), de sodium (Na^+), les chlorures (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}) et les bicarbonates (HCO_3^-). Une valeur élevée de la salinité signifie une grande quantité d'ions en solution, ce qui rend plus difficile l'absorption de l'eau et des éléments minéraux par la plante. Une salinité trop élevée peut causer des brûlures racinaires.

La salinité peut se mesurer de deux façons, soit par les matières dissoutes totales (MDT) exprimé en mg/l ou, plus couramment, par la conductivité électrique.

La conductivité électrique est exprimée en millisiemens/centimètre (mS/cm) qui est l'équivalent de 1 desiemens par mètre (dS/m) et en moyenne, à 640 ppm de sel (Couture, 2006 b).

Sodium : proportion relative des cations sodium (Na^+) par rapport aux autres.

Le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation. Cet élément origine de l'altération de la roche et du sol, des intrusions d'eau de mer, des eaux traitées et des systèmes d'irrigation.

Le problème principal avec une grande quantité de sodium est son effet sur la perméabilité du sol et sur l'infiltration de l'eau. Le sodium remplace le calcium et le magnésium adsorbés sur les particules d'argile et provoque la dispersion des particules du sol. Il y a donc éclatement des agrégats du sol ce qui provoque un sol dur et compact lorsqu'il est sec et excessivement imperméable à l'eau. La perméabilité des sols sableux peut ne pas se détériorer aussi vite que les sols plus lourds lorsqu'irrigués avec une eau de forte teneur en sodium, cependant un problème potentiel existe (Couture, 2006).

Le sodium contribue aussi directement à la salinité totale de l'eau et peut être toxique pour des cultures sensibles comme les carottes, les haricots, les fraises, les framboises, les oignons, pour en nommer quelques-unes.

De grande quantité de sodium combiné avec du chlorure donne à l'eau un goût salé. Si l'eau passe par un système d'aspersion et que le calcium et le magnésium sont bas, des teneurs moyennes à élevées de sodium peuvent défolier les plantes sensibles.

La concentration de sodium dans l'eau d'irrigation est estimée par le ratio d'absorption du sodium (RAS).

Le RAS décrit la quantité de sodium en excès par rapport aux cations calcium et magnésium, qui eux, peuvent être tolérés en relativement grande quantité dans l'eau d'irrigation.

- De l'eau avec un RAS de plus de 9, ne devrait pas être utilisée même si le contenu total en sel est relativement bas.
- Un usage continu d'eau avec un RAS élevé provoque une déstructuration du sol.
- L'eau avec un RAS se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec peu de problème d'accumulation de sodium.
- Quand le RAS se situe entre 6 et 9, les risques de problème reliés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol.
- Lorsque l'eau d'irrigation est saline, une valeur de RAS encore plus basse devrait être utilisée.

Les problèmes dus au sodium sont aussi reliés à la concentration totale en sel de l'eau d'irrigation. Par conséquent, des eaux d'irrigation avec des salinités entre 1,5 et 3,00 mS/cm avec un RAS au-dessus de 4 doivent être utilisées avec prudence. Des échantillons de sols doivent être prélevés annuellement afin d'éviter d'éventuels problèmes de salinité des sols.

L'irrigation d'appoint avec des eaux relativement chargées pourrait se faire avec un minimum de risques pendant la période d'hiver lorsque la demande atmosphérique est réduite. Des cultures considérées comme stratégiques en Afrique du Nord sont très résistantes à la salinité. Les pratiques culturelles développées dans les oasis où la salinité de l'eau d'irrigation varie entre 3 et 6 g/l et qui sont basées sur l'utilisation massive du fumier et l'entretien de la structure perméable de la couche superficielle du sol mériterait une attention particulière.

Les eaux de ruissellement et saumâtre ont un potentiel pour le développement agricole beaucoup plus important que celui des eaux usées. Cependant, il est important de recycler les quantités d'eau produites par les centres urbains. Les exemples de réutilisation des eaux usées épurées dans les parcs et la foresterie offrent une alternative à la réticence d'utiliser ces eaux dans une région qui veut développer ses exportations et son tourisme.

1.4 Les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation :

L'agriculture représente le plus gros consommateur des ressources en eau. Ces ressources, suivant les régions dont elles proviennent, et leur contact éventuel avec des sources de pollution ont des caractéristiques très diversifiées. De plus, vu la diminution des apports en eau constatée depuis plusieurs décennies, les agriculteurs, notamment dans les régions continentales, s'intéressent à l'utilisation des eaux usées.

C'est ainsi que des normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation ont été établies. Une eau est conforme à l'irrigation est une eau dont les caractéristiques respectent les valeurs limites imposées par des textes de lois et inscrites dans des tableaux de normes. L'exemple du, tableau (n°1.1) donne les normes de qualité des eaux destinées à l'irrigation (Maynard et Hochmuth, 1997). Les normes varient selon les pays, mais dans la majorité des pays on fait référence, à quelques exceptions près, aux cinq critères de qualité sus cités.

Tab n°1.1 : Barème de qualité pour l'eau d'irrigation.

Type de problème	Sévérité du problème		
	Aucune	Légère	Elevé
- Salinité	< 0,75	0,75-3,0	> 3
- Conductivité (mS/cm)	< 700	700-2000	>2000
- Matières dissoutes totales			
- SAR(Sodium absorption Ratio)	< 3	3-9 >	> 9
- Alcalinité ou dureté	80-120		>200
- pH (risque de colmatage)	< 7	7-8	> 8
- Fe mg/l (risque de colmatage)	< 0,2	0,2-1,5	> 1,5
- Mn mg/l (risque de colmatage)	< 0,1	0,1-1,5	> 1,5

(Source : Maynard et Hochmuth, 1997).

Les normes ont pour objectif de :

- Protéger le public et les ouvriers agricoles ;
- Protéger les consommateurs des produits agricoles ;
- Protéger les ressources en eau superficielle et souterraine et les sols ;
- Protéger le matériel d'irrigation ;
- Maintenir des rendements acceptables.

1.5 L'irrigation en Algérie :

L'Algérie compte 17 bassins-versants. Les ressources en eau proviennent des eaux de surface et des eaux souterraines renouvelables et non renouvelables. Il est à noter que ces ressources sont très variables notamment celles qui proviennent des nappes tributaires des aléas climatiques. Globalement, la superficie irriguée actuellement est de l'ordre de 420.000 ha dont 100.000 ha dans les régions sahariennes et ce, sur une superficie agricole utile de 8.666.715 ha soit près de 5% de la surface agricole utile (SAU), (Bouaroudj. S, 2012). Les 320.000 ha irrigués dans le Nord du pays (soit 4,6% de la SAU) se répartissent en deux ensembles nettement différenciés à la fois par la taille des aménagements et par le mode de gestion, il s'agit:

1. Des grands périmètres irrigués (GPI) : relevant de l'Etat gérés par l'Office National des Irrigations et du Drainage (ONID). Ces périmètres sont irrigués à partir de barrages pour la plupart et de forages dans le Nord du pays.

Dans le Sud l'irrigation des périmètres est assurée à partir de forages profonds dans les grandes nappes souterraines de l'albien. Leur superficie totale équipée actuelle est de l'ordre de 200 000 ha. La surface irrigable représente environ 150 000 ha (nettement inférieure à la surface équipée en raison des pertes occasionnées par la dégradation des sols). La surface effectivement irriguée est de l'ordre de 40 000 ha seulement.

Des programmes de remise en état et de rénovation des systèmes de distribution sont en cours pour accroître cette surface. Les cultures pratiquées dans les GPI (en 2008) sont en grande partie l'arboriculture (64,6 % des surfaces irriguées), le maraîchage (28,5 %), des cultures industrielles (6,1 %) et le reste céréales et fourrages. Il y a lieu de remarquer le faible développement des cultures industrielles malgré la vocation des GPI pour ces spéculations, probablement dû à l'absence de valorisation par les filières de transformation. Faiblesse également de la production des cultures fourragères (Benblidia, 2011).

Tabn°1.2 : Superficies des GPI équipées, irrigables et irriguées par grande région.

Régions	Superficies équipées (ha)	Superficies irrigables (ha)	Superficies irriguées (ha)	Proportions équipées %	Irrigables équipées %	Irriguées équipées %
Oranie	28 930	13 500	9459,50	15,2	46,7	32,7

Chélif	75 438	61 383	11513,54	39,6	81,4	15,3
Algérois	44 088	34 963	3 717,11	23,1	79,3	8,4
Constantinois	34 612	30 446	8460,42	18,1	88,0	24,4
Sahara	7660	6939	6772	4,0	90,6	88,4
Total	190 728	147 231	39922,57	100	77,2	20,9

Source : (Benblidia 2011).

2. De la « Petite et Moyenne Hydraulique » ou PMH : il s'agit d'exploitations petites et moyennes constituées de petits périmètres et aires d'irrigation qui se sont remarquablement développés depuis une dizaine d'années à l'initiative de l'Administration et surtout, à l'initiative de producteurs privés. La PMH englobe toutes les formes de développement de l'irrigation autres que celles délimitées dans le cadre des GPI dont la gestion relève de l'ONID (tableau n°1.3).

Tab n°1.3 : Répartition territoriale des superficies de PMH selon le mode d'irrigation.

Région SAU	Irriguée (ha)	Gravitaire %	Aspersion %	Localisé %	Citernes %
Nord	221 200	62	22	15	0,9
Hauts Plateaux	258 482	64	16	20	0,4
Sud	216 482	70	7	23	0,0
Total	696 380	65	15	19	0,4

Source : (Benblidia 2011).

Les aides et subventions accordées par l'Etat aux exploitants dans le cadre du PNDAR (Plan Nationale de Développement Agricole 2000-2006) ainsi que la libéralisation de réalisation de forages et de creusement de puits ont permis à la PMH d'occuper une superficie de 720 000 ha en 2008 alors qu'elle n'était que de 350 000 ha en 2000. La PMH grâce à ses cultures principales, maraîchage (32 %) et arboriculture (44 %) contribue efficacement à la satisfaction des besoins en fruits et légumes frais de la population. Il faut noter cependant que ce rapide développement de la PMH s'est accompagné de prélèvements importants et mal contrôlés sur les ressources en eau souterraines et même de surexploitations de quelques grandes nappes (Benblidia, 2011).

L'irrigation gravitaire (tableaux n°1.3 et 1.4) reste encore très répandue dans les exploitations de PMH. Mais on constate que les modes d'irrigation « économes » se sont bien développés, en particulier le «goutte à goutte » dans les Hauts Plateaux et

les régions sahariennes. L'introduction du mode d'irrigation dit du « goutte à goutte » a permis la création de nombreux petits bureaux d'études pour le calcul des plans de réseaux, et le développement de la fabrication de matériels et de canalisations en plastique souple.

D'importantes subventions pour la mise en place d'équipements de la micro-irrigation ont été octroyées dans le cadre d'un vaste programme d'économie de l'eau pour réduire la demande en eau d'irrigation et limiter les pertes (les objectifs du Ministère de l'Agriculture dans le cadre de l'actuel Plan National de Développement Agricole dépassent 100.000 ha pour la micro-irrigation).

Tabn°1.4 : Evolution des surfaces irriguées de 2000 à 2008.

Année	Superficie irriguée totale (ha)	Système d'irrigation (ha)		
		Gravitaire	Aspersion	Goutte à goute
2000	350,000	275,000	70,000	5,000
2001	617,427	458,421	102,978	56,028
2002	644,978	433,561	127,570	83,877
2003	722,320	485,019	138,301	99,000
2004	793,334	516,108	159,739	117,487
2005	825,206	524,503	153,006	147,697
2006	835,590	481,046	175,056	179,488
2007	907,293	557,327	183,182	166,784
2008	928,955	583,002	185,080	160,873

Source : (d'après bilan 2000-2008 MADR in Benblidia 2011).

1.6 Résultat à l'horizon 2015 :

Les structures concernées comptent développer les systèmes économiseurs d'eau, par l'extension et la reconversion des systèmes gravitaires existant en systèmes économiseurs d'eau. La superficie irriguée totale devra être en 2015 de l'ordre de 1 120 000 ha dont 810.000 ha équipée de systèmes d'irrigation économiseurs d'eau. (La part d'irrigation «économe » passerait de 37,3 % en 2009 à 75% en 2015).

1.6.1 L'irrigation dans la wilaya de Skikda :

La superficie totale de la wilaya de Skikda est de 413 726ha, la wilaya dispose de 193 179 ha de terres agricole. Dans la wilaya y a 25 000 irrigables pour une SAU de 131 879 ha (DSA, 2014). Mais les vicissitudes du climat font que la wilaya reçoit

bon an mal an 690 mm de pluies et que les besoins pour irriguer les 25 000 ha de terres irrigables demeurent la plupart du temps insuffisants. Le principe de prévention a fait que le recours à l'irrigation avec l'épuration des eaux usées brutes est en cours de production depuis 2011. La superficie irriguée à partir des ressources est estimée à 15 300 ha (DSA, 2014)

La wilaya dispose actuellement d'importantes ressources d'irrigation à savoir dans les tableaux suivants :

1. Grande hydraulique :

- **Barrages existants :**

Tab n° 1.5 : les quatre barrages qui ont des volumes d'eau destiné à l'irrigation.

Barrage	Capacité hm ³ /an	Volume Régularisé hm ³ /an	Volume destiné à l'irrigation hm ³
Beni Zid	39,39	20	08
Guenitra	197,821	48	47
Zérdzas	18,68	18	5
Zit Emba	116,59	43,40	43

Source : (DSA, 2014).

- **Barrages en Projets :**

Un aperçu succinct est ainsi évoqué.

a. Le barrage de l'oued Z'hor :

Il est destiné à l'AEP de la région ainsi qu'à l'irrigation de sa plaine qui s'étend sur une superficie de 400 ha. Sa capacité totale est de $72 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

b. Le barrage de l'oued Charchar :

Il est destiné à servir à la protection de la ville de Skikda contre les crues et à l'AEP de la commune de Bouchtata et ses environs, ainsi qu'à l'irrigation de la plaine d'El-Hadaïek. Ce barrage a une capacité estimée à $11,5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

c. Le barrage de Ramdane Djamel :

Il a pour rôle de servir de barrage écrêteur en amont du barrage de Zerdézas. Ainsi, les barrages Zerdézas, Beni Zid, Zit Emba et Guenitra sont définis en météorologie.

Tab n° 1.6: Les barrages qui sont en cours de projets destiné pour appuyer l'irrigation.

Barrage	Capacité hm ³ /an	Volume Régularisé hm ³ /an	Volume destiné à l'irrigation hm ³	Obs
Oued Z'HOR	22	26	2,40	
R.Djamel	71,5	30	/	
Charchar	08	60	3,00	Plaine d'El- Haddaeik

Source :(DSA, 2014).

2. Petite et moyenne hydraulique :

En plus du pompage au fil de l'eau la wilaya dispose actuellement d'importantes ressources d'irrigation à savoir, En 2014, elle disposait:

- 12 retenues collinaires 17,52 Hm³.
- 845 puits 1230 Hm³.
- 36 forages 541 l/j.
- Bassins d'accumulations 180 unités.
- Prises sur oued 4220 unités.

Source :(DSA, 2014).

1.6.2 Mise en œuvre du programme d'économie de l'eau agricole (2010-2014) :

L'installation du comité de suivi de la mise en œuvre du programme d'économie de l'eau agricole constitué de : DHW, DSA, ONID, ADE, conservation des forêts, l'Association des irrigants.

1.6.2.1. Valorisation du potentiel existant (GPI) :

❖ Périmètre Saf-Saf :

1-Réhabilitation de la station de pompage de Guenitra (sur les cinq pompes seulement deux sont opérationnelles).

2-Remplacer les conduites d'adduction Guenitra jonction Salah-Bouchaour par des conduites de résistance accrue (Acier HP) sur une longueur de 15 Km (dam 1250/dam 1000).

3-La Réhabilitation des pistes et des canaux d'assainissement (Fossés de colature).

4-Etablissement d'une relation contractuelle bien définie entre ONID et Agriculteur.

5-Prévoir un système de sécurisation d'alimentation en eau agricole du secteur I (1720 ha) et secteur II (600 ha) à partir du barrage Zerdézas et ceci en affectant ce barrage exclusivement à l'irrigation, et prévoir l'alimentation en eau potable de la ville d'El-Harrouch et zones environnante à partir de Guenitra, dans le cadre de l'interconnexion des barrages Guenitra-Zerdézas.

❖ **Périmètre Zit Emba :**

1- Au niveau du périmètre Zit Emba malgré les potentialités disponibles (Ressources en eau, terres) le niveau générale de l'intensification reste réduit.

2- Afin d'augmenter l'intensification au niveau de ce périmètre la DSA et la chambre d'agriculture doivent prévoir l'instauration d'un service d'accompagnement amont et aval (crédit, collectes des produits, transformation...etc.).

❖ **Petite et moyenne hydraulique(PMH) :**

- Réhabilitation de l'ensemble des retenues collinaires existants au nombre de douze(12).

❖ **Eau non Conventiionnelle :**

Dans le cadre du programme national d'augmenter la capacité des installations d'épuration de 200 millions de m³ à 600 millions de m³ par an en 2009, en relève l'absence de notre wilaya dans ce programme qui connaît un retard considérable en matière d'infrastructure d'épuration sur cette base .

Une station d'épuration des eaux usées qui a une capacité de 420 000 m³/j est en cours de réalisation et entrera en production en 2011. L'eau servira à irriguer le secteur (n° : I) du périmètre Saf-Saf sur 1720 ha constitué d'agrume. Prévoir un système de sécurisation d'alimentation en eau agricole du secteur (n° : I) (1720 ha) et secteur (n° : II) (600 ha) à partir du barrage Zerdézas et ceci en affectant ce barrage exclusivement à l'irrigation, et prévoir l'alimentation en eau potable de la ville d'El-Harrouch et zones environnante à partir de Guenitra, dans le cadre de l'interconnexion des barrages Guenitra-Zerdézas.

Une opération de réhabilitation du périmètre Saf-Saf d'un montant de 400 millions de dinars est en cours de lancement (Piste, réseaux et réservoirs) (DSA,2014).

1.7 Evaluation des superficies irriguées 2010-2014 de la wilaya de Skikda :

L'examen des valeurs données par le DSA et leur comparaison avec les de la DHW des superficies irriguées (tableau n°1.7) permet de tirer les résultats suivants :

Tab n°1.7 : Evaluation des superficies irriguées 2010-2014 de la wilaya de Skikda :

(Source : DSA et DHW rapport de la Mise en œuvre du programme de l'hydraulique Agricole 2010-2014).

Ouvrage	de 2010		2011		2012		2010/2013		2010/2014	
	Nbr	Sup(ha)	Nbr	Sup(ha)	Nbr	Sup(ha)	Nbr	Sup(ha)	Nbr	Sup(ha)
Mobilisation										
Barrages	04	2000	04	1914,41	04	1700		3200		4150
Petit Barrages	Néant	Néant	Néant	Néant	Néant	/	/	/	/	/
Retenues collinaires	13	440	13	954-440	13	440	18	500	23	560
Forages	36	950	36	1334	36	960	40	1000	50	1100
Puits	846	2500	846	3581,98	846	2700	850	2720	900	3000
Réutilisation des Eaux usées Epurées	/	/	/	/	/	/	01	1204	01	1204
Autres à préciser :										
-Prise au fil de l'eau, sources et des mares	4220	10360		9682,34		13000		13456		11286
Total		16250		17467		18800		19360		21300

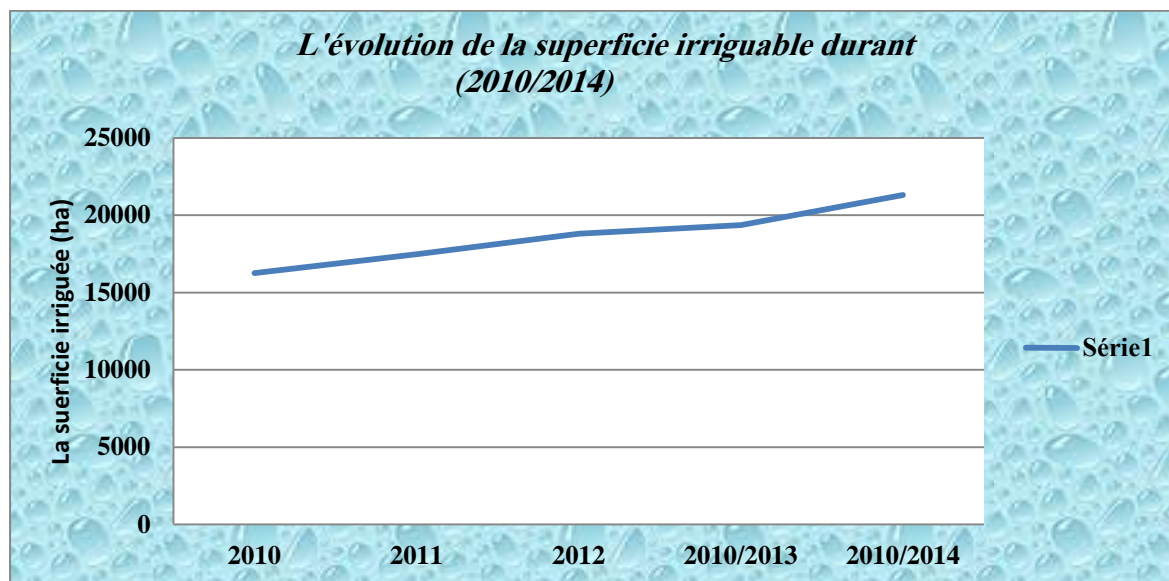


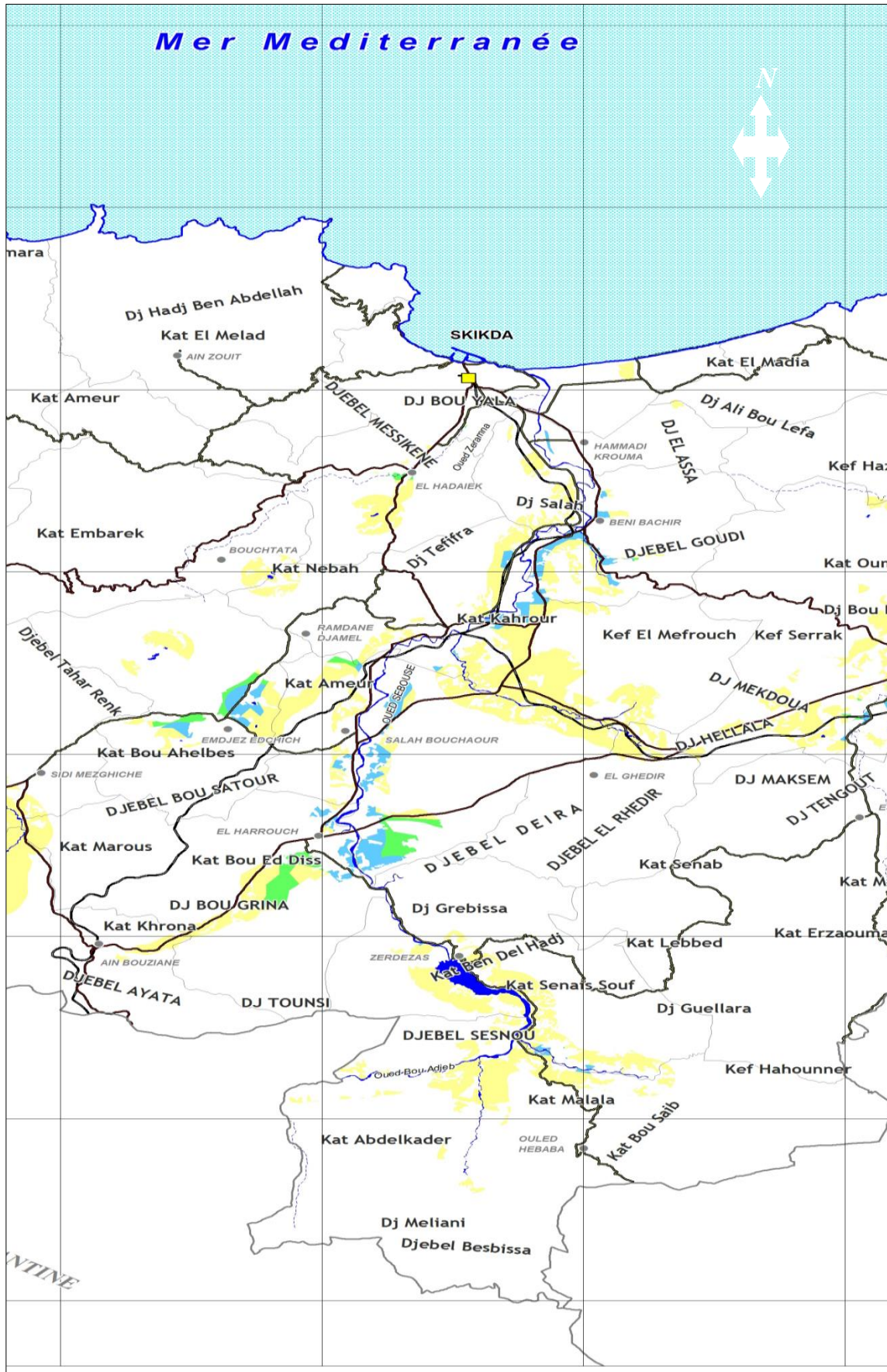
Fig n°1.1 : Courbe d'évolution de la superficie irrigable dans la wilaya de Skikda durant (2010-2014) (DSA, 2014).

Les résultats du tableau (n°1.7), illustrés par la courbe de la figure (n°1.1) montrent, que durant les cinq ans d'irrigation le taux de la superficie augmente

Tab n°1.8 : La répartition des cultures dans la SAU :

➤ Cultures herbacées	Superficie
• Céréales	: 980 ha
• Maraichage	: 15 000 ha
• Cultures Industrielles	: 5 200 ha
➤ Cultures pérennes	
• Arboricultures	: 16 292 ha
Fruitière	: 2 353 ha
• Agrumiculture	: 1 505 ha
• Viticultures	

Source : (DSA ; 2014).



Echelle d'édition :1/150 000

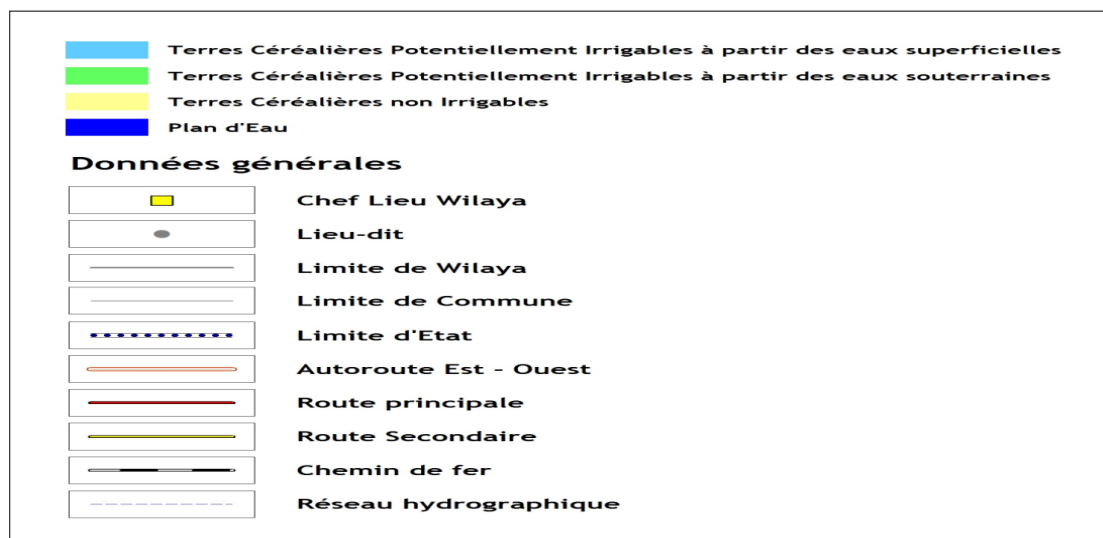
Légende :

Fig n°1.2 : Carte d'identification des zones céréalières potentiellement irrigables dans la wilaya de Skikda. (BANDER délivré sept 2012).

1.8 Les risques de pollution liés à l'agriculture :

Dans ses activités d'élevage ou de culture, l'agriculteur peut occasionner des rejets polluants qui gagnent les rivières ou s'infiltrent dans les nappes d'eau souterraine.

- **L'activité agricole génère deux types de pollutions :**

Les pollutions ponctuelles peuvent être la conséquence soit de manipulations "accidentelles" de produits phytosanitaires soit de pollutions dues aux bâtiments d'élevage.



Fig n°1.3 : Photographie d'une terre céréalicultures.

Les pollutions diffuses proviennent quant à elles de mauvaises pratiques de fertilisation ou de traitements phytosanitaires. Elles peuvent aussi provenir d'une mauvaise gestion des terres et d'un aménagement de l'espace et des parcelles ne permettant plus de limiter l'érosion ou les transferts de polluants à l'échelle du bassin versant.

Certaines pratiques agricoles ont également des impacts sur les milieux aquatiques ou l'érosion des sols.

Ces pollutions sont particulièrement difficiles à évaluer et à réduire à cause de la multiplicité des sources possibles, la complexité des transferts de polluants dans l'environnement et les décalages dans le temps entre l'émission des polluants et leur mesure dans le milieu.

En effet, d'après une étude récente, elle estime que les nitrates sont en cause pour 70 % des masses d'eau superficielles risquant de ne pas atteindre le bon état chimique. Pour les masses d'eau souterraines, 38 % des masses d'eau n'atteindront pas le bon état 2015 pour des problèmes de pesticides et 25 % pour des problèmes de nitrates.

Le recours à l'agriculture intensive dans le bassin du Saf-Saf s'est accéléré durant les années 1990, par le développement de l'irrigation (périmètre irrigué du Saf-Saf). Ainsi, la libéralisation du secteur agricole a facilité aux agriculteurs l'utilisation d'engrais et de produits chimiques de traitement de cultures, pour augmenter leur production, notamment les incitations financières introduites par les programmes de développement agricole mis en œuvre par l'Etat. Cependant, cette utilisation d'engrais et de produits chimiques n'est pas toujours maîtrisée, et on constate souvent une sur utilisation de ces produits, se trouvent dans les eaux superficielles et souterraines par ruissellement et infiltration. Ils entraînent donc une dégradation de la qualité de l'eau qui la rend à terme impropre à la consommation.

A titre d'exemple, à la commune d'Emdjez Edchich qui représente le secteur IV du périmètre irrigué, les agriculteurs utilisent des quantités considérables de produits phytosanitaires solides (16 240 Kg/an) et d'engrais chimiques (19 320 quintaux). De même, à El Harrouch, les agriculteurs utilisent en excès les produits phytosanitaires liquides (8959 l/an).

Tab n°1.9: la quantité des pesticides et engrais délivré par le DSA pour l'année 2014.

Quantité délivrée aux Producteurs	Produits Phytoprotecteurs Liquides (l)	Produits Phytoprotecteurs Solides (Kg)	Engrais Chimiques (Quntal)
El Harrouch	8959	4251	38308
Emdjez Edchich	3515	16240	19320
Salah Bouchaour	1510	380	3943
Skikda	470	680	1880

Source :(DSA,2014).

Conclusion :

L'irrigation est l'opération consistant à apporter artificiellement de l'eau à des végétaux cultivés.

La consommation d'eau agricole est très variable d'un pays à l'autre et les méthodes de mobilisation de ces eaux d'irrigation sont différées (mobiliser les eaux de crues des rivières, les eaux de pluie, retenues collinaires, les lacs et les barrages...etc.).

Nous pouvons dire que l'usage de l'irrigation présente de nombreux avantages. Il permet d'augmenter la superficie des surfaces cultivées, mais aussi les techniques modernes d'irrigation permettent dans le même temps de fertiliser les sols. La qualité des eaux s'est également dégradée et le niveau des nappes phréatiques a fortement baissé.

Présentation de la zone d'étude

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Introduction :

Le bassin du Saf-Saf est inscrit dans le territoire de la wilaya de Skikda, qui s'étendant sur une superficie de 4137 km². Elle se situe au Nord Est de l'Algérie. Au Sud, sa limite naturelle (chaîne numidienne) se confond avec sa limite administrative (wilaya de Constantine). Au Nord, elle est limitée par la mer méditerranée, à l'Est par le massif de l'Edough (wilaya d'Annaba) et à l'Ouest par la wilaya de Jijel.

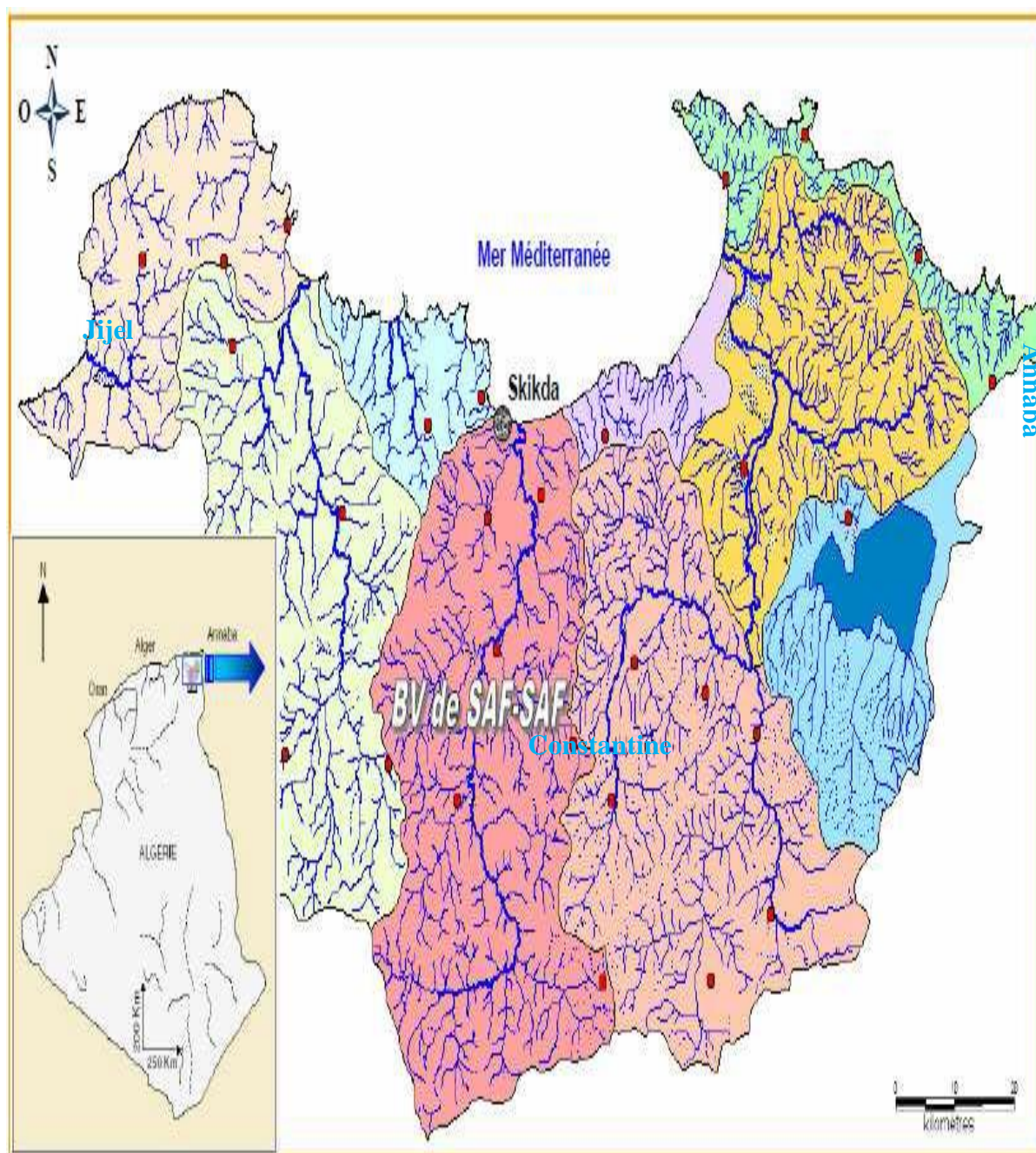
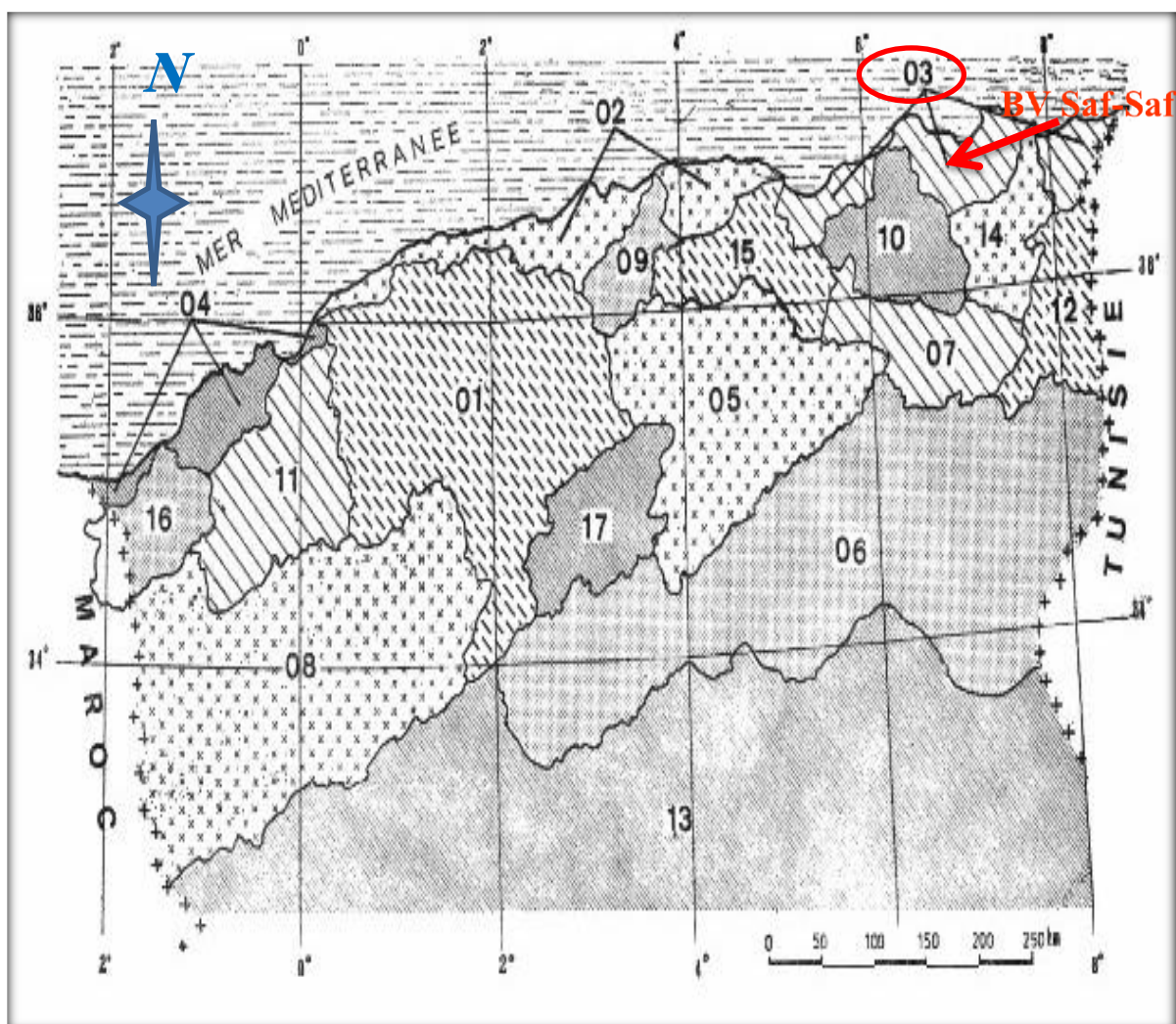


Fig n° 2.1 : Carte de Situation Géographique du Bassin Versant de l'Oued Saf-Saf
(source : Sakaa, 2008).

Le bassin versant de Saf-Saf fait partie de la grande hydraulique, est situé entre les latitudes 36°-37° Nord et les longitudes 6°30'-7° Est, il fait partie du côtier constantinois (code n°:03) (d'après le découpage de l'Agence Nationale des Ressources Hydriques ANRH) (Fig n°2.2). Il est limité par le bassin versant de Guebli à l'Ouest, la partie amont du bassin versant de Seybouse au Sud, le bassin versant de Kébir Ouest à l'Est; et enfin la mer méditerranée au Nord comme montre la figure (n:°2.3).

Le bassin draine une superficie de l'ordre de 1158 km² ; et contient 30 municipalités et agglomérations qui sont : Bouâbaz , Bouyaâla, Zone Basse, Sidi Ahmed, Ben Mhidi, Stora, Hammadi Krouma, Fil Fila , Oued Laksab , El Hadaik , Zef-Zef , Bouchtata , Ramdane Djamel , Stayha , Beni Bchir, El Harrouch , Saïd Bousbaâ , Toumiettes , Salah Bouchaour , Djbel Mekcene , Oued Ksoub , Emjez Eddchich , Sidi Mezghich, El Ghdir, Essebt, Zerdézas, Aïn Bouziane, Ouled Hbaba, and Zighoud Youcef.



01 CHELIFF	07 H. PLAINES CONSTANTINOISES	13 SAHARA
02 COTIERS ALGEROIS	08 H. PLAINES ORANAISES	14 SEYBOUSE
03 COTIERS CONSTANTINOIS	09 ISSER	15 SOUMMAM
04 COTIERS ORANAIS	10 KEBIR RHUMEL	16 TAFNA
05 CHOTT HODNA	11 MACTA 17 ZAHREZ	
06 CHOTT MELGHIR	12 MEDJERDAH	

Fig n°2.2: Site du bassin versant du Saf-Saf (source, *Annuaire hydrogéologique de l'Algérie, ANRH 2014*).

2.1 Géomorphologie générale et chevelu hydrographique du bassin du Saf-Saf :

2.1.1. Ensembles morpho-structuraux du bassin :

L'oued Saf-Saf est un des plus grands oueds du tell nord constantinois de direction Sud-Nord. Il prend naissance sur les pentes du Djebel Ouahch au Sud de la

chaîne numidique qu'il traverse par une vallée étroite entre le Djebel Sesnou et Sebaroud, et gorge au passage de Zerdézas.

Il draine une série de sous bassins : sous bassin de Zerdézas, sous bassin de l'oued Nessa, sous bassin de l'oued Aneur, sous bassin de Zeramna, et le sous bassin de l'oued Haddarat, ensuite il traverse la plaine de Skikda.

1. Le sous bassin de Zerdézas: d'une superficie de 322 km², drainé par les oueds Khémakhem, Bou Adjeb et Khorfane, de forme allongé ($K_c = 1,26$).
2. Le sous bassin de l'oued Nessa (près d'El-Harrouch): drainé par l'oued Nessa, ce bassin se trouve à une altitude de 80 m, de forme triangulaire il est fermé au Nord par une ligne de relief culminant à 300 m et au Sud à 800m et 821m.
3. Le sous bassin de l'oued Aneur (près d'Emdjez Edchich): il est isolé derrière des reliefs atteignant 150 m à 200 m d'altitude.
4. Le sous bassin de l'oued Zeramna: de forme allongée drainé par l'oued Zeramna.
5. Le sous bassin de l'oued Haddarat : (près de Ramdane Djamel) drainé par l'oued Haddarat.
6. La plaine de Skikda : de forme triangulaire ayant pour sommet le débouché de la vallée du Saf-Saf. Elle est séparée de ces bassins par une ligne de reliefs de direction Nord-Est Sud-Ouest. Les reliefs ont généralement des altitudes faibles.

2.1.2. Chevelu hydrographique :

La région de Skikda est traversée par trois principaux cours d'eau, à savoir : l'oued Kébir ouest à l'Est, l'oued Saf-Saf au centre, et l'oued Guebli à l'Ouest.

Le bassin versant du Saf-Saf est drainé par l'oued Saf-Saf, qui prend naissance au Sud de la chaîne numidique à partir des deux oueds, Khémakhem et Bou Adjeb drainant une surface de 1158 km². L'oued Saf-Saf ne bénéficie pas des apports liquides provenant des deux oueds cités au-dessus, car ils sont stockés par le barrage des Zerdézas. Notre secteur d'étude présente un chevelu hydrographique dense, constitué par des oueds permanents et des oueds temporaires. Au niveau de la plaine de l'oued Saf-Saf, les oueds temporaires sont peu nombreux. Les oueds permanents sont les affluents de la vallée Saf-Saf.

2.1.3 Forme du bassin :

Cet élément peut être caractérisé par l'Indice de compacité de Gravelius K_C , ayant une influence certaine sur l'écoulement. La forme du bassin détermine l'allure de

l'hydrogramme résultant d'une pluie donnée, où un bassin allongé ne réagira pas de la même manière qu'un bassin de forme ramassée.

La forme est exprimée par l'indice de compacité, qui correspond au rapport du périmètre P du bassin et sa surface A.

$$K_C = 0,28 \frac{P}{\sqrt{A}} = 1,23$$

K_C : Indice de Compacité de Gravelus.

P : périmètre (km)

A : superficie (km²)

Pour le bassin versant du Saf-Saf, l'indice K_C a été estimé à 1,23 ; traduisant une forme allongée du bassin et c'est ce que les dimensions du rectangle équivalent confirment (52,82 et 21,92 km).

2.1.3.1 Dimensions du rectangle équivalent :

Cette notion introduite par L. Roche en 1963, permet la comparaison des bassins versants entre eux, quant à l'influence de leurs caractéristiques physiques sur l'écoulement global. Quand l'indice de compacité est supérieur à 1,12, les dimensions du rectangle équivalent sont obtenues à l'aide des relations suivantes:

$$L_e = \frac{K_C \sqrt{S}}{1,12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_C} \right)^2} \right] \quad l = \frac{K_C \sqrt{S}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,12}{K_C} \right)^2} \right]$$

Avec:

L_e : Longueur du rectangle équivalent en Km;

l : Largeur du rectangle équivalent en Km;

K_C : Indice de compacité ;

S: Superficie du bassin versant en km².

Nous obtenons:

$$L_e = 52,82 \text{ km.}$$

$$l = 21,92 \text{ km}$$

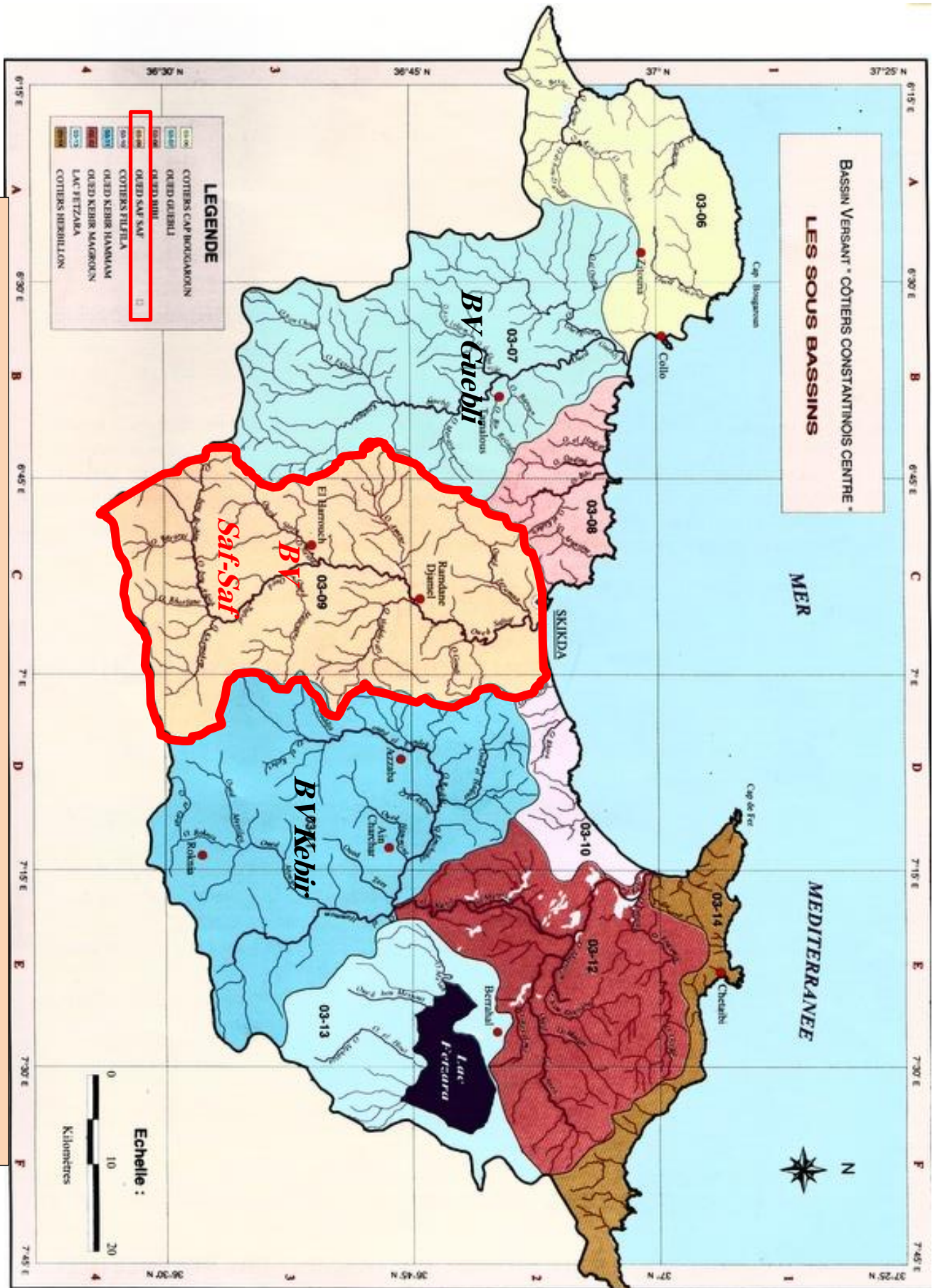
2.1.3.2 Répartition des tranches d'altitudes et la courbe hypsométrique :

L'analyse hypsométrique est très utile pour l'étude du relief. Elle met en évidence le profil type du bassin et les pentes; facteur déterminant de l'écoulement. Il devient donc impératif d'étudier la répartition de la superficie du bassin par tranche

d'altitude. À partir de la carte topographique de Skikda (1 / 200 000), on a pu réaliser le tableau n°2.1.

Tab n°2.1: Répartition des superficies en fonction des tranches d'altitude dans le bassin versant du Saf-Saf.

Tranche d'Altitude (m)	Hauteur Moyenne Hi (m)	Surface Partielle Si (km ²)	Surface Si Cumulée (km ²)	Surface Partielle Si (%)	Surface Si Cumulée (%)
≤200	100	362,3	1158	31,29	100
200-400	300	286,0	795,7	24,70	68,71
400-600	500	255,5	509,7	22,06	44,01
600-800	700	156,8	254,2	13,54	21,95
800-1000	900	83,7	97,4	7,23	8,41
≥1000	1100	13,7	13,7	1,18	1,18
Total du bassin versant	-	1158	-	100	-



2.2. Aperçu socio-économique :**2.2.1. Contexte démographique et administratif du bassin du Saf-Saf :**

La wilaya de Skikda regroupe 38 communes, dont la majorité en zones montagneuses, les agglomérations se concentrent autour des communes situées dans les plaines telles que: Skikda, Azzaba et El Harrouch.

Le bassin du Saf-Saf occupe la partie centrale de la wilaya, six daïras appartiennent à ce bassin; Skikda, El Hadaeïk, Ramdane Djamel, El Harrouch et une partie de Sidi Mezghiche et Azzaba, sans oublier une partie de la commune de Zighoud Youcef qui fait partie de la wilaya de Constantine.

Le bassin du Saf-Saf ne fait pas exception, selon les projections de 2010, basées sur le recensement de 2008, la population du bassin du Saf-Saf est de 451 717 habitants (d'après Khalifaoui, 2014), soit 49,15% de la population totale de la wilaya de Skikda, avec un taux de croissance démographique moyen annuel de l'ordre de 1,74 %. Les agglomérations des daïra de Skikda (199 133 hab) et d'El Harrouch (124 530 hab) qui regroupent à elles seules 71,65 % de toute la population du bassin du Saf-Saf, constituent les deux principaux pôles urbains dans le bassin.

Tab n° 2.2: Le nombre de population, superficie et densité dans les communes de bassin Saf-Saf :

	Daïra	Commune	Nombre de Pop 2010(hab)	Superficie (km2)	Densité (hab/km2)
Skikda	Skikda	Skikda	167 286	56,36	2968
		Hamadi Krouma	31 847	36,78	866
	El Hadaeik	El Hadaeik	18 792	50,8	370
		Bouchtata	9 606	112,50	85
	Ramdane	Ramdane Djamel	28 37	115,74	245
	Djamel	Beni Bachir	10 021	43,25	232

	El Harrouch	El Harrouch	51 072	101,80	502
	Harrouch	Salah Bouchaour	30 929	93,00	333
		Emjez Eddchich	20 995	76,88	273
		Zérdaza	12 997	101,65	128
		Oueled hbaba	8 537	199,07	43
	Sidi Mezghiche	Sidi Mezghich	26 638	94,50	282
	Mezghiche	Aïn Bouziane	10 031	75,90	132
	Azzaba	El Ghédir	6 767	46,25	146
		Es Sebt	15 873	244,15	65
Constantine	Zighoud.Y	Zighoud Youcef	1 951	115,80	17
Population total :			451 717		

Source : (Khalifaoui, 2014)

Sur le plan administratif, le bassin du Saf-Saf s'étend principalement sur la région centrale de la wilaya de Skikda. Il comprend six daïras, englobant seize (16) communes (11 communes rurales et 5 communes urbaines); Skikda, Hammadi Krouma, El Hadaeïk, Bouchtata, Ramdane Djamel, Beni Bachir, El Harrouch, Salah Bouchaour, Emdjez Edchich, Zerdézas, Oueled Hbaba, El Ghédir, Es Sebt, Aïn Bouziane, Sidi Mezghiche et la commune de Zighoud Youcef qui fait partie de la wilaya de Constantine.

La commune de Skikda constitue le plus grand pôle urbain dans le bassin du Saf-Saf, avec un taux d'urbanisation de 97,96 % (Taux d'urbanisation = Population Urbaine / Population totale), puis Hamadi Krouma avec un taux de 85,38 %, El Harrouch (67,73 %) et enfin Ramdane Djamel par 54,10 % (Khalifaoui, 2014).

2.2.2. Contexte industriel :

L'activité industrielle dans la wilaya de Skikda est fortement concentrée autour des grandes agglomérations telles que; Skikda, Azzaba et el Harrouch.

Dans le bassin du Saf-Saf, l'aval est purement dominé par l'industrie pétrochimique du groupe Sonatrach au niveau de la zone industrielle située à 4 km de la ville de Skikda, contenant les différents complexes:

- Les deux complexes de raffinages (RA 1/K) et (RA 2/K).
- Le complexe de liquéfaction du gaz naturel (GL 1/K).
- Le complexe des matières plastiques (CP 1/K).

- Transport des hydrocarbures, pétrole brut et de gaz naturel.

- La centrale thermique (La 100/K).

Ajoutant à cela, la minoterie et la production des pâtes (ERIAD) à Hamadi Krouma. Cependant, la partie centrale du bassin du Saf-Saf est dominée par les industries agroalimentaires, citant: la minoterie et semoulerie (ERIAD) à El Harrouch, et la conserverie de Ramdane Djamel.

2.2.3. Contexte agricole :

La wilaya de Skikda est une région à vocation agricole, avec une surface de 193 179 ha, soit 46,68 % de la surface totale de la wilaya (DSA, 2014).

Les grands périmètres sont irrigués par les eaux des barrages (8600 ha), et les périmètres agricoles de moindre importance utilisent l'eau des forages, puits et des retenues collinaires.

Parmi les cultures prédominantes nous citerons: les céréales, les légumes secs, les agrumes (agrumicultures) et les cultures maraîchères.

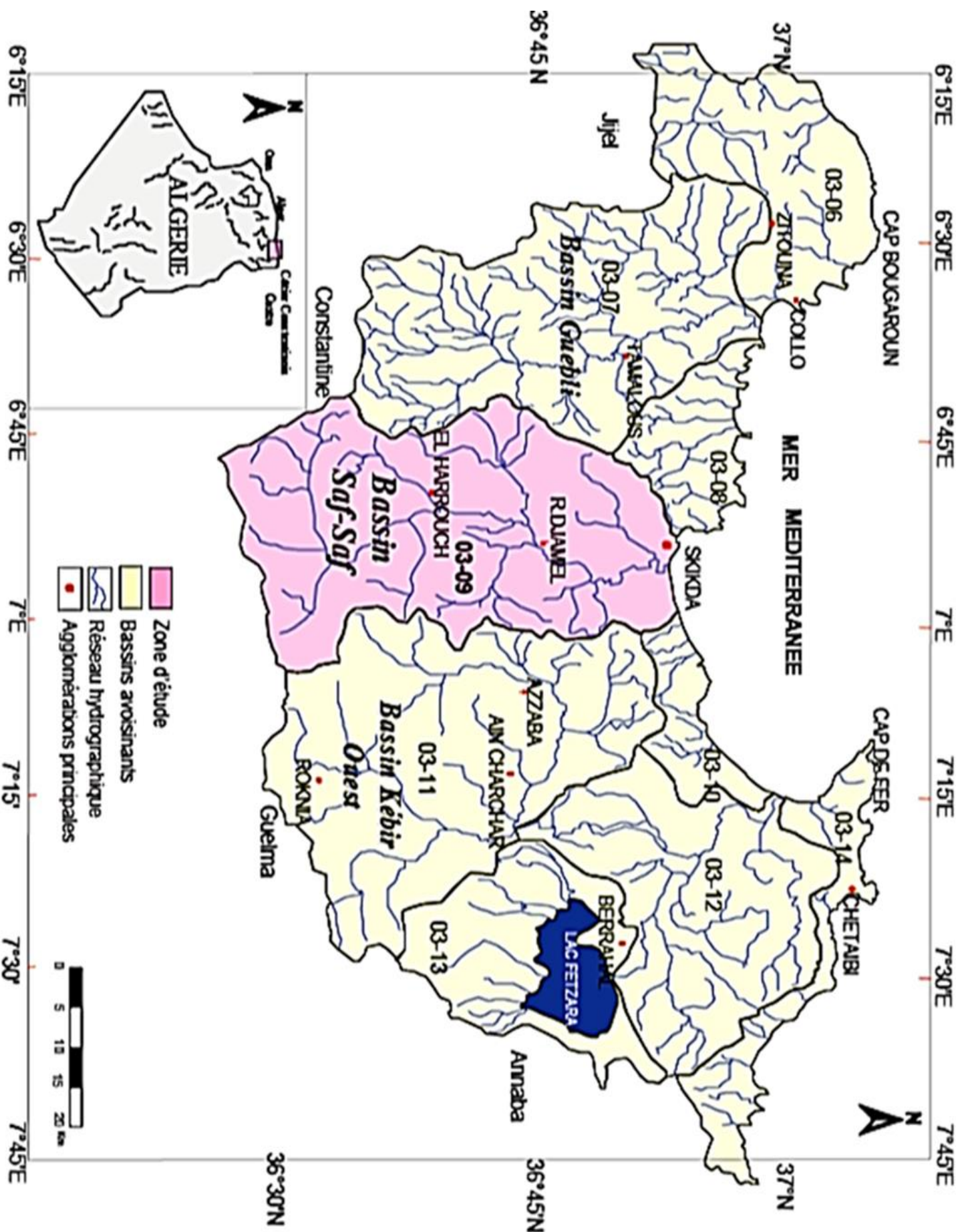


Fig n° 2.4 : Carte de la situation géographique du bassin versant de SafSaf (Source, Khalifaoui 2014)

2.3 La géologie de la zone d'étude :

Le contexte géologique du bassin versant du Saf-Saf se confond avec l'ensemble de la géologie Alpine de la petite Kabylie. Sur le plan régional, on doit à J.F.RAOULT (1974), J.P.BOUILLIN (1977) et J.M.VILA (1980) les premières études complètes permettant d'identifier les ensembles structuraux de cette région. L'immensité de sa taille (1158 Km²), et la complexité de sa structure ont fait que le bassin du Saf-Saf présente un grand ensemble morpho-structural.

Ainsi donc, il s'étend du piedmont sud tellien (au Sud), à la mer méditerranée (au Nord), il est respectivement limité à l'Est et à l'Ouest par les bassins versants du Seybouse et du Kébir Rhumel.

2.3.1 Cadre géologique régional :

Les traits essentiels de la géologie de l'Algérie septentrionale sont individualisés à partir de deux principales manifestations tectoniques qui sont l'orogénèse Hercynienne et surtout Alpine.

Du point de vue structural, l'Algérie est caractérisée du Nord au Sud par :

- * Le domaine des massifs primaires kabyles.
- * Le domaine tellien.
- * Le domaine de l'atlas saharien.
- * Le domaine de la plate-forme saharienne.

Le secteur étudié fait partie de l'ensemble géologique de l'atlas tellien, on y distingue trois formations principales :

- Les terrains anciens formés essentiellement de roches métamorphiques.
- Les formations Tertiaires, essentiellement sédimentaires.
- Les formations Quaternaires, essentiellement alluvionnaires.

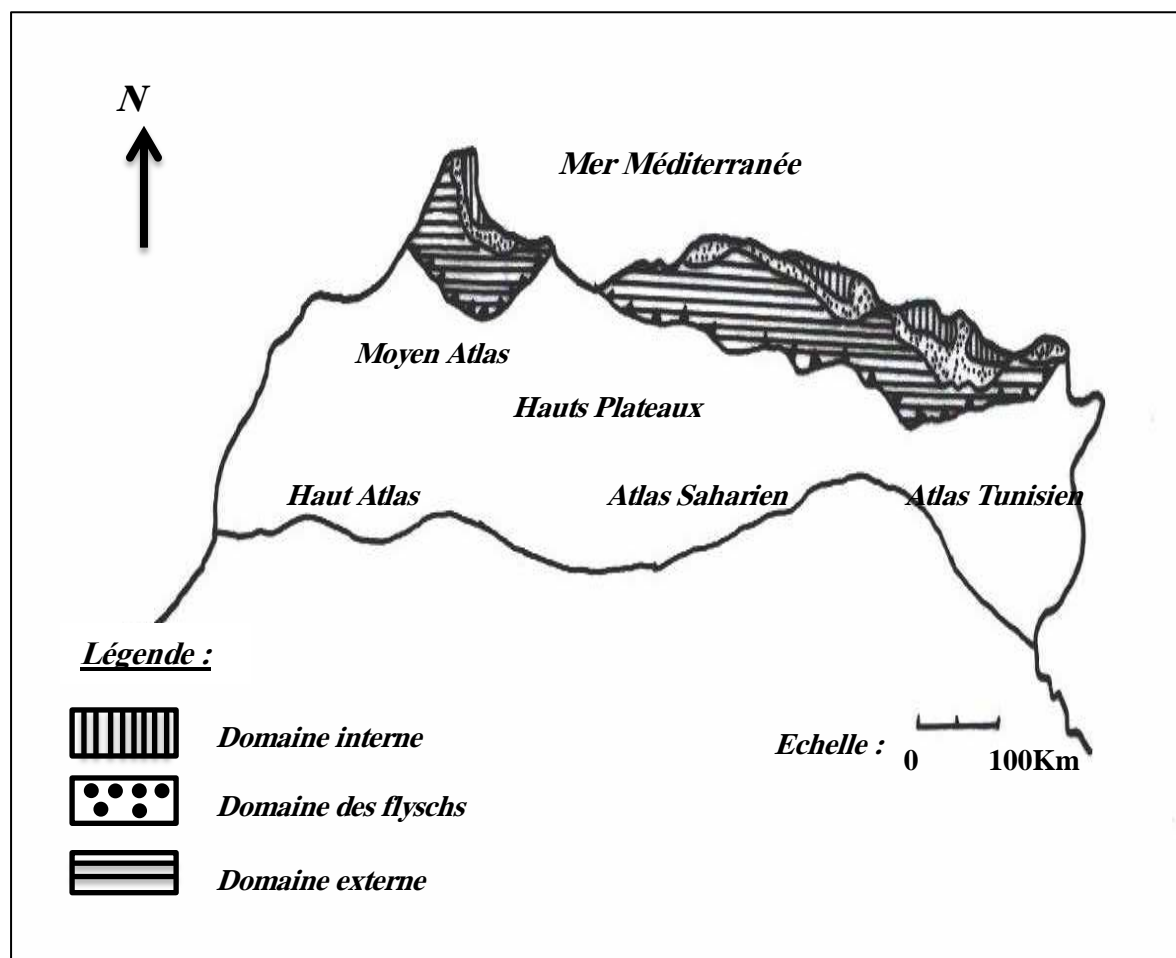


Fig n°2.5: Schéma structurale des Maghrebides (D'après M. Durand Delga et J.M.Fondoté 1980).

Le cadre structural du bassin est défini du Nord au Sud par la superposition de plusieurs unités qui sont :

- 1/ Le domaine interne : le socle kabyle, la dorsale calcaire.
- 2/ Le domaine médian : le domaine des flyschs.
- 3/ Le domaine externe : les séries telliennes.

2.3.1.1. Domaine interne :

2.3.1.1.1. Socle kabyle (Paléozoïque) :

On désigne à la suite de J.F.Raoult (1974), toutes les formations paléozoïques qui servent ou qui ont servi de substratum à la chaîne calcaire. Le socle Kabyle est constitué de trois ensembles superposés :

Deux ensembles métamorphiques et un ensemble principalement sédimentaire d'âge paléozoïque, affirmé également par D. Delga (1967) qui a montré que le métamorphisme du socle est antérieur au Silurien et que le socle est charrié avec une flèche de 30 Km environ sur les terrains mésozoïques et cénozoïques qui affleurent :

- En position diapirique à travers le socle à l'Ouest du terrain près d'Ain Kechra.
- De Stora jusqu'au col de Staiha.
 - Au Nord Est du terrain apparaît Djebel Safia (ultra tellien) en fenêtre sous le socle Kabyle d'après .D. Delga, (1967) ; J.F. Raoult (1974) et M. Villa (1980).
 - La même constatation a été affirmée par d'autres auteurs concernant Djebel Filfla toujours au Nord-Est du terrain.
 - Le socle kabyle affleure aussi au Sud d'El Harrouch et au Nord-Est de Ain Bouziane où il sert de base aux séries Eocène (grès et conglomérats).
 - Et d'après J. D. Bouillin (1977), on le constate au Sud du terrain dans la chaîne numidique où il sert de base aux séries mésozoïques et cénozoïques calcaires de Kef Toumiette, Djebel Bouabed, Kef Msouna, et Kef Sebergoud.
 - L'unité kabyle allochtone est bien développée à l'Est et à l'Ouest de Skikda.

2.3.1.1.2. Chaîne calcaire ou la dorsale kabyle :(Mésozoïque, Cénozoïque)

Comme il est déjà indiqué, la dorsale kabyle est constituée essentiellement des formations carbonatées, dont la datation s'étend du Lias inférieur au Lutétien, développée sur près de 90 km d'Ouest en Est.

a) Chaîne calcaire interne :

Aperçue dans la limite Sud du terrain, dont la sédimentation des calcaires massifs a été interrompue par la phase tectonique du Lutétien supérieur et forme les entablements de Kef Sebergoud et Kef Msouna, dans lesquels s'est façonné un petit karst, remarqué également à Kef Toumiette Nord.

b) Chaîne calcaire médiane :

Se rencontre à la limite Sud du terrain Djebel Bouabed. Les formations de la chaîne calcaire médiane à microfaune pélagique ne favorisent pas la réalisation de belles formes karstiques contrairement à la chaîne calcaire interne.

c) Chaîne calcaire externe :

Elle se rencontre à Djebel El Ghédir en forme de plateau de direction NNW-SSE, c'est un anticlinal coffré, constitué par une forte épaisseur de calcaires massifs du Lias Inférieur de (100 à 400 m) et constitue la quasi-totalité de Djebel El Ghédir, dont la datation reste à définir. Cependant, sur les bordures du massif ils ont pu observer des formations détritiques du nummulitique qui repose en discordance sur les calcaires. Par ailleurs, la même constatation concernant les mêmes formations a été montrée à Kef Msouna, Sebergoud et Kef Toumiette Sud. Donc, il existe les restes d'une surface

d'érosion d'âges nummulitique, qui a tronqué les sommets de la chaîne calcaire et nous explique la présence de surface plane sur ces massifs.

Au niveau de Kef Toumienne Sud et Sidi Driss ne permet pas d'attribuer ces calcaires à l'une des sous zone suscitée grâce au plan géomorphologique et le net développement du karst de Djebel Sidi Driss, on peut l'attribuer à la zone externe dont le Lais joue le rôle principale.

La zone externe constitue une zone de transition entre les flyschs mauritaniens et le domaine interne.

2.3.1.2. Domaine des flyschs :

Le flysch est caractérisé par des formations abyssales mises en place par des courants de turbidités ces formations ont été divisées en trois :

a) Flysch Mauritanien :

D'âge Néocomien - Lutétien, il existe en continuité avec la chaîne calcaire externe, jusqu' à présent il est difficile d'établir une nette coupure entre ce dernier et la zone externe.

Il est observable sur le versant Nord du Djebel Sidi Driss, riche de grès Albo - Aptien qui diminue, et laisse la place au bassin de Sidi Mezghich, creusé essentiellement dans les roches tendres ceci se traduit directement sur le paysage.

Le flysch mauritanien étant le plus rependue, est dominé par des calcaires microbréchiques renfermant des bancs de grès et des couches d'argiles, il affleure au Nord de Ain Bouziane et au Nord de Kef Hahouner.

b) Flysch Massilien :

Il est représenté de bas en haut par des flyschs argilo- quartziques de l'Albo-Aptien, brèches phtanites et des flyschs à micro brèches du Sénonien qui affleure sur de faibles étendues au Sud-Ouest de Kef Toumienne au Sud du barrage de Zerdézas et sur le versant Nord de Djebel Sidi Driss et au col d'El Kantour, présenté par des bancs durs (grès et calcaire) très minces qui n'empêchent pas l'érosion de ces matériaux, dans lesquels se développent toutes les formes de glissement et de ravinement.

Le flysch Massilien présente une zone de transition entre le domaine des flyschs et le domaine externe des séries Telliennes.

c) Flysch Numidien (Oligocène moyen- Burdugalien) :

La nappe numidienne occupe les sommets des trois domaines cités dans cette partie, elle affleure au niveau de Zerdézas, et constitue toutes les collines qui s'étend au

ped de Kef Toumiette, celles qui sont entre le col des Oliviers et le Djebel Bougrina, au Kef Toumiette à Djebel Bouabed, vers l'Est autour du Djebel Tassellement et Tengout, ainsi qu'au niveau de la plupart des Koudiats au centre du bassin qui sont caractérisées par des séries gréseuses et des argiles sous numidiennes, on les a souvent appelées séries molassiques.

Il existe aussi dans la chaîne numidique, dans la région d'El Harrouch (Djebel Boussatour et Djebel Bougrina) et aussi à Sidi Mezghich où le phénomène de glissement et de ravinement est spectaculaire, nous rencontrons des alternances des roches dures et roches tendres.

2.3.1.3. Domaine externe :

Les séries telliennes sont des séries épaisses à dominances marneuses.

a) Séries ultra telliennes :

Elles se caractérisent par un faciès essentiellement marneux avec quelques bancs de calcaire, ce qui donne des reliefs en général mous où les formes de glissement sont nombreuses, donc la position de ces bancs calcaireux sur les formations tendres donnent des escarpements qui sont poussés par le phénomène d'érosion, la superposition des roches tendres et roches dures apparaît au Kef Sidi Driss et Djebel Safia.

b) Séries telliennes :

Elles sont inexistantes dans le tell oriental, donc elles ne sont pas présentées dans notre terrain.

c) Séries péni telliennes :

Caractérisées par un faciès carbonaté attribuée auparavant aux monts néritiques Constantinois.

2.3.1.4. Néritique constantinois (Jurassique- Crétacé supérieur) :

Selon J.F. Raoult (1974), cette unité correspond à un ensemble monoclinale dirigé vers le Nord-Ouest, s'étend sur près de 160 Km d'Est en Ouest et de 80Km du Nord vers le Sud, constituée essentiellement par des formations carbonatées épaisses, affleurent au Kef Hahouner dont la base est dolomitique.

Cet aperçu structural nous a permis d'avoir une idée globale sur la position des différentes formations géologiques l'une par rapport à l'autre, ainsi que leur extension dans l'espace et dans le temps.

- Elle renseigne sur le phénomène de glissement dans la région de Djebel Sidi Driss et Sidi Mezghich.

- Peut apporter quelques renseignements sur la datation.

Elle va compléter l'étude de la tectonique ainsi que l'étude hydrogéologique : la détermination des formations susceptibles d'être aquifère, citant par exemple Kef Toumiette Nord où se développe des formes karstiques (chaîne calcaire interne) sur le socle imperméable métamorphique (d'après J. P. Bouillin 1977).

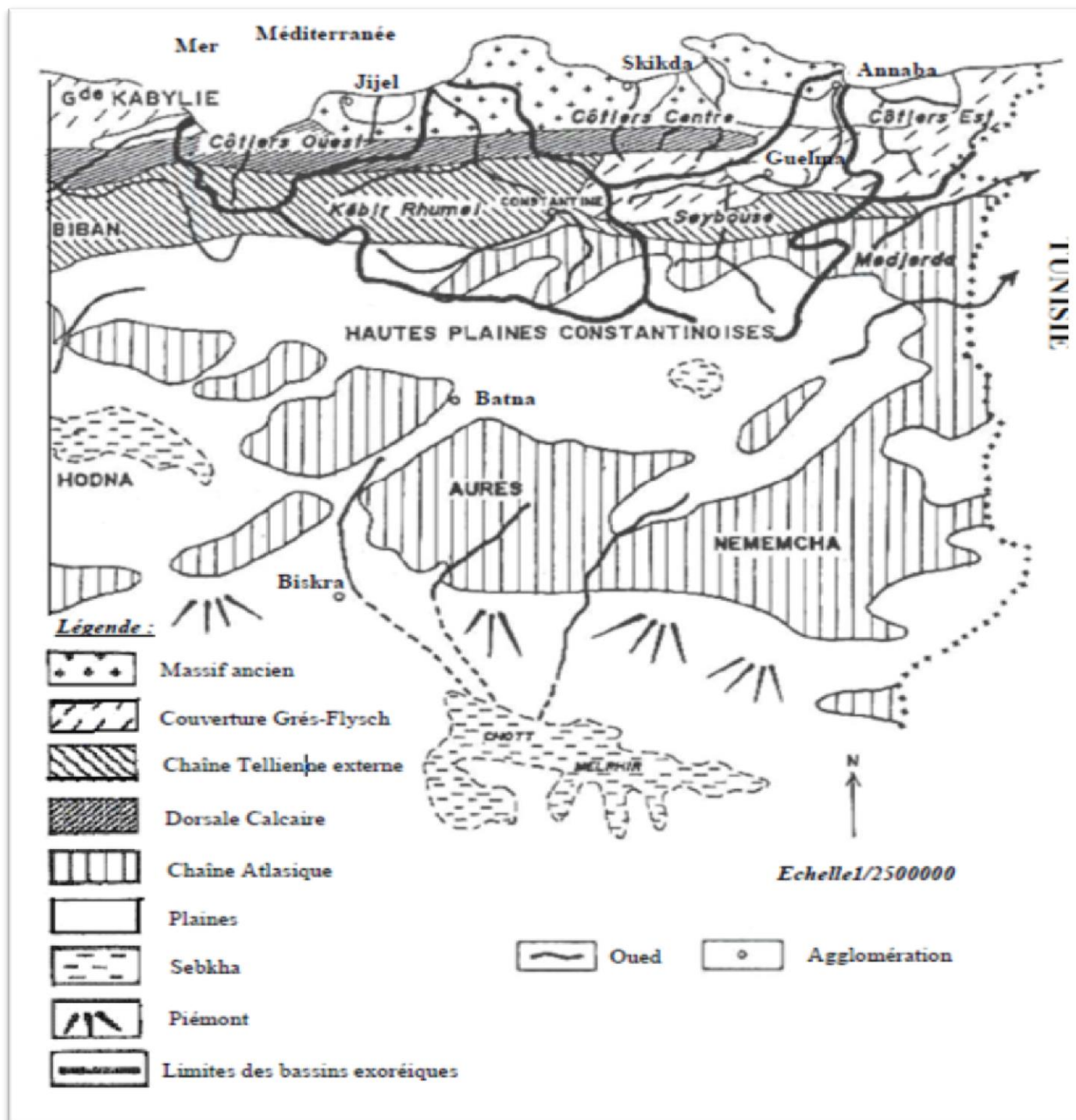


Fig n°2.6 : Ensembles morfo structuraux et bassins hydrologiques de l'Est Algérien
(d'après : M.Cote) ;(Kemoukh, 2006).

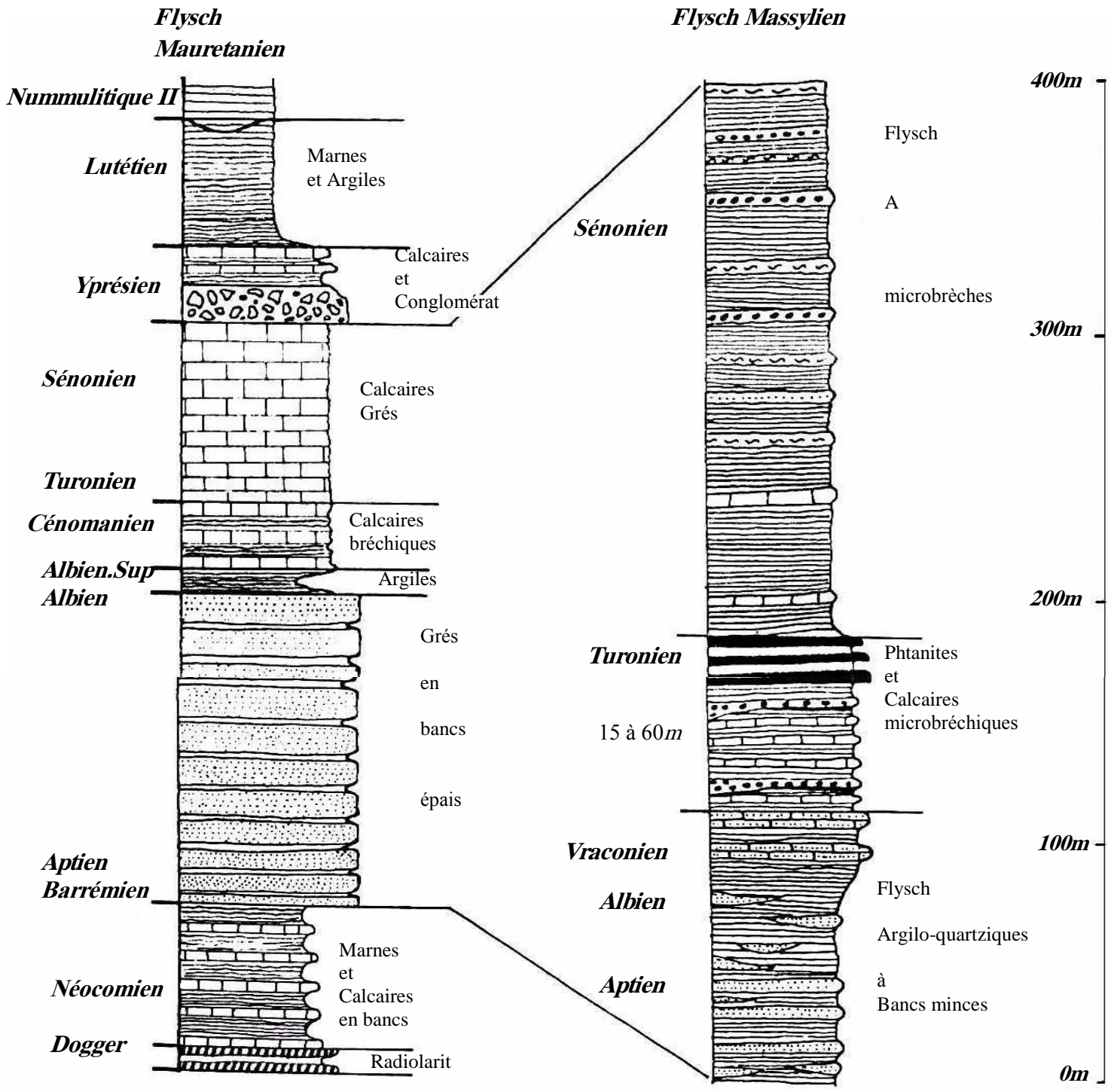


Fig n°2.7 : Colonnes Stratigraphiques Synthétiques des séries du flysch Mauretanic et Flysch Massylien (d'après J.F.Raoult. 1974).

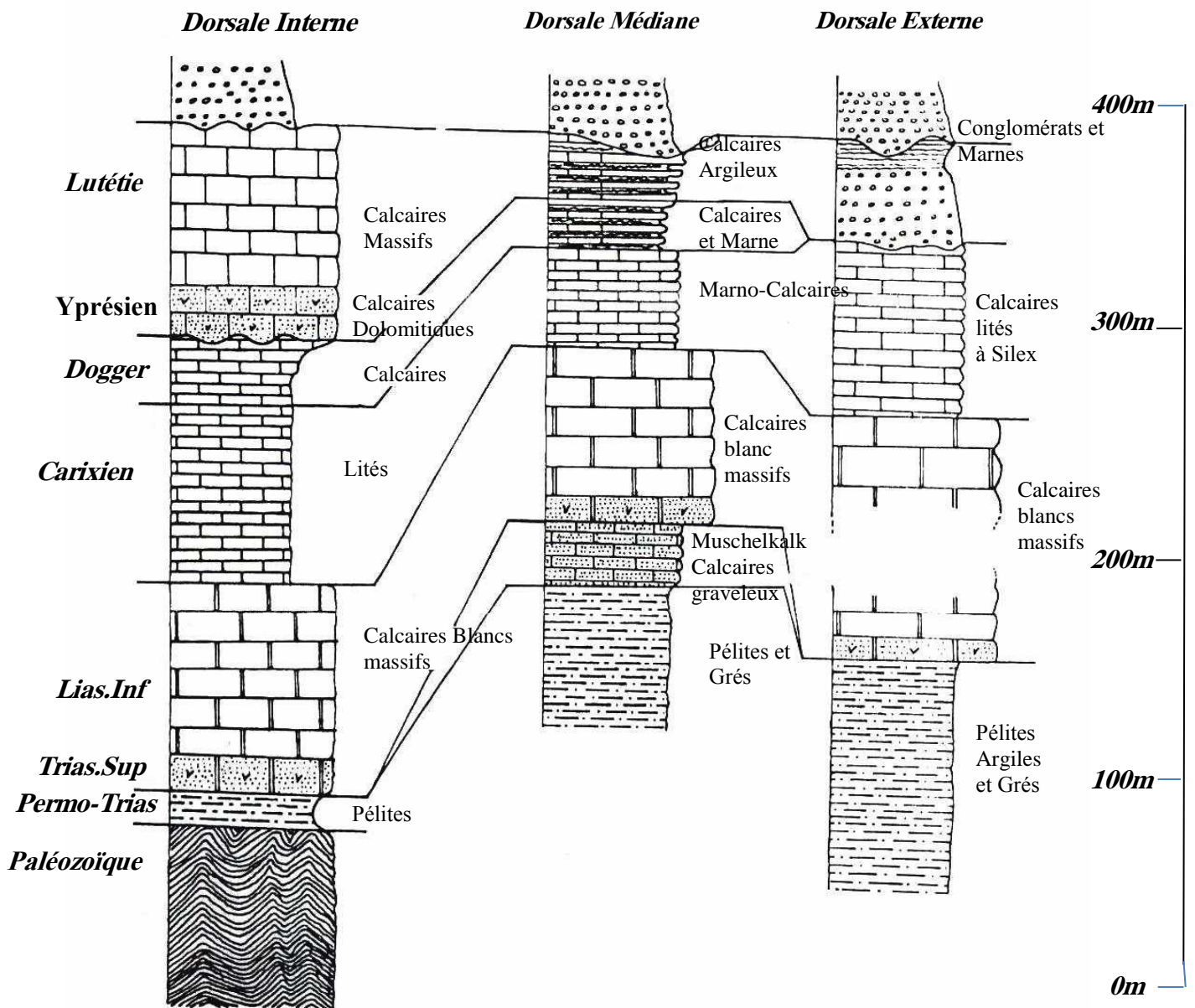


Fig n°2.8 : Colonnes Stratigraphiques Synthétiques de la Chaîne Calcaire
(d'après J.F. Raoult, 1974).

2.3.2. Classification des formations géologiques selon leurs intérêts hydrogéologiques :

Selon leurs appartenances lithologiques, les formations géologiques sont définies par des caractéristiques hydrogéologiques différentes, leur participation à l'alimentation des nappes souterraines et leur capacité d'emmagasiner des eaux est en fonction de leur perméabilité et leur épaisseur.

A partir de la nature lithologique du bassin nous avons identifié deux types de formations.

3.2.1. Formations favorables au développement d'aquifères : deux types

3.2.1.1. Formations favorables au développement d'aquifères poreux :

Ce sont des formations caractérisées par une perméabilité, comportant des vides interstitiels interconnectés, assimilables macroscopiquement à un milieu homogène et continu.

a) Formations du Quaternaires :

1. Alluvions :

On distingue trois types:

- Alluvions actuels: limons du lit majeur de Saf-Saf, de Zeramna et de la plaine marécageuse formée par le confluent de ces deux oueds, représentées par des sables, des limons du lit moyen et des sables des plages.
- Alluvions récentes : d'âge Néoplatonicien, ce sont des limons et des cailloux roulés du fond des vallées.
- Alluvions ancienne :
 - Pléistocène récent: Ce sont des terrasses de Limon et de cailloux roulés qui drainent de 15 à 20 m le lit de l'oued Saf-Saf et Zeramna.
 - Pléistocène ancien: représentées par des terrasses de Limon et cailloux roulés qui drainent 30 à 50 m le talweg du Saf-Saf à El Harrouch.

2. Dunes anciennes :

Rencontrées au Nord-Est de la plaine de Skikda le long de la côte. Elles sont constituées de trois niveaux (inférieur, moyen et supérieur).

- Niveau inférieur : atteint une altitude de 40 à 50 m, découpé par les alluvions récentes du Saf-Saf.
- Niveau moyen : s'élève jusqu' à 80 m il est découpé par les alluvions anciennes.

- Niveau supérieur : est développé sur les schistes paléozoïques, Ceci est observé en plein forêt de Djebel El Alia dans la partie Nord-Est du secteur d'étude.

b) Formations du Tertiaire :

1) Sables argileux :

Rencontrés au Nord de Salah Bouchaour et à l'Est de Emjez Eddchich, représente le terme supérieur la série Nummulitique de la région, avec des sables argileux jaunes ou gris.

2) Grés Numidiens :

Ce sont des grés jaunâtres à grains fins, ils sont présents à divers niveaux des minces lits argileux sableux, ce faciès gréseux prédomine au Djebel Tfifra, à Ramdane Djamel à l'Est du bassin vers Kef Serrak.

3) Grés et poudings :

Les poudings sont formés de cailloux roulés de micaschistes, de gneiss et surtout de quartz filonien ou s'intercalent les assises gréseuses ou argileuses, la puissance de l'ensemble varie de 10 à 50m et il est bien développé au niveau de Dj Soubouyou, à machtat Sidi Amar au Nord-Ouest de l'oued Aneur au Sud d'El Hadaïek.

4) Grés quartzeux :

Développés au niveau de Djebel Sensnou au Sud et au Sud-Ouest du barrage de Zerdézas.

5) Argiles et grés :

Ce faciès prédomine au niveau du barrage de Zerdézas.

6) Grés et conglomérats :

Existents à Koudiat El Fedjel à l'Est d'El Harrouch, Ce sont des grés jaunâtres et rougeâtres, souvent micacés intercalés de lits argileux et à la base des bancs de poudings.

3.2.1.2. Formations favorables au développement d'aquifères Karstiques :

Elles sont caractérisées par une perméabilité en grand, et une lithologie différente du milieu poreux. Ces formations sont essentiellement carbonatées. Elles constituent un milieu hétérogène et discontinu où l'eau s'écoule à travers un réseau de fissures ouvertes interconnectées (conduite Karstique) à fonction collectrice ou distributrice avec l'existence possible de cavités de grande capacité.

a. Calcaires à nummulites :

Développés au niveau de Kef Sebergoud, de Kef Msouna et au Nord et Sud de Kef Toumiette.

b. Argiles gréseuses et calcaire :

Ce sont des argiles brunes ou rosâtres qui renferment des alternances de grés jaunes, de calcaires gréseux à nummulites et de brèches à petits éléments.

c. Marnes et calcaires :

Développés au Sud de Kef Toumiette.

d. Calcaires liasiques :

Ils sont importants au niveau de Djebel El Ghédir, ce sont de gros bancs à stratification difficilement discernable.

e. Calcaires dolomitiques :

Ils sont Développés au niveau de Djebel Tasselment et Djebel Tengout à l'Est du bassin. Ces formations carbonatées d'âge Jurassique ont été reconnues de l'ensemble carbonaté est de 250 m.

f. Calcaires cristallins (cipolins) :

Ils sont formés essentiellement par des lentilles peu importantes bleuâtres, ils se trouvent au Nord-Ouest du bassin. Ce type de formations géologiques facilite le ruissellement des eaux de surface. Ces eaux se dirigent vers les chaabats et les oueds qui vont à leur tour participer à l'alimentation de la nappe souterraine.

Les formations perméables occupent plus de 50% de la superficie totale du bassin. Grâce à la perméabilité de ces formations géologiques, les eaux de précipitations s'infiltrent à travers des pores pour l'alimentation et le renouvellement des eaux souterraines.

3.2.2. Formations non favorables au développement d'aquifères :

a. Argiles noires :

Ce sont de minces lits de grés jaunes qui constituent le passage graduel des argiles noires au grès numidien, trouvées dans la partie Sud vers El-Harrouch à Emdjez Edchich et au Sud de Ain Bouziane, à l'Est et l'Ouest de Ramdane Djamel, et à l'Est et l'Ouest de Salah Bouchaour.

b. Formations métamorphiques des terrains primaires :

1) Schistes et phyllades :

Ce sont des grès bleuâtres, argileux ou satinés, recourent de nombreux filonnets, souvent lenticulaires de quartz laiteux, ces roches constituent une grande partie de Djebel El Alia et Djebel Oyala à l'Est et à l'Ouest de Skikda, on les trouve aussi au Sud de Skikda à Djebel Greibissa et à Kef Msouna où leur présence est quasi totale.

2) Schistes micacés :

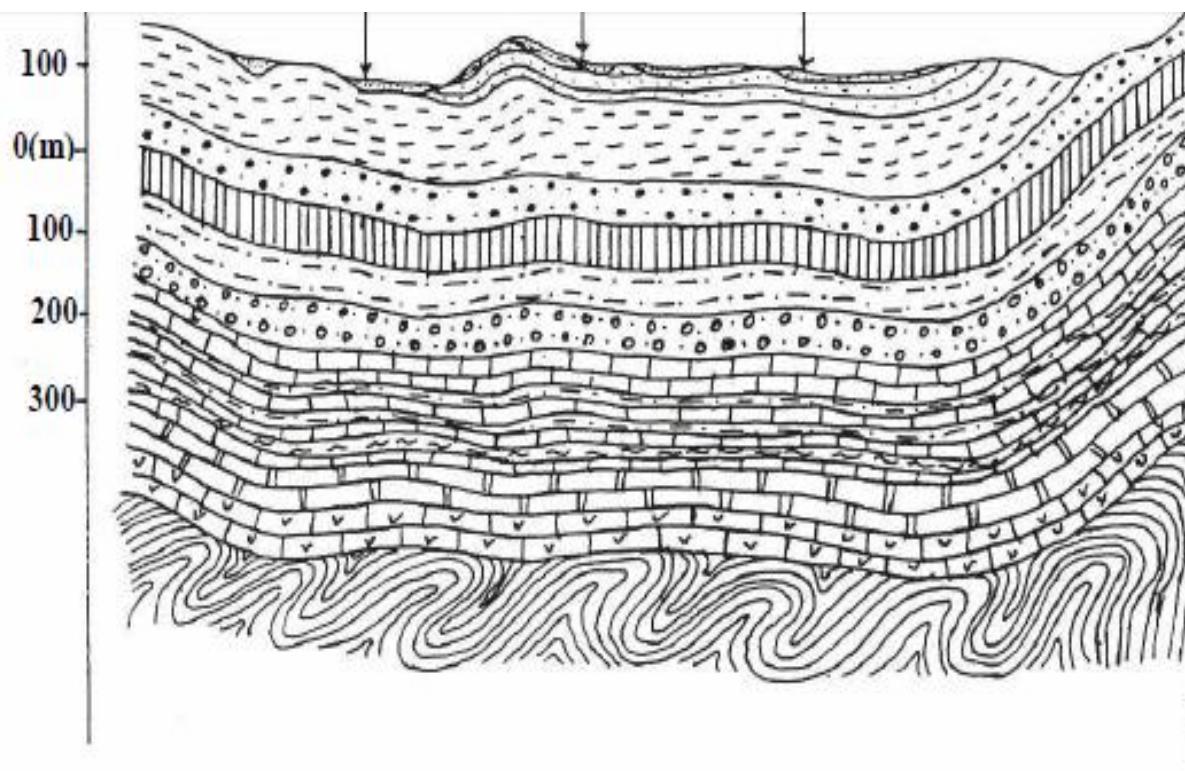
C'est le passage des schistes argileux aux micaschistes et gneiss schisteux, se retrouvent au Nord de Sidi Mezghiche et au niveau de l'oued Zeramna.

3) Schistes granulitisés (gneiss) :

Présentent la texture des gneiss ocellés, mais ils sont liés aux schistes dont ils se distinguent par la présence de nombreux cristaux de feldspath, Cette formation se localise au niveau de Djebel El Alia, au Nord-Est et au Nord-Ouest du bassin.

4) Micaschistes granulitisés (gneiss schisteux) :

Les gneiss schisteux alternant parfois avec des micaschistes, ils forment un passage du vrai gneiss au micaschiste, ils se trouvent au Nord -Ouest du terrain au niveau du Djebel Messiquéne.



Légende :

Terrains Sédimentaires :

	: Alluvions actuelles		: Grès et Quartzites
	: Alluvions récentes		: Argiles et Grès
	: Alluvions anciennes des vallées		: Grès et conglomérats
	: Alluvions anciennes		: Calcaires à Nummulites
	: Dunes anciennes		: Argiles, Grès et Calcaires
	: Sables argileux		: Marnes et Calcaires
	: Grès Numidiens		: Calcaires Liasiques
	: Argiles noires		: Calcaires Dolomitiques
	: Grès et poudingues		

Terrains Métamorphiques :

	: Schistes et Phyllades
	: Schistes micacés
	: Schistes granulitisés (Gneiss)
	: Micaschistes granulitisés (Gneiss schisteux)
	: Socle plissé

Fig n° 2.9 : Coupe Géologique Schématique (WSW-ENE) (Kemoukh; 2006).

3.3. Tectonique du bassin :

La tectonique joue un rôle très important pour l'alimentation des aquifères, car elle favorise la circulation des eaux à l'intérieur des formations par des failles, fissures, et diaclases; Celles-ci constituent des directions préférentielles de l'écoulement de l'eau.

La carte géologique du terrain étudié établie par Joleaud (1912), raison pour laquelle ne nous est impossible de bien déterminer les accidents affectant la région.

Mais grâce aux travaux de quelques auteurs tel que A. Marre et J.F. Raoult (1974) qui ont parlé de mouvements tectoniques précoces (d'âge Crétacé Paléocène).

La localisation du terrain au Nord-Est de l'Algérie, nous laisse évoquer les deux phases tectoniques majeures, qui ont affecté la région d'étude :

- La phase Atlasique (fini lutétienne) ; qui est des mouvements compressifs d'orientation Nord-Ouest, Sud-Est caractérisés par une tectonique tangentielle post paléogène.
- La phase Alpine (Miocène) ; ce sont des mouvements compressifs d'orientation Nord-Sud caractérisés par de nombreux plis et failles.

Ces deux phases majeures ont laissé leurs traces sous forme de déformations tectoniques à la périphérie du bassin versant, où l'Est est affecté par une cassure profonde de direction Est- Ouest qui a donné naissance à Djebel Filfila.

Au Sud vers Kef Sebergoud, M'souna et Kef Toumiette Nord, ces formations carbonatées de la chaîne calcaire interne présentent des entablements dans lesquels se façonnent des formes Karstiques (présence de fissures d'orientation Nord-Est, Sud-Ouest causées par la phase Atlasique) tiré du cadre structurale (domaine interne). A l'Ouest de Skikda et précisément au Sud-Ouest de Stora on rencontre les calcaires cristallins emballés dans les micaschistes et gneiss, résultat d'une dislocation très importante en relation avec le charriage de la chaîne Numidique, qui a donné le grand pli de la petite Kabylie d'orientation NNE - SSW.

La dépression Numidique de Ramdane Djamel occupe une partie considérable de la région, et forme une aire synclinale de 20 Km entre le massif Paléozoïque de Skikda au Nord et le chaînon Liasico-Eocène de Zerdézas au Sud.

3.4. Paléogéographie du bassin :

3.4.1. Longue période de sédimentation du Secondaire au Tertiaire :

On note que la différenciation de chacun de ces domaines s'est faite progressivement au cours de l'histoire géologique, d'abords peut distincts les uns des

autres. Vers la fin du Jurassique et au Crétacé, le sillon des flyschs et des séries telliennes s'individualise pour s'atténuer un peu plus tard.

a. Trias :

La reconstitution de la stratigraphie dans la région tellienne est plus délicate car les affleurements sont plus rares. Mais par suite de la présence d'intercalations volcaniques basiques témoin d'une certaine distension.

Ainsi pendant le Trias, au Sud du socle kabyle, l'individualisation des sillons (flyschs et telliens) n'existe pas encore.

b. Jurassique :

Le Lias est connu essentiellement dans la chaîne calcaire.

1. Lias supérieur :

Les distinctions paléogéographiques sont plus délicates, c'était un milieu marin avec une sédimentation marneuse.

2. Malm :

Il n'y a pas de modification paléogéographique, mais on peut noter une généralisation des faciès pélagiques témoins d'un approfondissement de la mer ; pourtant c'est à ce moment qu'une distension va déterminer la création du sillon des flyschs qui s'individualisera nettement au Crétacé.

c. Crétacé :

On note que la structure préparée au Jurassique s'affirme, donc le sillon des flyschs des séries telliennes s'individualise au Néocomien. Le sillon des flyschs s'individualise plus par surélévation de ses bordures allant jusqu'à l'émersion sur la partie Sud que par approfondissement de la mer, il est conséquence de la phase tectonique de distension.

A la fin du Néocomien au Vraconien, s'étend une période de sédimentation dans la chaîne calcaire, marquée par la présence d'une lacune sédimentaire à l'Aptien.

Au Sud, le domaine tellien et ultra tellien était immergé durant tout le crétacé inférieur. Dans le sillon des flyschs, on note la présence d'une sédimentation gréseuse de l'Albo-Aptien. Le Sénonien est marqué par une transgression marine.

2.3.4.2. Mise en place des volumes montagneux de la fin du Tertiaire :

La fin du Sénonien et le début du Tertiaire est marquée par une phase tectonique, s'est au Miocène inférieur (Burdigalien inférieur) que la dernière nappe s'est mise en place par un glissement à la fin du Miocène inférieur, on assiste à l'émersion

progressive du Tell. En effet les seuls dépôts miocènes observables sont au Nord du tell à (Emdjez Edchich). Dès la fin du Burdigalien, on observe un jeu d'accidents tectoniques accompagné par un volcanisme acide (Collo, Cap de Fer)

Au Messénien, le niveau de la mer méditerranée baisse fortement, c'est alors qu'on observe un important creusement des vallées sur le versant Nord et un très important dépôt de conglomérats dans tous les bassins internes, dont les failles bordières jouent en distension.

Au Pliocène, la mer revient et dépose des sédiments littoraux qui se présente à la base des marnes bleues et deviennent de plus en plus sableuses en se déterminant par des calcaires lacustres, pouvant être attribuées au Villafranchien inférieur.

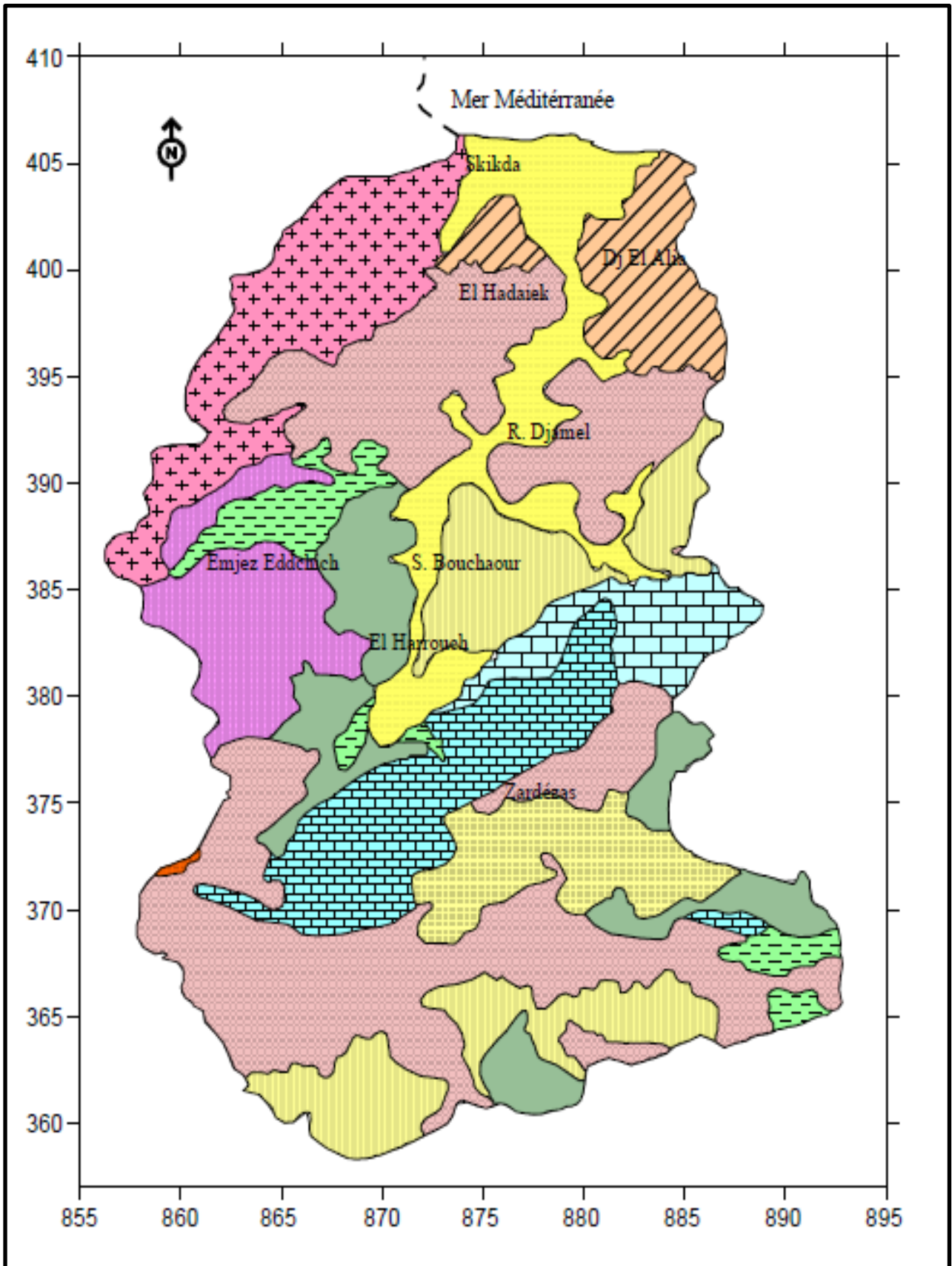
Aujourd'hui ces dépôts sont observables à des altitudes variées issues des mouvements sorogéniques importants, d'âge Plio-Villafranchien, responsables du volume montagneux du tell oriental algérien.

Le Villafranchien inférieur a hérité d'une importante sédimentation lacustre (calcaireuse) développée dans des lacs largement comblés sous une lame d'eau qui va en s'amincissant et provoquant un climat sec, évoluant dans cette région. Cette aridité provoque une désorganisation du réseau hydrographique déjà montré par J. Dresch (1950).

Les mouvements sorogéniques Plio-villafranchiens, provoquent une reprise du creusement, et ne laissent, qu'un petit bassin versant à l'oued Saf-Saf, le réseau hydrographique des grands oueds telliens s'est donc surimposé mais il est aussi antérieur par rapport aux derniers mouvements orogéniques Plio-villafranchiens. Donc la structure actuelle du bassin de l'oued Saf-Saf, est due aux effets de la néotectonique.

2.3.4.3. Quaternaire :

Il est représenté aujourd'hui par des dunes anciennes, des alluvions, des oueds, des terrasses et des éboulis.



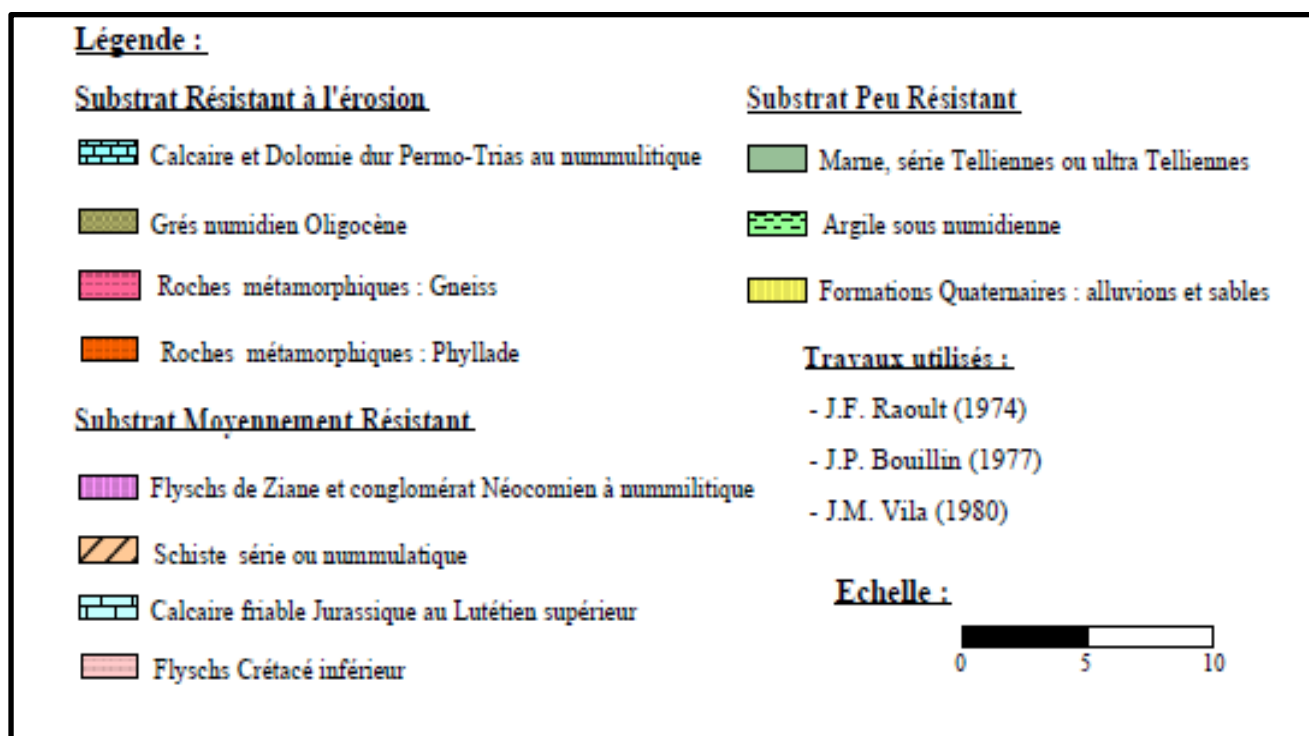
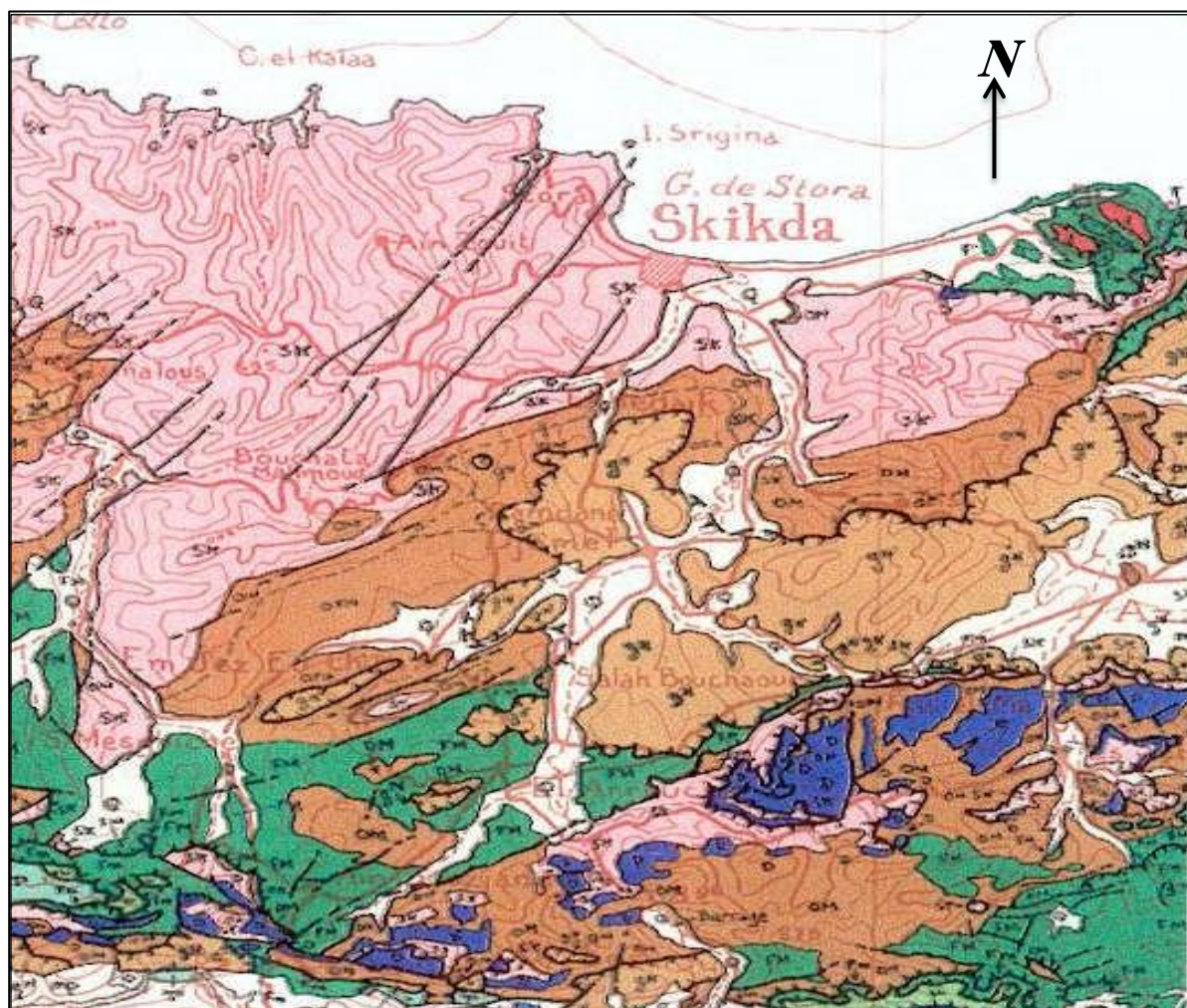


Fig n°2.10: Carte lithologique du bassin versant du Saf-Saf. (Khalfaoui.F, 2014).



Echelle : 0 500m

Légende :





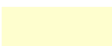



	Granites, grano-diorite, microgranites, Dolrites et rhyolites.		Grés numidiens et séries mixte.
	Oligo-Miocène Kabyle, Olistostromes à Flyschs resédimentés.		Flyschs Mauritaniens: séries Internes, Séries Médiannes, séries Externes.
	Quaternaire indifférencié (Villafranchien à actuel).		
	Chaîne calcaire: Paléozoïque à Lutétien.		
	Socle métamorphique de la Petite Kabyle.		
	Séries typiques (Néocomien à Lutétien supérieur) Marneuses et marno-calcaires à crétaé clair.		

Fig n°2.11 : Carte géologique de la région d'étude d'après la carte géologique de l'extrême Nord-Est Algérien (D'après J.M.VILA. 1978).

2.4 Contexte hydroclimatologique :

Plus que d'autres facteurs, le climat est le plus déterminant des ressources en eau. Les précipitations, les températures, le vent, l'humidité, l'évapotranspiration et d'autres phénomènes atmosphériques constituent le climat du bassin du Saf-Saf.

Ainsi, l'étude des possibilités de la maîtrise des ressources hydriques dans le bassin est extrêmement liée à ces phénomènes qui régissent les écoulements. Pour cela, il est très utile de faire l'approche hydroclimatique.

2.4 .1. Equipement hydro-pluviométrique du bassin :

Le bassin du Saf-Saf d'une superficie de 1158 km², disposait de 15 stations pluviométriques dont 10 fonctionnent à l'heure actuelle. Parmi ces dernières, nous avons retenu quatre (04) stations pour l'étude de façon à couvrir le bassin à différentes altitudes, dont la station de Skikda occupe l'aval du bassin, les deux stations de Ramdane Djamel et d'El Harrouch couvrent la partie centrale du bassin et la station de Zerdézas qui contrôle l'amont du bassin. Le choix de ces dernières est primordial pour arriver à une étude complète et significative concernant le diagnostic des ressources en eau dans le bassin.

Tab n°2.3 : Le tableau suivant présente les différentes stations fonctionnelles dans le bassin du Saf-Saf.

Le nom Station	X	Y	LON	LATI	Altitude moyenne (m)	Code de la station
Skikda	874,500	406,390	-	-	1,3	03.11.02
Ramdane	874,950	389,850	06°54'01''E	36°44'17''	45	03.09 .09
Djamel						
Emjez Ed	866,590	386,100	6°48'21''E	36°42'23''	100	03.09.08
Chich						
El	869,940	380,190	6°50'19''E	36°39'9''	137	03.09.06
Harrouch						
Zerdézas	875,750	373,600	06°54'01''E	36°35'22''	180	03.09 .03
Khémakhm	878,960	370,300	06°56'09''E	36°33'37''	628	03.09.01

Source : (Annuaire hydrogéologique de l'Algérie ANRH 2014).

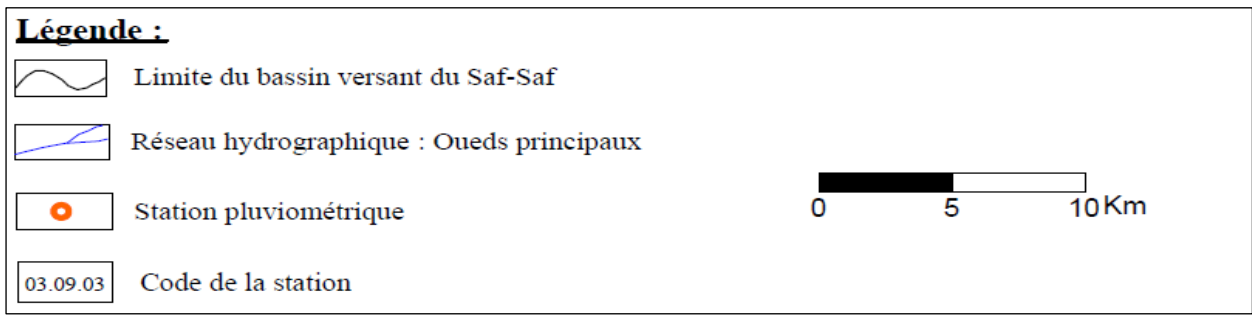
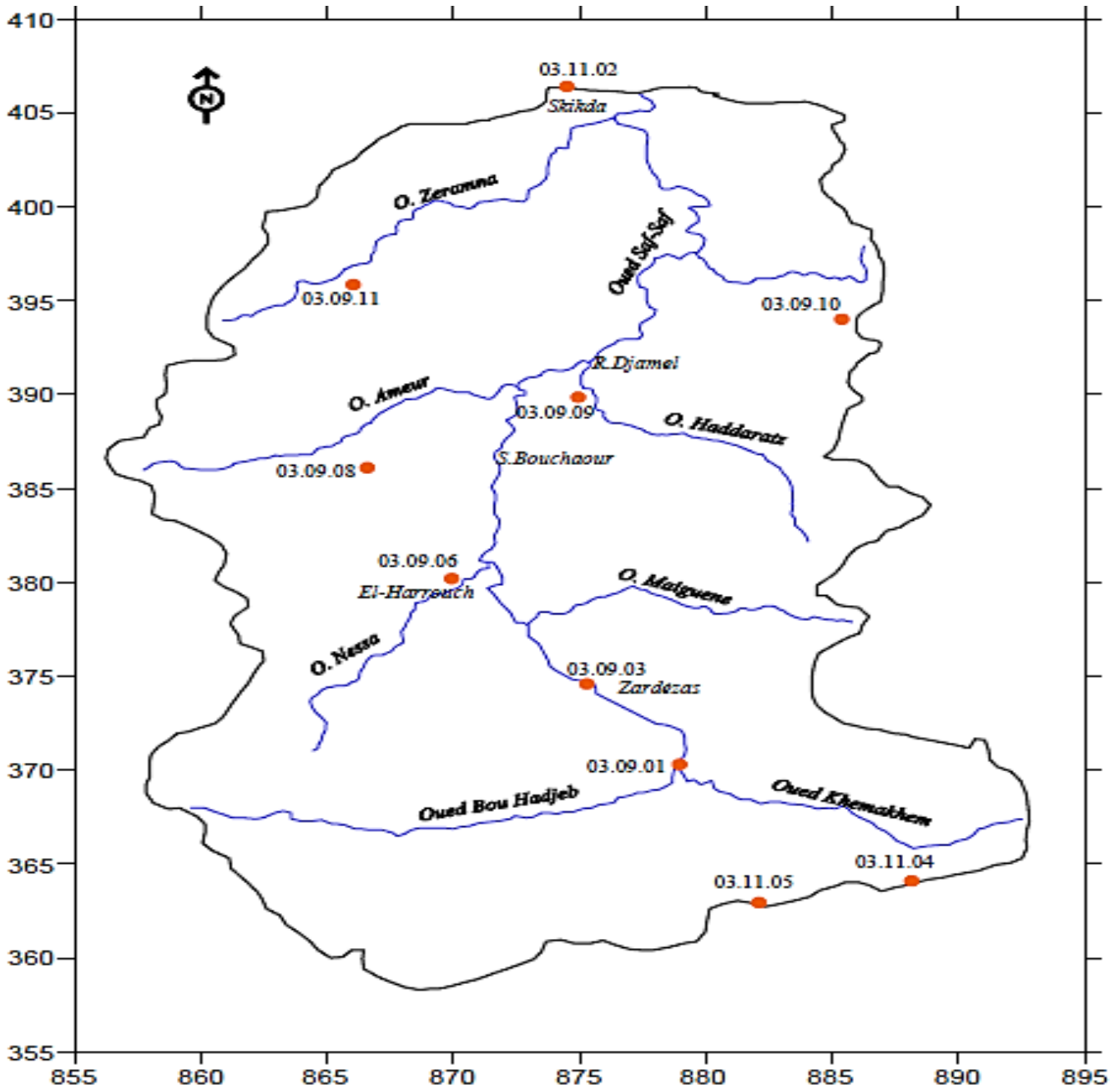


Fig n°2.12 : Carte du réseau d'observation pluviométrique dans le bassin du Saf-Saf (Khalfaoui, 2014).

2.4.1.1 Précipitations du barrage Zerdézas :

Les variations des précipitations annuelles entre 1970 et 2013 ont été obtenues après consultations des registres de la station météorologique du barrage (Source : ANRH Constantine, 2014). Les données sont représentées dans la figure suivante.

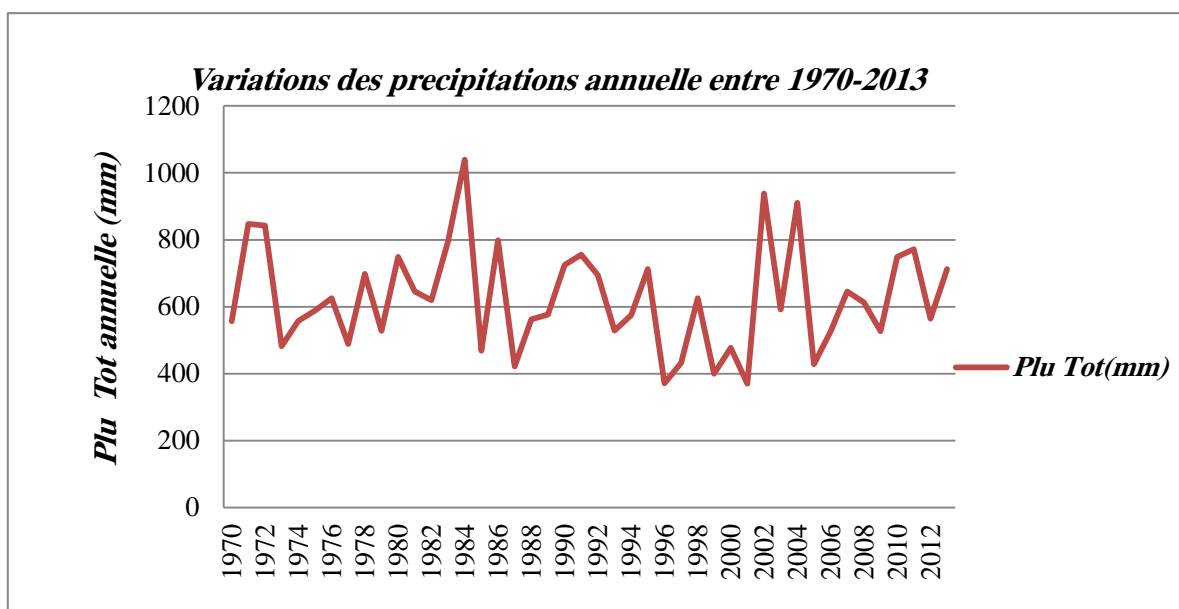


Fig n°2.13 : Variations des précipitations annuelles entre 1970 et 2013 dans la région du barrage Zerdézas.

Les variations annuelles des précipitations montrent une fluctuation, notamment la décennie 1980 -1990 et dans les années 2002-2004 où plus de 1000 mm d'eau sont tombés avec une moyenne de 800 mm.

2.4.1.2. Précipitations du barrage Guenitra :

Les variations des précipitations annuelles, entre 1970 et 2013, sont représentées sur la figure (n°2.14) laissant voir un pic enregistré en 1986 avec 1575,2 mm pour descendre à plus de 1000 mm et cela pour les années, 2002 et 2004. Pour les autres années, les fluctuations oscillent entre 400 et 800 mm.

Pour la période (1990-1996) sont pas disponible à cause des raisons de sécurité dans cette zone.

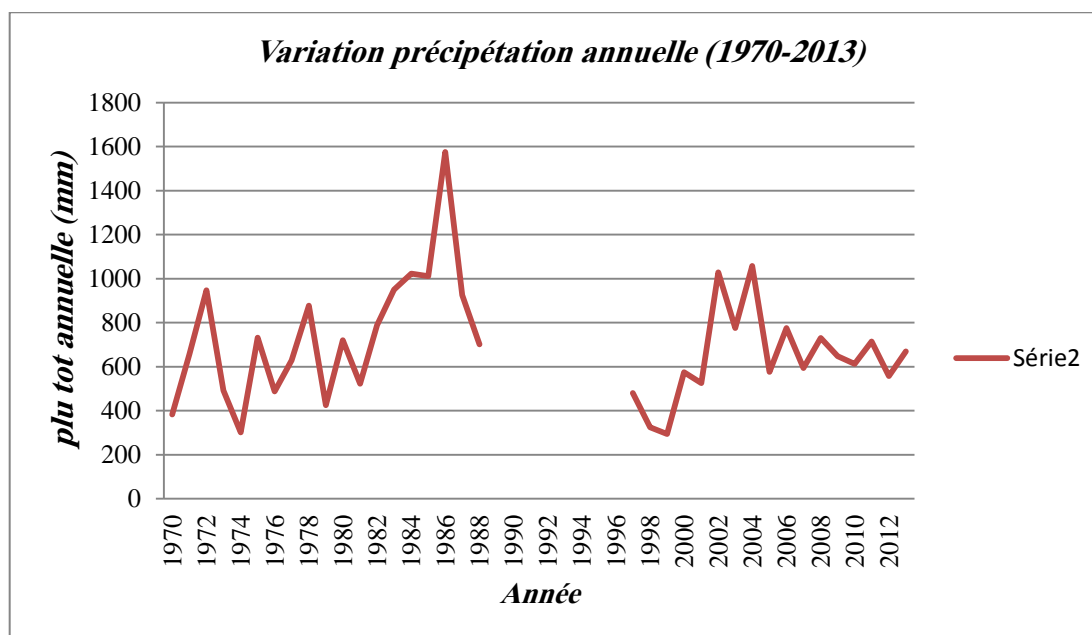


Fig n°2.14: Variations des précipitations annuelles entre 1970 et 2013 dans la région du barrage Guenitra.

2.4.1.3 Précipitations de la station Ramdane Djemel :

Les variations des précipitations annuelles, entre 1970 et 2013, sont représentées sur la figure (n°2.15) laissant voir un pic enregistré en 1984 avec 1028 mm pour descendre à plus de 800 mm et cela pour les années, 1986, 2002 et 2004. Pour les autres années, les fluctuations oscillent entre 400 et 800 mm.

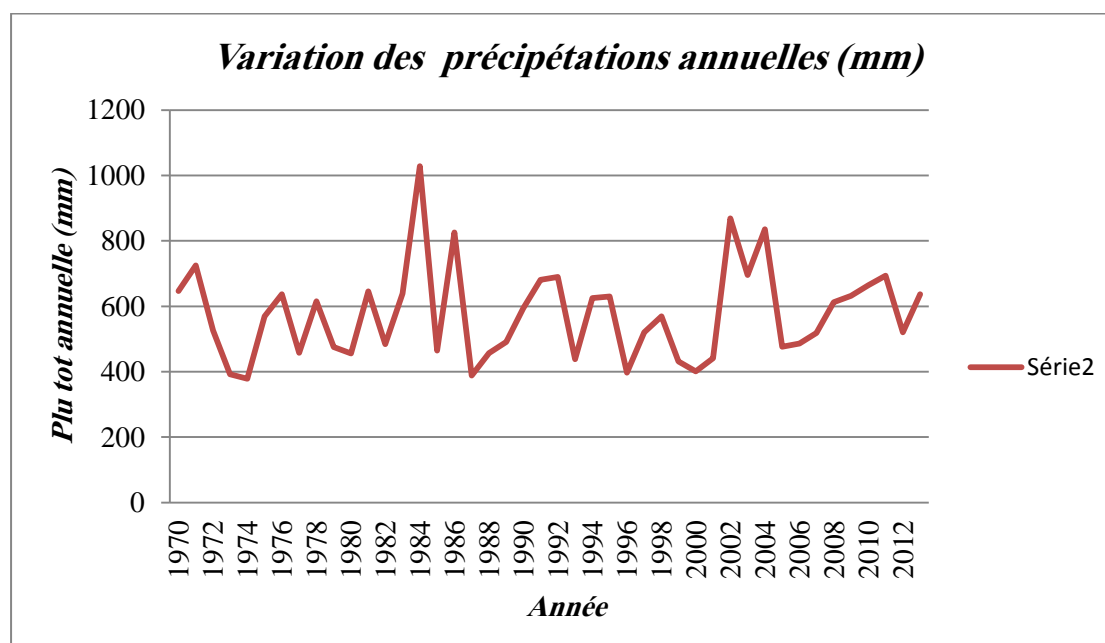
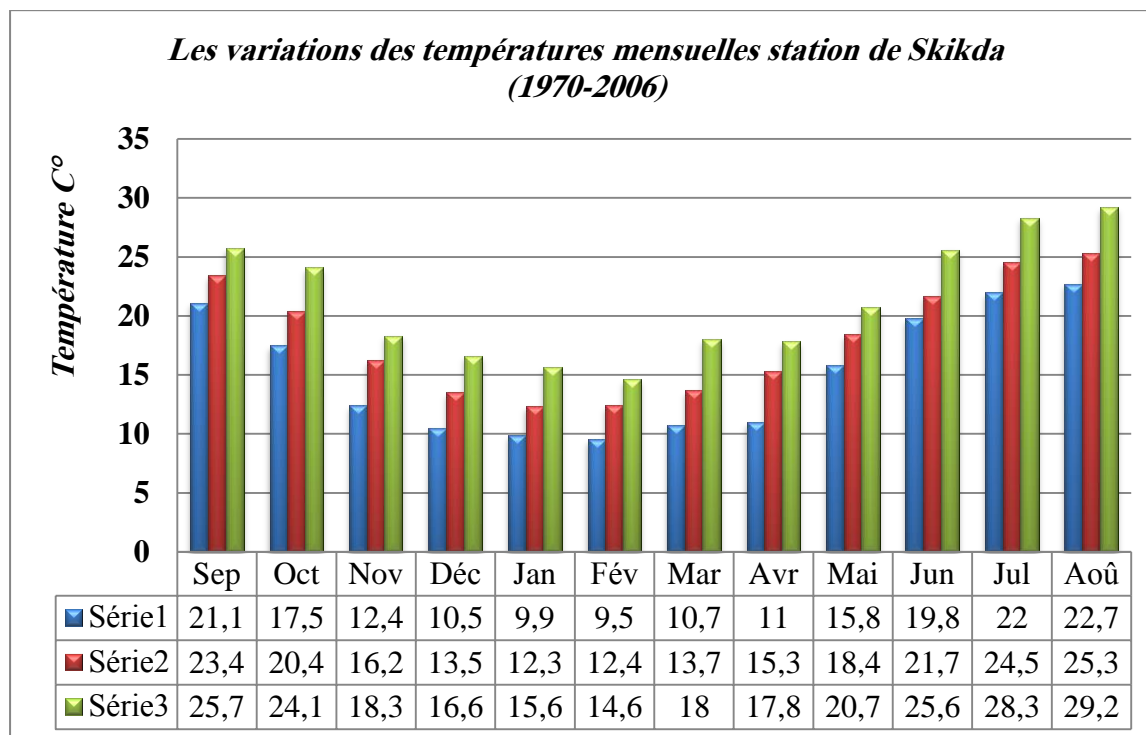


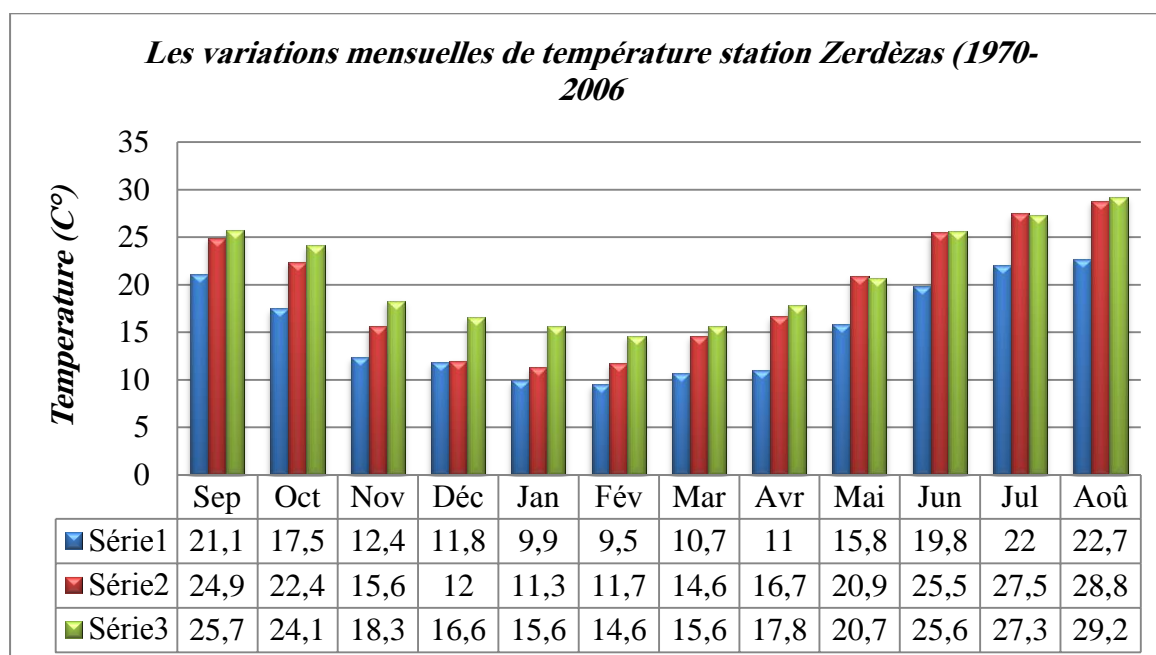
Fig n°2.15: Variations des précipitations annuelles entre 1970 et 2013 dans la région du la station Ramdane Djemel.

2.4.2 Température :

Dans le bassin du Saf-Saf, la température moyenne annuelle varie entre 18 et 19 °C. Pour les deux stations de Skikda et Zerdézas.

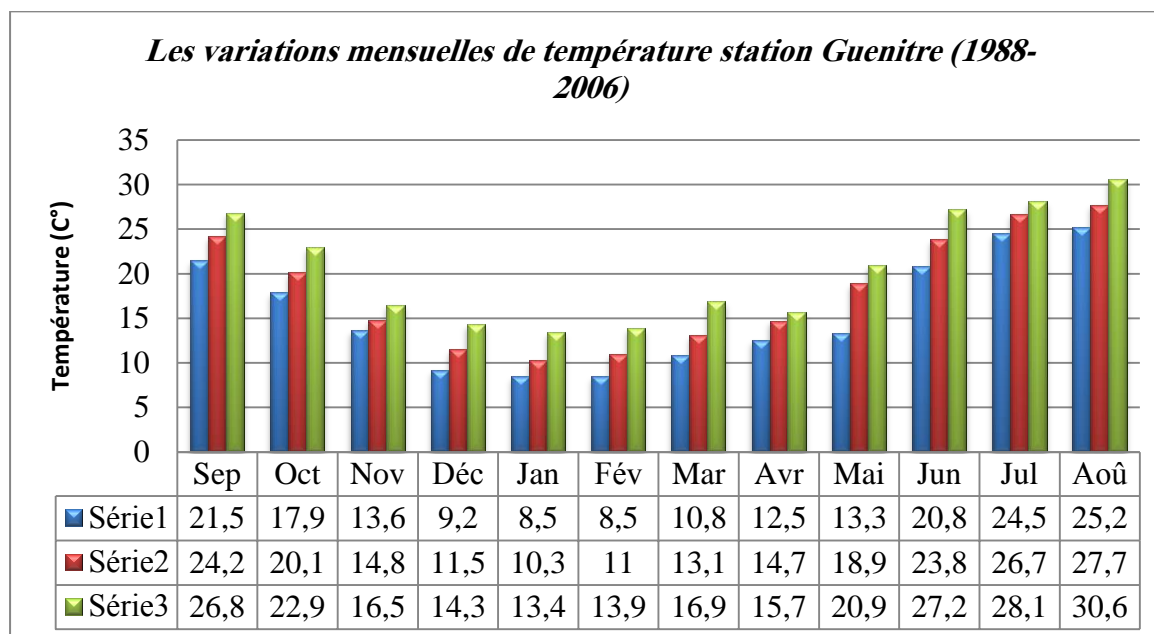


Tab n°2.16 : Histogrammes des variations des températures moyennes mensuelles de la station de Skikda.



Tab n°2.17 : Histogrammes des variations des températures moyennes mensuelles de la station de Zerdézas.

Guenitra malgré qu'il est hors le bassin mais il nous intéresse dans notre travail, le mois de Janvier est le mois le plus froid (8,5 à 12°C) et le mois d'Août étant le plus chaud (25°C à Skikda, 29°C à Zerdézas et 30 à Guenitra). Le tableau (n°2.18) récapitule les variations mensuelles de la température dans le bassin de Saf-Saf et barrage Guenitra.



Tab n°2.18 : Histogrammes des variations des températures moyennes mensuelles de la station de Guenitra. (ANRH Constantine 2014).

2.4.3 Les vents :

Les vents ont un effet important sur les phénomènes d'évaporation, de précipitation et à un degré moindre sur les températures. Les vents dominants dans le bassin du Saf-Saf sont ceux du Nord, Nord-Ouest, ils sont les plus fréquents en saison froide. Tandis qu'en été le Sirocco est fréquent, particulièrement en mois d'août.

Seule la station de Skikda qui mentionne la vitesse du vent, d'après les données des moyennes des vents de cette station sur la période (1970/71-2011/12) (Khalfaoui 2014), on constate que la fréquence de vitesse des vents atteint son maximum en hiver (décembre) avec 3,89 m/s, ce qui favorise le déplacement des nuages et par conséquent la répartition des précipitations sur l'étendue du bassin. Cependant, le minimum des vents est enregistré en mois de mai avec 3,22 m/s.

Tab n°2.4 : Vitesse moyenne des vents à la station de Skikda (1970/71- 2011/12).

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout
Moy	3,34	3,50	3,60	3,89	3,74	3,84	3,78	3,36	3,22	3,32	3,32	3,36

Source : (Khalifaoui 2014).

2.4.4 L'humidité :

Pour l'examen des valeurs de l'humidité moyenne mensuelle, on s'est référé aux données de la station de Skikda port et celle de Zerdézas.

Tab n°2.5 : Moyennes mensuelles de l'humidité relative (1970/71 – 2011/13).

Station	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Ma	Avr	Mai	Jui	Jui	Aou	Moy
Skikda port	73,2	70,6	73,1	72,9	74,9	70,8	72,3	73,4	74,0	72,4	71,1	72,3	72,6
Zerdézas	62,3	65,2	68,3	72,3	70,6	69,9	70,0	65,7	66,3	55,9	54,3	52,6	71,5

(Source : Station de Skikda 2014).

A la station de Skikda, l'humidité moyenne mensuelle est relativement constante (72,5 %). Cependant, à la station de Zerdézas elle est caractérisée par l'irrégularité, avec une moyenne de 64,5 %. Le maximum est observé en mois de novembre (71,5 %) et le minimum en Juillet (52,6 %).

L'humidité moyenne mensuelle à la station de Zerdézas est inférieure à celle de la station de Skikda, ceci peut être traduit par la variation de la température (de la mer vers l'intérieur), et par la différence d'altitude entre les deux stations (Skikda 1,3 m et Zerdézas 195 m). On peut noter donc une décroissance de l'humidité du littoral vers l'intérieur du bassin.

2.5 Présentation du Périmètre :

Le projet a pour objectifs la réalisation des ouvrages d'adduction pour l'alimentation en eau de la ville de Skikda et sa zone industrielle, ainsi que l'aménagement de la vallée su Saf-Saf et de la plaine d'Emjez-Edchich (appelé périmètre Saf-Saf), grâce à la combinaison des ressources en eau des deux barrages de Guenitra et des Zerdézas.

2.5.1 Situation géographique :

Le Périmètre est situé dans la wilaya de Skikda répartir sur les communes concernées de Skikda comme Hammadi Krouma, Ramdane Djamel, Salah Bouchaour, Emdjez Edchich et El Harrouch, couvrant une superficie totale de 5654 ha.

Le siège administratif du périmètre géré par l'Office National de l'irrigation et du drainage (ONID) est localisé dans la daïra d'El Harrouch sur la limite de la commune de Salah Bouchaour avec celle d'Emdjez Edchich.

2.5.2 Répartition du périmètre :

Le périmètre Saf-Saf a une superficie estimée en 5654 ha, sont divisées en quatre secteurs différents qui sont : le secteur I de Skikda- B. Béchir, le secteur II de S. Bouchaour-R. Djamel, le secteur III d'El Harrouch et le secteur (IV) de E. Eddchich (Figure n°2.18), équipée suivant le tableau ci-dessous:

Tab n°2.6 : Les différents secteurs du périmètre Saf-Saf.

Secteurs	Superficie (ha)		Localisation
	Equipé	Irrigable	
Secteur n°I	1720	1600	Ramdane Djamel
Secteur n°II	1591	1428	Salah Bouchaour
Secteur n°III	1023	832	El Harrouch
Secteur n°IV	1320	1240	Emdjez Edchich
Total	5654	5100	/

Source : (ONID ; 2014).

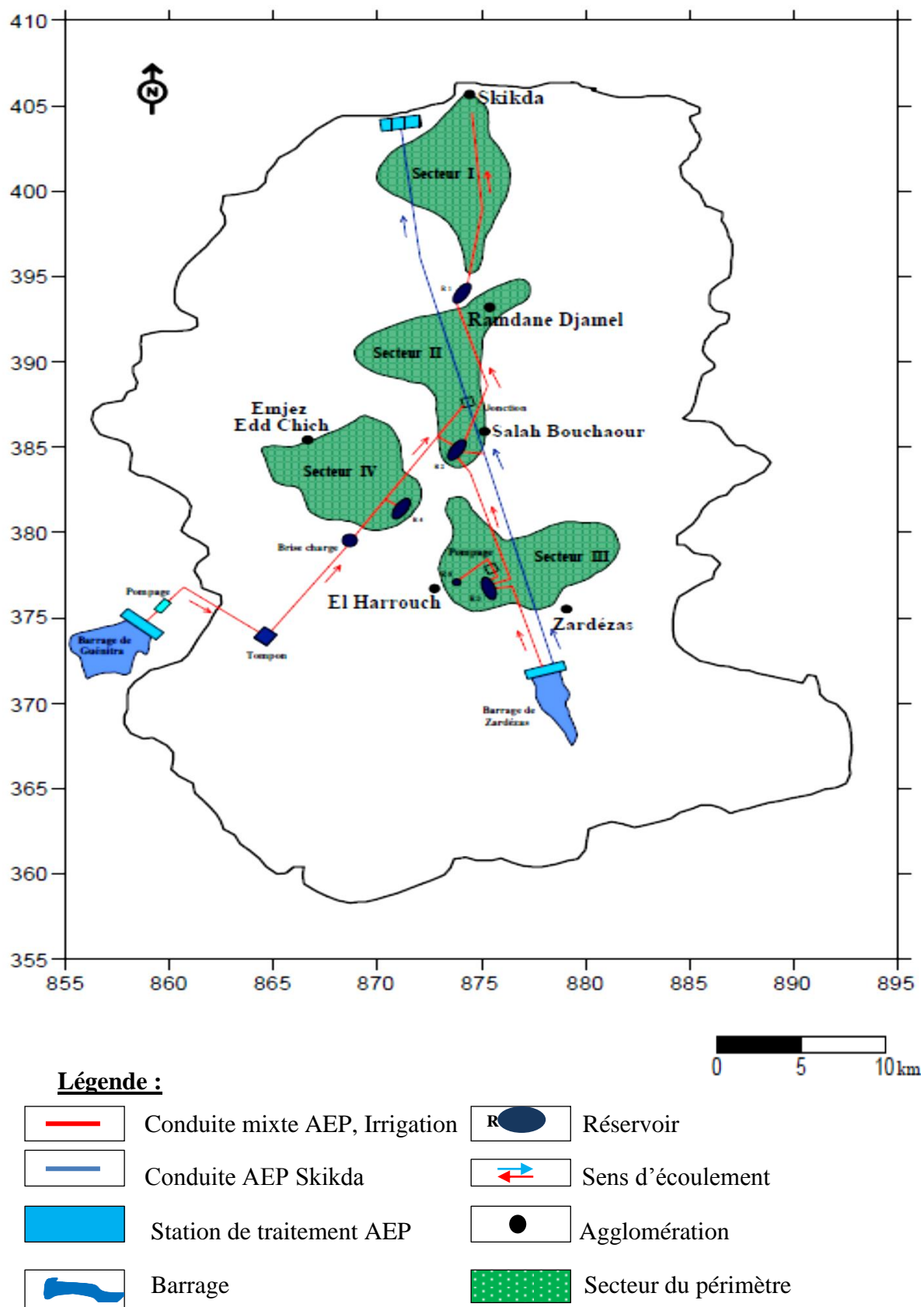


Fig n°2.19: Schéma directeur de distribution de l'eau dans le périmètre (ONID, 2014).

2.5.3 Ressource et besoins en eau du périmètre :

L'alimentation en Eau d'irrigation des secteurs du périmètre est assurée à partir des Barrages de Guénitra et des Zerdézas, le volume régularisable à partir de Guénitra est de 47 hm³ et celui des Zerdézas est de 18 hm³. Ces volumes régularisables sont destinés pour l'irrigation du périmètre et pour l'alimentation en eau potable de la ville de Skikda et de la zone industrielle. Les besoins en eau du périmètre et de l'AEP de Skikda à partir des deux barrages sont donnés suivant le tableau suivant :

Tab n°2.7 : L'alimentation des secteurs du périmètre.

Barrage	AEP(Hm3)	Irrigation (hm ³)				Total (hm ³)
		Secteur I	Secteur II	Secteur III	Secteur IV	
Guenitra	31,35	/	7,50	/	8,15	47
Zerdézas	/	10,50	2,10	5,40	/	18

Source : (ONID ; 2014).

2.5.4 Présentation physique du périmètre Saf-saf :

La modulation des volumes à partir des deux barrages pour le remplissage des réservoirs d'accumulation pour assurer la distribution sur les réseaux du périmètre est donc caractérisée par une gestion mixte entre l'A.E.P de Skikda et l'irrigation du périmètre soit entre l'ADE et l'ONID.

En effet, il s'agit de la station de pompage de Guénitra (géré par l'ADE) composée de cinq (05) pompes dont une de secours pour un débit max de 2.22 m³/sec refoulant sur un réservoir tampon de 1500 m³, à partir duquel la distribution sera gravitaire sur une longueur de 24 000 ml (conduite Ø 1250 mm et Ø 1000 mm jusqu'à la chambre des vannes appelée jonction de Salah Bouchaour ou le branchement avec la conduite venant du barrage des Zerdézas en Ø 600 mm fut réalisée . A partir de cette jonction l'Eau est transférée vers la station de traitement de Hammadi Krouma par le biais d'une conduite en acier Ø 800 mm.

L'alimentation des réservoirs des secteurs :

Secteur IV d'Emdjez Edchich : 24000 m³.

Secteur II de Salah Bouchaour : 29000 m³ est réalisé à partir des branchements sur cette conduite mixte d'adduction,

Alors que l'alimentation des réservoirs des secteurs d'El Harrouch est de 22000 m³ et de Skikda est 30000 m³ assurée gravitairement à partir du barrage des Zerdézas.

2.5.5 Canalisation et Equipements du périmètre Saf-Saf :

L'irrigation dans le bassin du Saf-Saf est devenue donc une condition nécessaire à la modernisation et à la sécurité des exploitations agricoles. La plaine du Saf-Saf d'une superficie de 6276 ha, dont la superficie équipée et irriguée est de 5654 ha, divisée en quatre secteurs différents. Le périmètre irrigué du Saf-Saf est doté d'un réseau de distribution de l'eau d'une longueur totale de 67 199 mètres linéaires, avec un réseau de drainage de 19,1 km. Le périmètre est couvert de près de 1023 des appareils hydromécaniques assurant l'arrosage des quatre secteurs répartir comme suit :

Tab n°2.8 : Canalisation et équipements du périmètre Saf-Saf.

Matériaux	Linéaire conduite (ml)				Appareils Hydromécaniques (Unité)			
	A ciment	Fonte	Béton	Acier	Bornes	Ventouse	Vannes	Vidanges
Secteurs								
Secteur I	15907	9451	2940	5225	87	52	22	55
Secteur II	20330	10259	6472	5008	111	56	24	52
Secteur III	11385	8861	7339	1256	58	66	22	43
Secteur IV	15166	11449	922	294	101	60	24	60
Adduction Guénitra	/	/	18765	7445	/	41	08	10
Adduction Zerdézas	/	/	2180	6545	/	19	03	19
Total	62788	40020	38618	25773	357	294	103	269
Totaux	67199				1023			

Source : (ONID; 2014).

2.5.6 Réservoirs et stations de pompages :

La gestion mixte de la station de pompage de Guenitra alimente en eau la ville de Skikda et aussi qu'en eau d'irrigation pour le secteur II et le secteur IV. La station de pompage d'El Harrouch alimente la partie haute pression du secteur III.

Tab n°2.9 : Réservoirs et leurs capacités du périmètre Saf-Saf.

Réservoir	Capacité (m ³)	Secteur à alimenter
Réservoir n° 1	30 000	Secteur I de Skikda
Réservoir n° 2	29 000	Secteur II de Salah Bouchaour
Réservoir n° 3	22 000	Secteur III d'El Harrouch
Réservoir n° 4	24 000	Secteur IV d'Emdjez Edchiche

Source : (ONID; 2014).

La gestion de ce périmètre était confiée à l'ONID, cependant les terres agricoles non irriguées sont gérées par la DSA de Skikda.

Tab n°2.10 : les gestionnaires des stations de pompage du périmètre Saf-Saf.

Station de pompage	débit (m ³ /s)	Nombre de pompes	Gestion
Guénitra	2,22	4 p + 1	Géré par l'ADE
El Harrouch	1,28	2 p + 1	Géré par l'ONID

Source : (ONID ; 2014).

2.5.7 Assolements pratiqués au niveau du périmètre :

Concernant la mise en valeur hydro agricole du périmètre, dans l'étude de l'avant-projet d'après l'étude agropédologique réalisée par le bureau d'étude Espagnole INTECSA en 1976 du périmètre irrigué de la vallée du Saf-Saf, il a été programmé de réaliser quatre assolements des différents types de cultures, un premier assolement pour les arbres fruitiers, dans les zones où il existe déjà. Pour les trois autres assolements A, B et C, il a été pris en considération les caractéristiques du sol, ainsi que les sources d'approvisionnement en eau d'irrigation.

Tab n°2.11: La pratique des assolements A, B et C et des arbres fruitiers par secteur.

Secteurs	Assolements				Superficie Totale (ha)
	F	A	B	C	
Secteur I	724	467	180	349	1720
Secteur II	706	635	190	60	1591
Secteur III	98	691	129	105	1023
Secteur IV	143	792	/	385	1320

Source : (ONID ; 2014).

Assolement F : Arbres fruitiers.

Assolement A : Maraîchage, Betterave, Coton, Vesce et avoine.

Assolement B : Luzerne, maraîchage.

Assolement C : Mais grain, luzerne et maraîchage.

Mais, la réalité c'est que les cultures les plus dominantes dans les secteurs opérationnels sont les cultures maraîchères, surtout les pommes de terre et l'oignon, ainsi que l'arboriculture.

Alors que la pratique des cultures fourragères irriguées qui sont programmées dans l'étude de l'avant-projet du périmètre, sont absentes en totalité dans les différents secteurs.

2.6 Exploitation du Périmètre Saf-Saf :

L'exploitation du périmètre a été mise en service pour le secteur IV d'Emdjez Edchich en 1991 pour le secteur III d'El Harrouch en 1996, puis pour le secteur II de Salah Bouchaour en 2004. Le secteur I de Skikda a connu un problème de dotation en eau à partir du barrage de Zerdézas ou un essai remise en service a eu lieu en 2009.

Le périmètre connu des problèmes de variations des volumes d'eau distribués dépendent donc de la disponibilité de l'eau derrière les barrages.

- Perturbation au niveau de la station de pompage de Guenitra suite aux chutes de courant parfois prolongées par la Sonelgaz.
- Durant les mois de juillet et Août quand les besoins deviennent importantes en eau pour l'AEP de Skikda et sa zone industrielle et en sachant que la gestion mixte de la conduite, le volume pour l'irrigation est souvent défavorisé par rapport à l'AEP et par conséquent le remplissage des réservoirs n'est pas satisfaisant.

Et aussi des Contraintes liées au périmètre :

L'irrigation du secteur III d'EL Harrouch a été suspendue durant l'année 2009 et durant la campagne de saison 2010 en raison de la contrainte provoquée par les travaux d'Autoroute Est-ouest. Il est à rappeler que l'emplacement de l'échangeur de l'Autoroute au niveau du secteur d'El Harrouch n'est pas encore exclu et par conséquent ce secteur sera éventuellement remis en cause. Piquages illicites au niveau du secteur II de Salah Bouchaour en utilisant la conduite AEP pour l'irrigation, et ce au détriment des bornes d'irrigation.

2.7 Objectif et impact sur le périmètre :

- Le projet a pour objectifs la réalisation des ouvrages d'adduction pour l'alimentation en eau de la ville de Skikda et sa zone industrielle, une bonne gestion des ressources hydriques dans les terres agricoles pour une meilleure valorisation des terres agricoles ainsi que ;
 - L'utilisation rationnelle des ressources hydriques ;
 - Introduction des cultures intensives et haut rendement pour aider à introduire ; l'autosuffisance alimentaire ;
 - Maîtrise de la qualité de l'eau et de l'équilibre écologique ;
 - Création de nouveaux emplois (directs ou indirects).

2.8 L'évolution des superficies irriguées dans le périmètre du Saf-Saf :

Actuellement, trois secteurs seulement sont en exploitation, sont le secteur II de Salah Bouchaour et le secteur III d'El Harrouch, et le secteur IV d'Emjez Edd Chich. L'autre secteur non opérationnel est le secteur I de Skikda. Les travaux de réalisation dès ce secteur ont été achevés en 2001, mais ils restent cependant inexploités à cause de l'insuffisance d'eau dans le barrage.

Tab n°2.12 : L'évolution des superficies irriguées dans le périmètre de Saf-Saf.

Année	Superficie irriguée (ha)	Année	Superficie irriguée (ha)
1992	108	2001	500
1993	294	2004	935
1994	653	2005	1 600
1995	1 125	2006	1 493
1996	1 104	2007	1 090
1997	912	2008	1 186
1998	1 310	2009	737
1999	1 613	2010	1 015
2000	1 312		

Source : (ONID ; 2014).

Les superficies irriguées depuis 1992 (année de mise en service du périmètre) sont en augmentation continue jusqu'à 1995, la superficie est passée de 108 à 1125 ha dans une durée de trois ans, cette augmentation est logique, sachant que le secteur III a été mis en exploitation en 1994.

En 1996, les superficies irriguées ont connues une diminution due à la rotation des cultures, les agriculteurs laissent la terre irriguée au repos, ou parfois ils changent les cultures irriguées par d'autres cultures en sec.

Les années 1997 et 2001 ont enregistré des chutes dans les superficies irriguées. Par contre, en 1999 une augmentation a été enregistrée pour atteindre 1613 ha. Ces variations sont dues au changement des précipitations annuelles. De même, en 2005, la superficie irriguée est de l'ordre de 1600 ha et en 2006, la superficie est rejointe 1493 ha.

En 2007, à la fin de la campagne d'irrigation, la superficie irriguée ne dépasse pas les 1090 ha, car les agriculteurs ont irrigué des petites superficies par rapport à leurs superficies totales.

A partir l'an 2008 la superficie irriguée ont connu une diminution due aux causes précédentes elle ne dépasse pas 1186 ha.

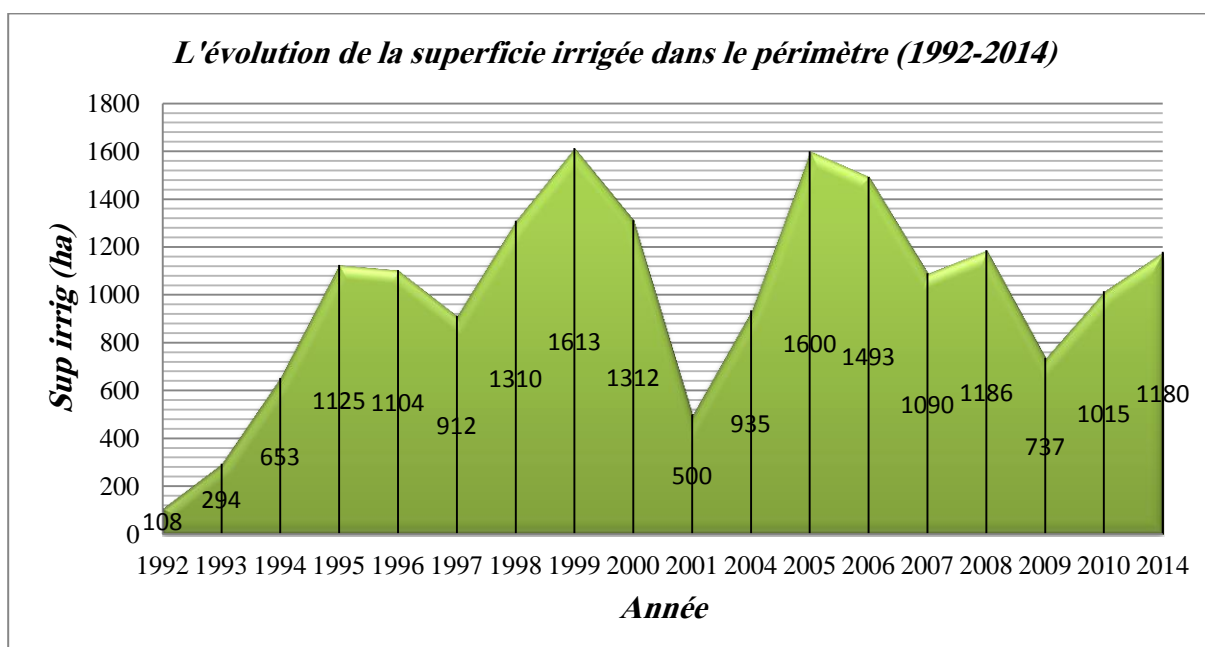


Fig n°2.20 : Courbe d'évolution de la superficie irriguée dans le périmètre de Saf-Saf.

Parallèlement, les volumes d'eau réellement consommés sont en augmentation continue, de 0,5 millions de m³ en 1992 jusqu'à 7,3 millions de m³ en 1999, avec une dose moyenne de l'ordre de 4500 m³/ha/an d'après l'ONID (2014).

L'année 1997 a enregistré le volume d'eau consommé le plus faible (1,28 millions de m³). Cette chute est due à une diminution des superficies irriguées, aussi l'année pluviométrique était largement déficitaire, ce qui a provoqué un arrêt de la campagne d'irrigation. La situation a été observée les années 2000 et 2001, où on a constaté une baisse importante des volumes d'eau distribués.

Actuellement, un volume de 4,9 millions de m³ est seulement distribué pour assurer l'irrigation de près de 1180 ha, soit une dose moyenne annuelle de l'ordre de

4530 m³/ha/an, alors que la dose annuelle théorique a été fixée à 6500 m³/ha/an. Les variations des volumes d'eau distribués et les superficies irriguées dépendent donc de la disponibilité de l'eau derrière les barrages.

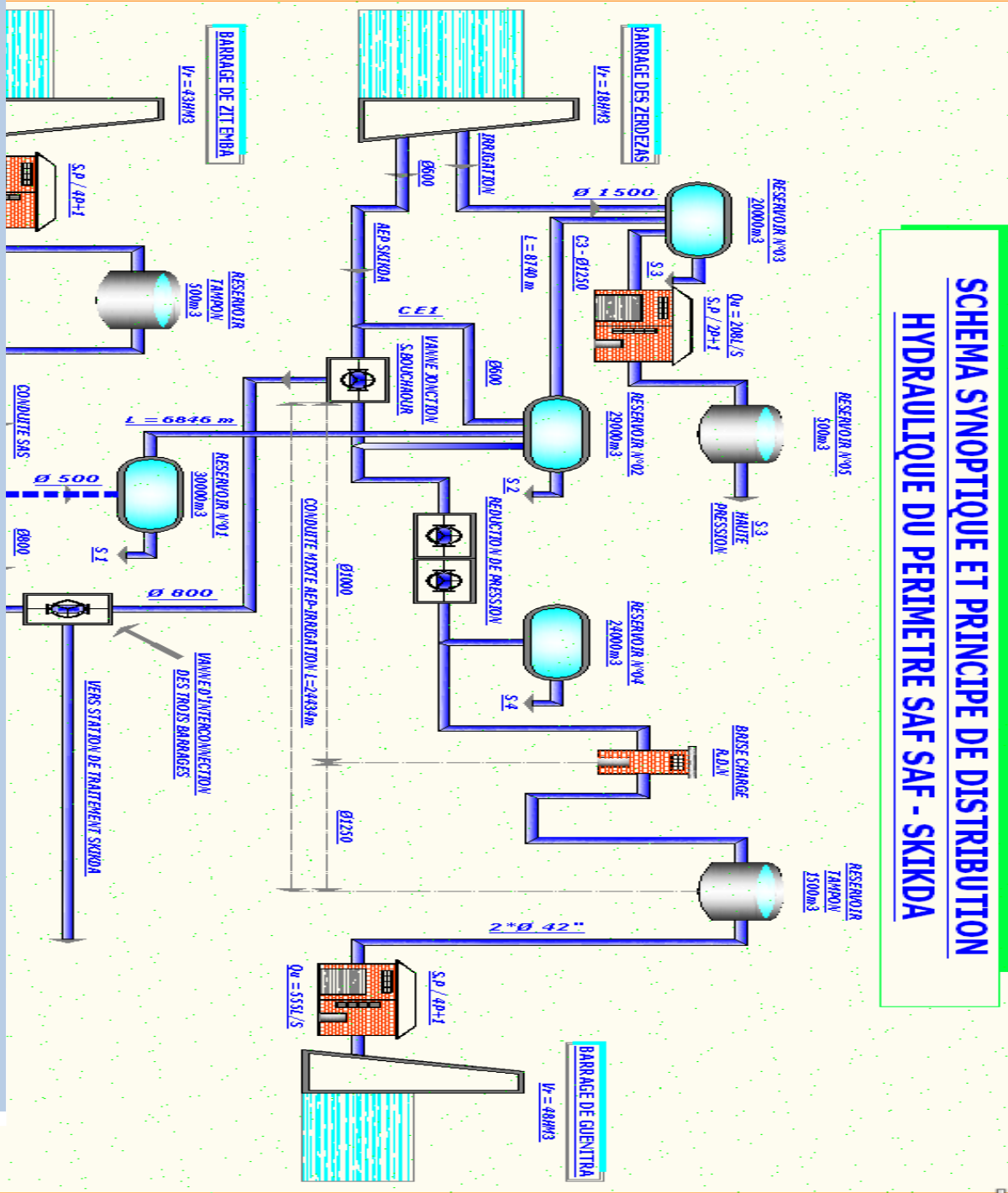


Fig n°2.21 : Schéma synoptique et principe de distribution hydraulique du périmètre Saf-Saf Skikda (ONID ; 2014).

Conclusion :

Le bassin versant du Saf-Saf appartient au Tell oriental algérien qui n'est qu'une partie de l'atlas tellien.

La géologie de la région est très complexe. En effet, les études menées ont montré que le tell oriental algérien est constitué par un empilement de nappes ; on a du Nord vers le Sud :

➤ *Le socle Kabyle et la dorsale Kabyle, la série des flyschs (mauritanien, massylien, numidien et ultra tellien),*

➤ *la série des grès numidiens et la nappe néritique du constantinois.*

Cette étude montre aussi que la dorsale kabyle se compose d'unités nettement différenciées par leurs séries stratigraphiques ; de même que l'âge du numidien est difficile à préciser.

La bassin du Saf-Saf est limité donc au Sud par des formations purement sédimentaires qui appartiennent au môle néritique Constantinois, et constituées généralement par des formations carbonatées d'âge Crétacé (Kef Toumiettes et Kef Hahouner). Quant aux formations cristallophylliennes d'âge Paléozoïque, elles le limitent à l'Ouest par le massif de Collo et au Nord-Est par Djebel Filfila et Djebel El Alia. Les formations alluvionnaires côtoient l'oued du Saf-Saf dans toute sa trajectoire.

Le traitement des données des précipitations pour la période (1970-2013), montre l'existence d'une variation spatio-temporelle des précipitations.

On remarque que la présente région se situe dans l'étage humide caractérisée par une météorologie qualifiée par des précipitations et des températures moyennes.

L'humidité relative de l'air correspond au rapport de la tension de vapeur réelle observée à la tension de valeur saturante à la même température.

Autrement dit, ces variations sont dues essentiellement à l'influence marine et l'altitude des stations globales et respectivement pour chacun des barrages.

En se basant sur les données recueillies de l'ONID et de la DSA de Skikda, les besoins en eau d'irrigation dans le bassin du Saf-Saf sont de l'ordre de 36,75 millions de m³ par an pour les quatre secteurs du périmètre. Cependant, actuellement en consommant un volume de 25 millions de m³ par an. Le secteur I reste non opérationnel en raison de manque d'eau, un déficit qui sera compensé dans les années à venir à partir des eaux du barrage de Zit el Emba et la nouvelle station d'épuration.

Caractéristiques hydrogéologiques du bassin

*Le modèle DPSIR pour la gestion d'un
périmètre irrigué dans le bassin versant
du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)*

Introduction :

L'étude hydrogéologique permet de compléter et de confirmer ce qui a été précédemment énoncé par la géologie. Donc cette étude s'avère nécessaire pour arriver à une bonne connaissance des horizons aquifères, ainsi que leurs caractéristiques hydrodynamiques.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la basse vallée de l'oued Saf-Saf (en aval du barrage du Zerdézas); c'est dans cette partie du bassin où l'oued Saf-Saf débouche dans une série de dépressions : El Harrouch, Salah Bouchaour, Emdjez Edchich, Ramdane Djamel, puis la plaine de Skikda.

Cette étude se base sur les données des essais de pompages et des mesures du niveau piézométriques des forages, fournies par la DHW de Skikda et l'ANRH de Constantine.

3.1 Horizons aquifères :

L'étude géologique et géophysique menées dans la zone d'étude ont décelé l'existence de trois différents aquifères; un aquifère poreux (du Quaternaire et du Tertiaire), aquifère karstique et un autre à système binaire. La superposition de ces trois horizons nous donne plusieurs nappes qui représentent les différents types d'aquifères existants dans la région.

3.1.1 L'aquifère poreux :

Il est caractérisé par des roches meubles non consolidées: graviers, sables, grés, poudingues...etc. Ces formations laissent passer de l'eau. Dans notre cas, il existe deux aquifères poreux: celui du Quaternaire et du Tertiaire, chacun d'eux peut former un aquifère important en prenant les roches métamorphiques ou les argiles noires du Numidien comme substratum.

L'épaisseur des alluvions varie d'un sous bassin à un autre, dans le sous bassin d'El Harrouch, l'épaisseur des alluvions est de 5 à 10 m (étude géophysique dans la zone); la même épaisseur est observée à Salah Bouchaour. A Ramdane Djamel, elle est de 15 à 30 m, par contre dans le sous bassin de Zeramna (El Hadaeïk), l'épaisseur varie de 5 à 15 m. dans la plaine de Skikda (Hammadi Krouma); les niveaux de galets sont très peu épais.

3.1.2. L'aquifère Karstique :

Il est constitué par des roches compactes, telles que les roches carbonatées (calcaires, calcaires dolomitiques, dolomies...etc.), cet aquifère peut être fissuré et fracturé à cause des phases tectoniques affectant la région. Les aquifères karstique dans la zone d'étude se trouvent à Kef M'Souna, Djebel Tasselment et Djebel El Ghédir. L'aquifère karstique peut être libre en l'absence des formations Tertiaires. Si non, il est captif;

Kef M'Souna est un aquifère karstique captif en présence des argiles noires formant son toit.

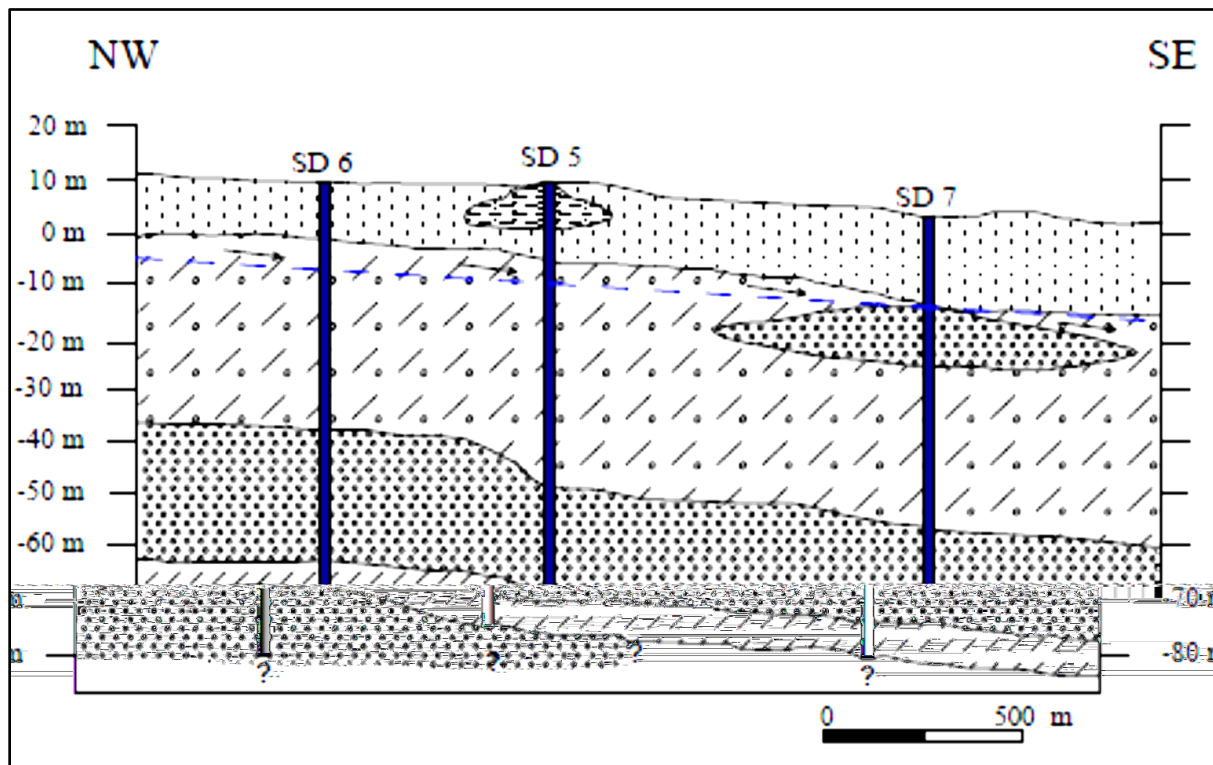
3.1.3. L'aquifère à système binaire :

Il est constitué par la superposition de roches poreuses (formations perméables: grés) sur des roches compactes (calcaire: formations karstiques), avec intercommunication des deux réservoirs. Cette dernière constitue ce qu'on appelle le système binaire.

Dans notre cas, le système binaire est composé d'un aquifère poreux et d'un autre karstique, le premier est constitué de grés, de poudingues et des conglomérats, d'une puissance de 200 m. Le deuxième, quant à lui est constitué de formations carbonatées (calcaire à nummulites et des calcaires liasiques), d'une épaisseur d'environ 200 m. L'aquifère binaire (profond) est en charge dans sa quasi-totalité, reposant sur des formations métamorphiques, et son toit est formé d'argiles noires. Par endroit, les argiles disparaissent et l'aquifère superficiel poreux sera en contact direct avec l'aquifère profond.

3.2. Profils hydrogéologiques :

En vue de mieux comprendre le système hydrogéologique, et de mettre en évidence l'extension des formations aquifères de la plaine alluviale du Saf-Saf, des profils hydrogéologiques ont été réalisés à partir des colonnes stratigraphiques et lithologiques des forages. Parmi eux, celui d'une orientation NW-SE effectué dans la basse plaine de Skikda. Il nous révèle l'existence de trois aquifères superposés, le premier superficiel, formé principalement de sables, d'une épaisseur qui varie de 11 à 20 m du Nord vers le Sud. Le substratum est constitué d'une manière générale de marnes à graviers, d'une épaisseur variable de 35 à 45 m. Le sens d'écoulement est du Nord vers le Sud, favorisé par une légère inclinaison du substratum. Notant aussi, la présence d'une lentille de graviers au sein du substratum de 10 m d'épaisseur (SD7).

**Légende :**

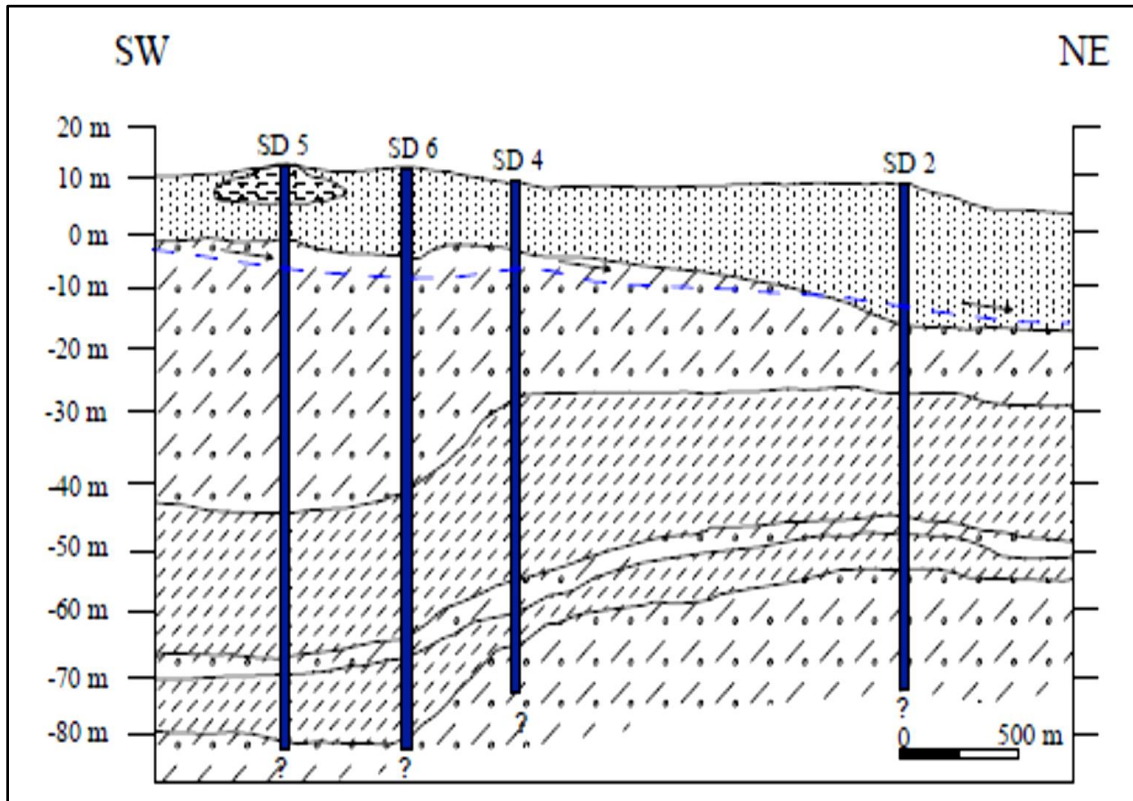
	Sables (nappe superficielle)		Marnes à graviers (toit)
	Gravier (nappe captive)		Marnes (substratum)
	Lentille argilo-sableuse		Forages
	Niveau piézométrique		Sens d'écoulement

Fig n°3.1: Profil hydrogéologique schématique de la nappe alluviale du bassin Saf-Saf NW-SE (Khalifaoui 2014).

Le second aquifère est captif à semi captif, formé essentiellement de graviers, d'une épaisseur qui varie de 20 à 30 m du Sud au Nord. Son substratum (qui forme le toit du troisième aquifère) est moins épais que le toit (de 5 à 10 m), formé de marnes grises. Son extension est visible sur toute la coupe, l'inclinaison suit toujours l'allure du substratum avec une pente qui diminue du Nord-Ouest au Sud-Est.

Le troisième aquifère apparaît nettement dans la partie NW de la plaine (les deux forages SD6 et SD5), l'épaisseur approximative apparente sur la coupe est de 15 m. Du point de vue épaisseur, l'aquifère le plus important est le second (nappe des graviers), vient ensuite l'aquifère des sables et enfin le troisième d'une épaisseur de 5 à 15 m environ.

Concernant les paramètres hydrodynamiques, la transmissivité varie de $3 \cdot 10^{-4}$ et $1 \cdot 10^{-2}$ m²/s avec une perméabilité de l'ordre de 10^{-5} m/s. Le débit total calculé sur les puits et les forages couvrant plus ou moins le bassin du Saf-Saf est de 676 l/s.



Légende :

	Sables (nappe superficielle)		Marnes à graviers (toit)
	Gravier (nappe captive)		Marnes (substratum)
	Lentille argilo-sableuse		Forages
	Niveau piézométrique		Sens d'écoulement

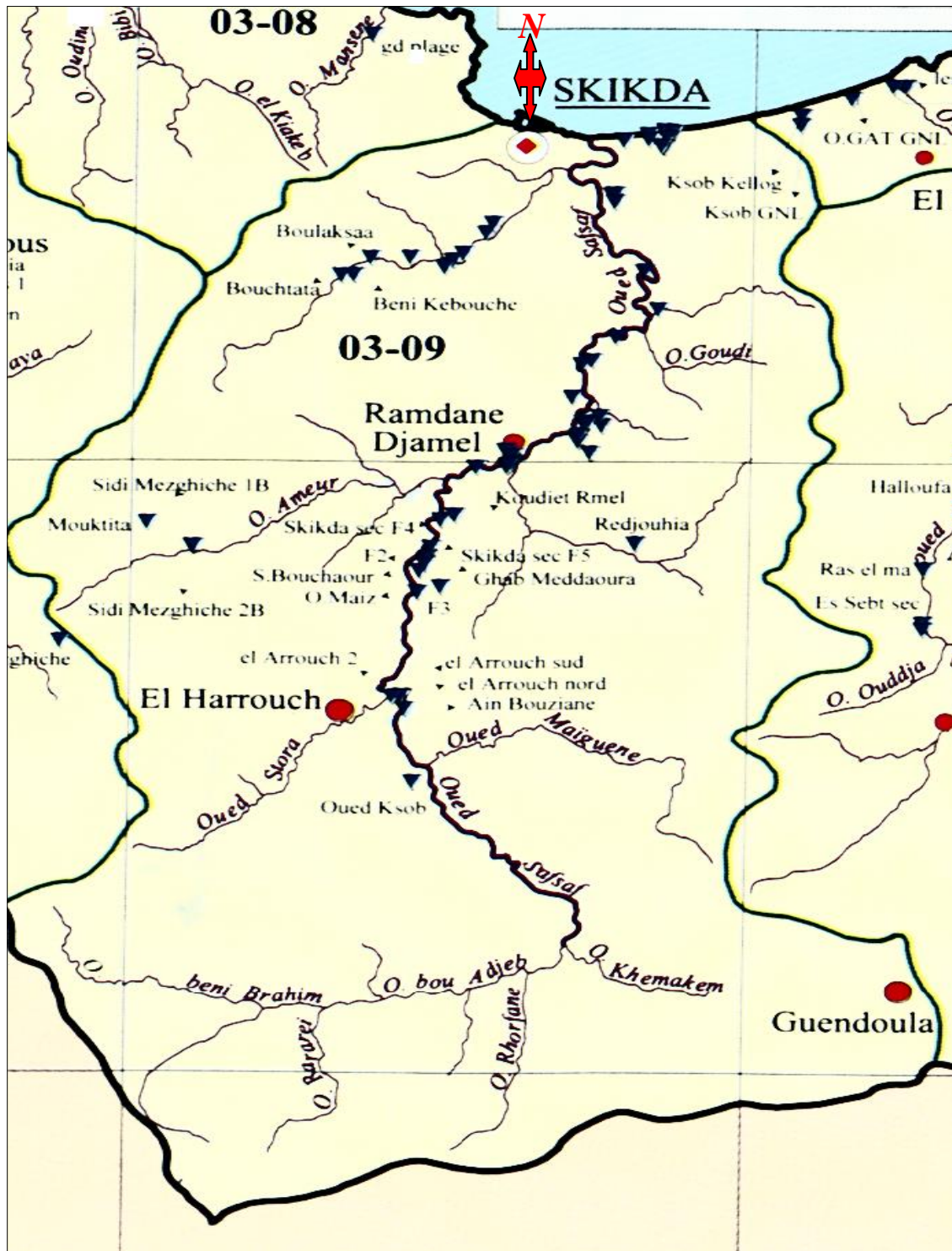
Fig n°3.2 : Profil hydrogéologique schématisé de la nappe alluviale du bassin Saf-Saf SW-NE (Khalfaoui ; 2014).

3.3 Inventaire des points d'eau :






Les forages et les puits qui ont été recensés au niveau de la plaine alluviale du Saf-Saf, n'exploitent que les eaux de la nappe superficielle (peu profonde).

Les puits sont peu profonds, et ont été creusés dans les formations du Quaternaire, ils sont utilisés pour l'alimentation en eau potable (AEP) et l'irrigation des terres agricoles. La profondeur des puits n'excède pas les 20 m.

A partir de la carte recueillies de la DSA Skikda, nous avons présenté l'ensemble des points d'eau (puits et forages) existants dans le bassin du Saf-Saf (figure n°3.3).



Légende :

-  Limite de bassin
-  Limite de sous bassin
-  Forage et puits
-  Agglomération
-  Chef-lieu de wilaya

Echelle :

0 **10Km**

Fig n°3.3 : la carte des forages et puits dans le bassin de Saf-Saf (DSA; 2014).

3.4. Etude de la piézométrie de l'aquifère superficiel :

3.4.1. Limites et l'alimentation de l'aquifère superficiel :

La nappe du Quaternaire de la plaine alluviale de l'oued Saf-Saf, est constituée essentiellement des alluvions, des dunes anciennes et des grés numidiens, avec une puissance de 30 à 60 m. Cette nappe est bordée :

- Au Nord-Ouest par le massif d'Ain Zouit, Staiha jusqu'à Sidi Mezghiche ;
- Au Nord-Est par les formations cristallophylliennes du socle kabyle;
- A l'Ouest et au Sud-Ouest, elle est limitée par la série des flyschs ;
- A l'Est, la nappe alluviale est entourée par les flyschs de Bissy, les grés numidiens et la chaîne calcaire du Djebel El Ghédir;
- Au Sud, par la chaîne calcaire des Kefs M'Souna et Sebergoud ;
- Enfin au Nord par la mer méditerranéenne.

L'alimentation de l'aquifère superficiel du Quaternaire est assurée par l'infiltration des précipitations efficaces; la nappe reçoit les eaux qui ruissellent sur les flancs internes des massifs qui limitent le bassin versant.

✓ Une alimentation souterraine par les eaux de la nappe des grés numidiens, ainsi que par les eaux des calcaires des Kefs M'Souna, Sebergoud et Djebel El Ghédir est très probable.

✓ Une alimentation à partir des bassins avoisinants n'est pas à exclure. (Bassin du Saf-Saf est de type Hyperplèthe, recevant des eaux souterraines des bassins voisins; de Guebli à l'Ouest et du Kébir ouest à l'Est).

3.4.2. Piézométrie :

Les mesures piézométriques réalisées au mois de Mai 2010 par Khalfaoui, lui permis de dresser les cartes piézométriques (Fig n°:3.4, 3.5) pour bien visualiser l'écoulement des eaux

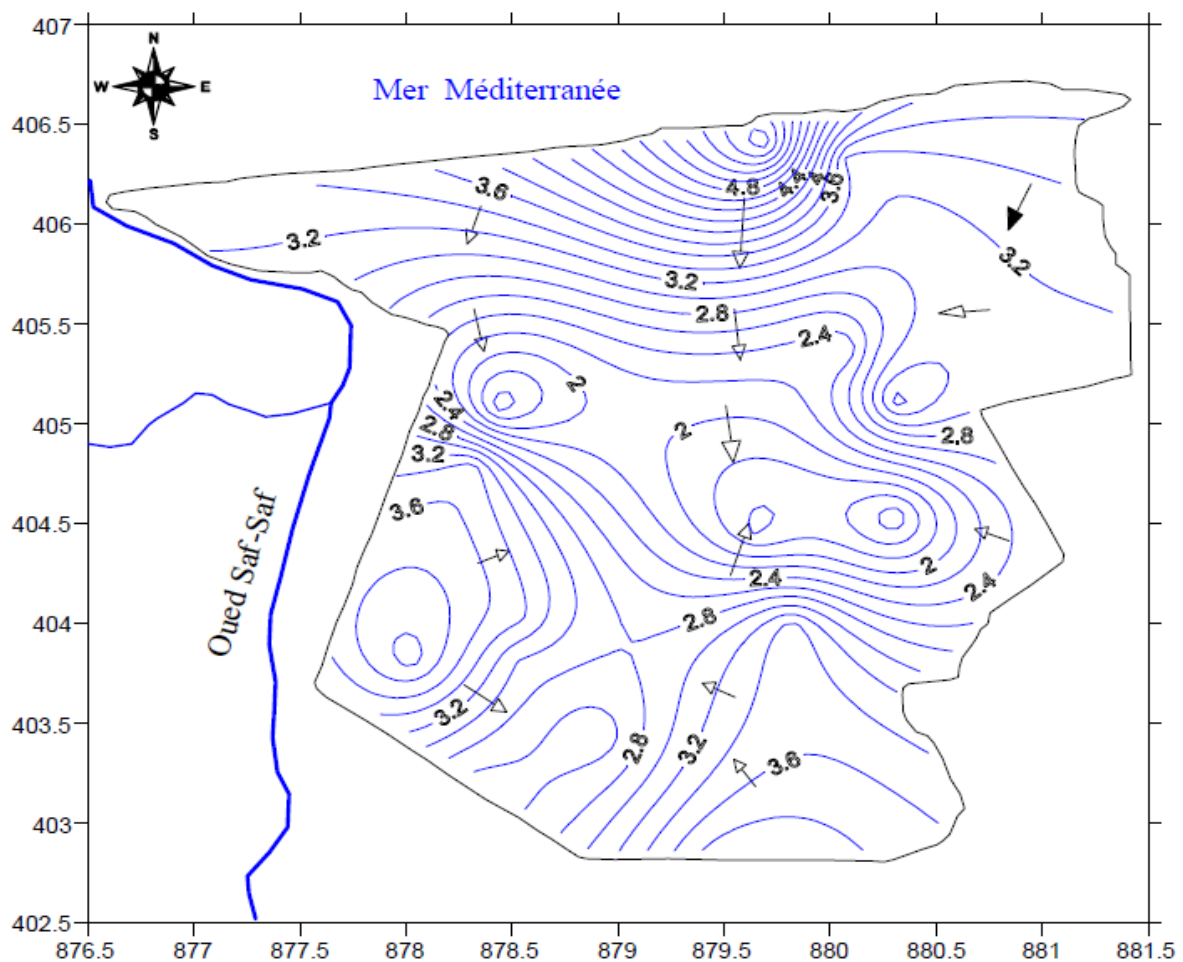
souterraines de la basse plaine du Saf-Saf. L'écoulement dans son ensemble se fait du Nord vers le Sud de la plaine, avec quelques particularités.

- Dans les parties Nord-Ouest et Nord-Est, les courbes isopièzes sont espacées, ceci traduit un gradient hydraulique faible à moyen (de $0,2 \cdot 10^{-3}$ à $1,6 \cdot 10^{-3}$) d'où une perméabilité très élevée avec un sens d'écoulement vers le centre de la nappe dû à la topographie plane de la région (pente faible ne dépasse pas les 3%).

- Au centre de la plaine, les courbes isopièzes sont serrées, avec un gradient hydraulique moyen de $(1,4 \cdot 10^{-3})$, une perméabilité faible et le sens de l'écoulement se dirige de l'Est vers le centre de la plaine.

- En ce qui concerne le Sud de la zone, les courbes isopièzes sont espacées avec un gradient hydraulique de l'ordre de $(0,8 \cdot 10^{-3})$, le sens d'écoulement se dirige de l'oued vers la nappe témoignant une alimentation de la nappe par l'oued Saf-Saf.

La carte piézométrique fait apparaître l'existence d'apports latéraux vers la plaine provenant des socles avoisinants (Djebel El Alia).



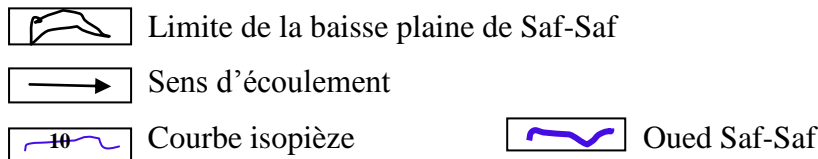
Légende :**L'échelle :**0 1Km

Fig n° 3.4: Carte piézométrique de la nappe superficielle de la plaine du Saf-Saf
(*Khalfaoui, 2014*)

3.5. Etude de la piézométrie de l'aquifère profond :**3.5.1. Limites et alimentation de l'aquifère profond :**

Cette nappe est largement répandue dans la plupart de la zone d'étude. Elle est contenue dans les graviers quaternaires.

- La nappe des graviers est entourée de tous les côtés par des formations métamorphiques (schistes et phyllades).
- Sauf au Nord limitée par la mer méditerranée.

Le substratum de cette nappe est formé par des marnes, avec un toit marneux imperméable à l'Ouest, qui tend à disparaître vers l'Est en laissant place à une formation semi perméable (argile sableuse), en venant au contact avec la nappe sableuse libre ou indirectement avec la surface en l'absence de cette dernière (nappe superficielle).

L'alimentation de cette nappe s'effectue :

- ✓ Par les précipitations ;
- ✓ Par l'écoulement en provenance de la nappe superficielle ;
- ✓ Enfin par le réseau hydrographique de l'oued Saf-Saf et ses affluents dans la partie Ouest.

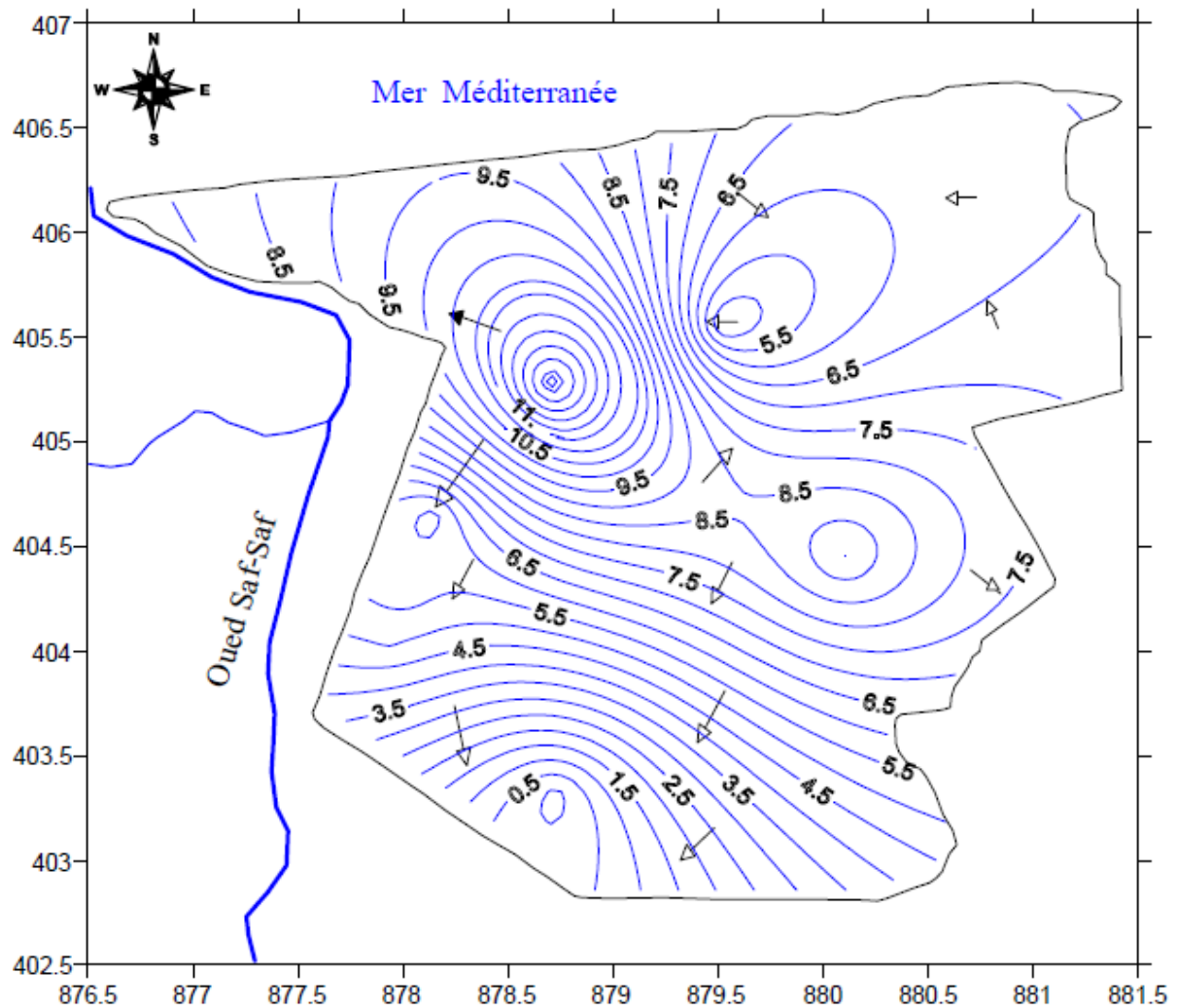
3.5.2. Piézométrie :

L'examen des courbes isopièzes et la direction des lignes des courants, a pu lui distinguer quatre zones.


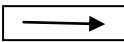
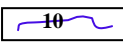

- Dans la zone Nord-Ouest, on constate une convergence des lignes de courants vers l'oued ce qui indique une alimentation de l'oued Saf-Saf par la nappe, avec un gradient de l'ordre de $1,5 \cdot 10^{-3}$.
- Pour la zone Nord-Est, l'écoulement se dirige vers la nappe venant de la partie Est et de la mer (le module d'espacement est moins important avec un gradient de $(0,6 \cdot 10^{-3})$.
- Cependant au niveau des zones Sud-Est et centrale le sens d'écoulement se dirige de la nappe vers l'oued Saf-Saf ce qui indique une alimentation de la nappe de ce

dernier. Le gradient est très faible (2.10^{-3}) montre une perméabilité importante dans cette zone.

- Les courbes piézométriques sont serrées dans la partie Ouest, le gradient est fort et varie de $6,5.10^{-3}$ à $3,5.10^{-3}$ et les lignes de courants sont convergentes vers une zone de dépression (SD5, SD4, SD6).



Légende :

-  Limite de la baisse plaine de Saf-Saf
-  Sens d'écoulement
-  Courbe isopièze
-  Oued Saf-Saf

L'échelle :

0 1Km

Fig n° 3.5: Carte piézométrique de la nappe profonde de la plaine du Saf-Saf
(Khalfaoui, 2014.)

Conclusion :

L'étude hydrogéologique menée dans le bassin du Saf-Saf a pu nous montrer l'existence de trois types d'aquifères.

- *Un aquifère superficiel poreux avec des formations du Quaternaire et du Tertiaire reposent sur les formations imperméables (argiles et roches métamorphiques).*
- *Le second est un aquifère karstique, constitué par des roches carbonatées.*
- *Le dernier est un aquifère à système binaire, constitué par la superposition des roches poreuses sur des roches compactes avec une intercommunication des deux réservoirs.*

L'alimentation de ces horizons est assurée par l'infiltration des précipitations efficaces, ainsi qu'une alimentation souterraine à partir des bassins avoisinants.

L'allure générale de la carte piézométrique de la nappe superficielle et profonde montre un sens écoulement du Nord vers le Sud et de l'Est et l'Ouest vers le centre, qui converge des bordures (aires d'alimentation) vers les zones de décharge (drainage) qui sont occupées par l'oued Saf-Saf au centre de la plaine.

Diagnostic de la potentialité des eaux

*Le modèle DPSIR pour la gestion d'un
périmètre irrigué dans le bassin versant
du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)*

Introduction

Bien gérer la problématique de l'eau, implique une connaissance aussi parfaite que possible de la disponibilité de la ressource et de sa variabilité dans le temps et dans l'espace, et autant que faire se peut proposer des scénarios prospectifs pour l'analyse du risque et la gestion des crises, dans un avenir où les effets anthropiques sont mal maîtrisés. Le bassin du Saf-Saf ne fait pas exception, les ressources hydriques dont on dispose sont plus ou moins limitées, cette limitation est d'abord naturelle, mais elle est accentuée par les besoins toujours croissants du développement démographique et socio-économique, par le gaspillage, ainsi par les différents types de pollutions menaçant le bassin.

Cette situation, paraît angoissante, nécessite une planification basée sur un diagnostic quantitatif et qualitatif des potentialités hydriques dans le bassin, pour faire face à toute situation de crise probable.

4.1. Diagnostic quantitatif des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf :

4.1.1 Potentialités hydriques dans le bassin du Saf-Saf :

Avec une pluviométrie moyenne annuelle plus de 690 mm sur l'ensemble du bassin, traduisant un apport total globalement très important de l'ordre de 800 hm³/an. Ce potentiel hydrique considérable, est malheureusement, se trouve confronté à d'importants problèmes de gestion de la maintenance des ouvrages hydrauliques mis en place, réduisant le volume de mobilisation à près de 50 hm³/an dans le bassin. (hecto m³ c'est l'équivalent du million m³)

4.1.1.1 Potentiel hydrique superficiel :

a. Oueds :

Les ressources en eau de surface proviennent en quasi-totalité de l'oued Saf-Saf et ses principaux affluents, qui sont alimentés principalement par les eaux pluviales. Dans le sous bassin de Zerdézas, les oueds Bou Adjeb et Khémakhem fournissent un apport moyen annuel de l'ordre de 33,75 hm³. Sur l'ensemble du bassin, les apports en eau de surface de l'oued Saf-Saf et ses affluents traduisent un volume approximatif extrapolé de l'ordre de 121 hm³/an, qui reste très peu exploité vu le volume total mobilisé par les différents ouvrages hydrauliques dans le bassin.

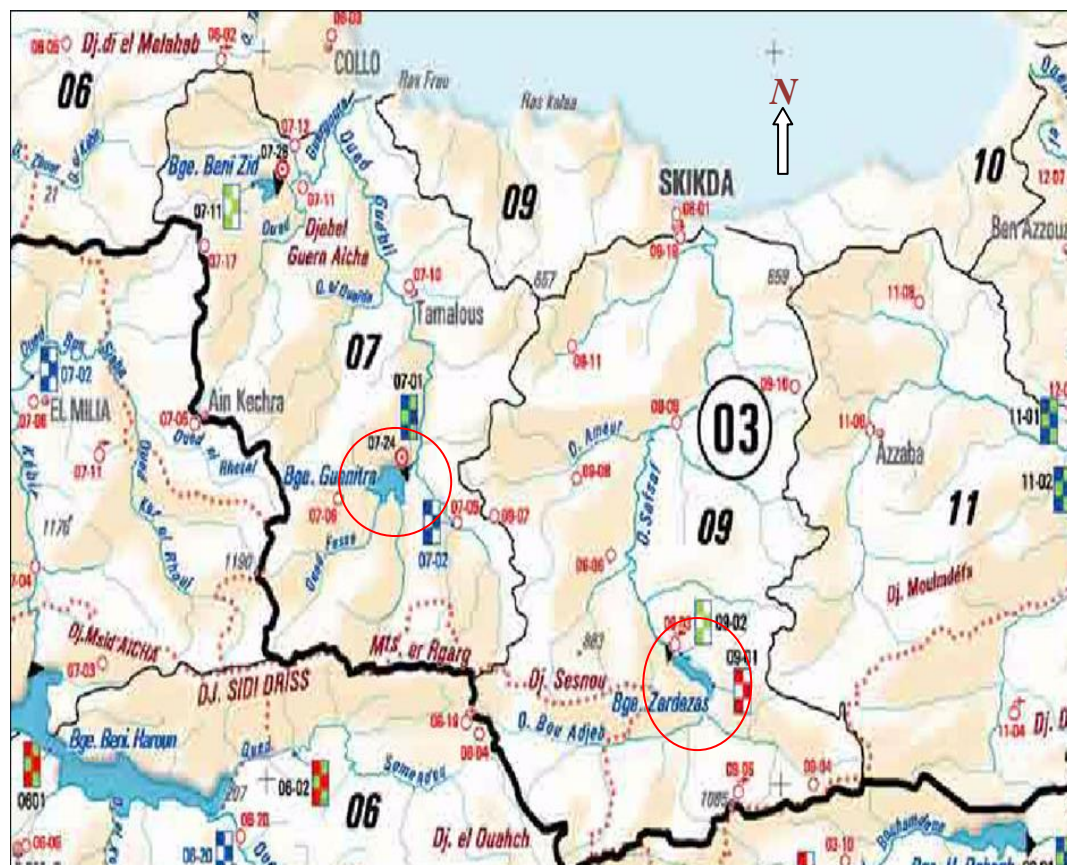
b. Barrages :

La wilaya de Skikda dispose de quatre grands barrages en exploitation. Seul le barrage de Zerdézas qui appartient au bassin du Saf-Saf. Ce barrage est construit






entre 1929 et 1945, et surélevé en 1974. Il est destiné à l'alimentation en eau potable des communes de Zerdézas, Aïn Bouziane, El Harrouch, Salah Bouchaour et Emdjez Edchich. La capacité de stockage de cette infrastructure hydraulique est de 32 hm³ en théorie, tan disque l'envasement de ce dernier ne permet finalement que de régulariser 18,12 hm³.

Outre, il existe deux barrages en projet au sein du bassin du Saf-Saf. Le barrage de l'oued Charchar dans la commune de Bouchtata, doté d'un double objectif, il est destiné à servir comme un moyen de protection de la ville de Skikda exclusivement contre les inondations, et par la même occasion alimenter en eau potable la commune de Bouchtata et ses environs, sans oublier l'irrigation de la plaine d'El Hadaeïk. Avec le choix de son emplacement immédiat, ce barrage, dont la capacité est de 11,5 hm³, peut rendre d'énormes services au bassin.

Le second barrage est celui de Ramdane Djamel dans la commune de Zerdézas. Il est actuellement en phase d'étude au niveau de l'Agence Nationale des Barrages et de Transfert (ANBT). Cet ouvrage est prévu au confluent des deux oueds, Bou Adjeb et Khémakhem d'une capacité de 12,5 hm³. Il aura pour rôle de servir comme un barrage excréteur en amont du barrage de Zerdézas et de pallier au manque d'eau dans la partie amont du bassin.



Légende :

-  Oued, effluent.
-  Limite de bassin.
-  Limite administrative.
-  Barrage.
-  Station hydrométrique.

L'échelle :

0 1Km

Fig n°4.1 : Carte hydrographique indiquée la localisation des barrages (Guenitra, et Zerdzas) (Source DSA, 2014).

Fiche d'identification des Barrages :

1. Barrage Zerdzas :

Sa construction a été réalisée entre 1929 et 1945 avant d'être surélevé de 1971 à 1974 afin de satisfaire la demande en AEP des chefs-lieux des communes de Zerdzas, El-Harrouch, Salah Bouchaour et Emdjez Edchich pour une population de l'ordre de 130 000 habitants (Services agricoles, 2006). Les capacités de stockage sont de $32. 10^6 \text{ m}^3$, ces dernières sont réduites à $18. 10^6 \text{ m}^3$ suite à des problèmes d'envasement causé par le dévalement des terres agricoles avoisinantes.

Tab n° 4.1:Fiche technique du barrage Zerdézas.

Wilaya	Skikda
Oued	Saf-Saf
Type	Poids
Déversoir	Seuil vanne
Cote retenue normale	197 m
Surface bassin versant	345 Km²
Année mise en eau	1945
Capacité initiale	32 hm³
Capacité levée 1986	20,2 hm³
Apport moyen annuel	53 hm³/an
Envasement annuel	0,25 hm³/an
Volume régularisé	18 hm³

(Source : DHW 2014).

***Destination :**

- AEP de la wilaya de Skikda.
- AEI du Périmètre du Saf-Saf.

***Bureau d'étude :** BONNAR et GARDEL (SUISSE).

***Entreprise de réalisation :**

- Ouvrage SONATIBA TRUCHETET ET TANSINI
- SOLETANCHE (ALGERO –FRANCAISE).
- Equipement hydraulique :ENCC(SENMETAL).



Fig n° 4.2:Photographie montrant une vue générale du barrage Zerdézas en période de dévasement.

2. Barrage Guenitra :

Le barrage de Guenitra (bassin du Guebli), fait partie de mon travail comme une ressource d'eau.

Les travaux de construction du barrage de Guenitra ont duré de 1974 à 1984 reçoit les eaux de 7 affluents, les oueds Cherfa, Kebir Ouest, Magrammane, Sedjane, Fessa, Bou et Boulekhrafef. Il a une capacité moyenne de stockage de 40.106 m³ d'eau. Sa retenue d'eau peut renfermer 125.106 m³ avec une côte d'altitude de 164 m et un volume annuel régularisé de 48.106 m³ correspondant à une superficie de 1000 hectares. Ses bassins versants de 200 km², reçoivent une pluviosité annuelle moyenne de 700 mm, soit un apport, inter annuel moyen de 55.106 m³ avec 1,74 m³/s. Il est destiné à assurer la couverture des besoins en eau dans le bassin du Saf-Saf avec un volume annuel de 12,04 hm³, destiné essentiellement à l'approvisionnement en eau potable de la ville de Skikda et ses environs, les agglomérations avoisinantes et la zone industrielle. Avec les eaux du barrage Zerdézas, il contribue à l'irrigation de la plaine de Saf-Saf. Il reçoit un apport annuel estimé à 47-60. 10³ m³. Ses capacités de stockage sont de 125. 10³ m³ couvrant les besoins en AEP des communes d'Oum Toub, Sidi Mezghiche et les zones environnantes.

Tab n° 4.2: Fiche technique du barrage Guenitra.

Wilaya	SKIKDA
Coordonnées Lambert	Latitude : 36°68'33'' Longitude : 6°61'66''
Oued	Fessa
type	Terre
Déversoir	Seuil vanne
Cote retenue normale	164 m³
Surface bassin versant	202 Km²
Année mise en eau	1984
Capacité initiale	125 hm³
Capacité levée 1986	20,2 hm³
Apport moyen annuel	55 hm³/an
Envasement annuel	0,15 hm³/an
Volume régularisé	48 hm³

(Source : DHW 2014).

***Destination :**

- AEP de Skikda.
- AE Industrielle.
- AEIRR Saf-Saf.

***Bureau d'étude :** TRACTIONEL (Belgique).

***Entreprise de réalisation :**

- Ouvrage LESI (Italie).
- SOLETANCHE (Algero –Française).
- Equipement hydraulique :INGRA (EX Yougoslavie).



Fig n°4.3: Photographie du barrage Guenitra.

3. Le barrage de Ramdane Djamel :

Il a pour rôle de servir de barrage écrêteur en amont du barrage de Zerdézas.

c. Retenues collinaires :

Les retenues collinaires dans le bassin du Saf-Saf sont essentiellement destinées à l'irrigation des moyens et des petits périmètres et l'abreuvement du cheptel. Elles sont au nombre de 18 (ABH 2010), mobilisant un volume global de 2,54 hm³/an d'eau de surface. Actuellement, sur l'ensemble de 18 retenues, il ne reste que treize (13) en bon état, avec des capacités qui peuvent atteindre les 400 000 m³/an (retenue de Bougraïna et Bouchtata).

Ainsi, avec la détérioration des autres, on assiste à une réduction considérable de l'apport en eau de surface. Outre, il y a un volume de 100 000 m³/an est régularisé par les différents types de réservoirs et de châteaux d'eau installés dans le bassin du Saf-Saf.

Tab n°4.3 : Les différentes retenues collinaires dans le bassin versant du Saf-Saf.

Commune	Nombre de retenues	Capacité totale (m ³)
RamdaneDjamel	3	370 000
Emdjez Edchich	6	510 000
El Harrouch	2	460 000
AïnBouziane	2	100 000
SidiMezghich	2	360 000
El Hadaeïk	1	220 000
Bouchtata	1	400 000
El Ghédir	1	120 000
Total dans le bassin	18	2 540 000

(Source : ABH csm, D'après Khelfaoui2014).

d. Dessalement de l'eau de mer :

Une station de dessalement de l'eau de mer que possède le bassin du Saf-Saf, d'une capacité de production de 10 000 m³/j (3,65 hm³/an). Actuellement, elle produit une moyenne de 3000 à 4000 m³/j, assurant les besoins en eau potable de la ville de Skikda et Ben M'hidi (1,46 hm³/an). Sur le long du complexe sont implantées des stations de dessalement des eaux utilisées aux refroidissements des appareils industriels. Deux autres stations sont en projet, la première d'une capacité de production de 100 000 m³/j (36,5 Hm³/an) assurant les besoins totaux de la ville de Skikda et ses environs (70 000 m³/j) et l'excédent d'eau sera destinée pour l'irrigation. La deuxième station est située au voisinage du bassin, dans la région de Filfila, d'une capacité de production de 50 000 m³/j (18,25 hm³/an). Dans les années avenir, avec la mise en service de ces deux stations de dessalement, le bassin du Saf-Saf.

e. Eaux saumâtres déminéralisées :

Actuellement, il existe au niveau de la zone industrielle une station de déminéralisation à osmose inverse d'une capacité de 4 500 m³/j destinée au renforcement de l'A.E.I de la zone industrielle de Skikda.

f. Eaux usées épurées :

En perspective, il est projeté le recyclage des eaux usées pour l'irrigation des terres agricoles une fois la station d'épuration de la ville de Skikda sera achevée et mise en exploitation, soit :

- 34 000 m³/j soit 12,41 hm³/an à l'horizon 2015.

- 42 000 m³/j soit 15,33 hm³/an à l'horizon 2025.

4.1.1.2 Potentiel hydrique souterrain :

Les eaux souterraines constituent une part importante du patrimoine hydraulique du bassin, elles représentent près de 61 % de son potentiel hydrique reconnu.

Les réserves souterraines constituées par les différentes nappes existantes dans le bassin du Saf-Saf sont alimentées par les précipitations efficaces, ainsi qu'une alimentation souterraine à partir des bassins avoisinants.

Les investigations réalisées dans le bassin permettent d'estimer son potentiel en eaux souterraines à près de 30,45 hm³/an (DHW Skikda 2014), dont la nappe alluviale du Saf-Saf et Zeramna représente elle seule 24,12 hm³/an (Ben Rabah 2006), soit 80 % de la totalité du potentiel hydrique souterrain du bassin.

a. Forages :

La majorité du potentiel hydrique souterrain du bassin est exploité par pompage, à partir d'une batterie de forages implantée dans les alluvions de la plaine du Saf-Saf.

D'après le bilan actuel de la DHW de Skikda, on a dénombré près de 61 forages répartis à travers le bassin, dont 18 forages sont abandonnés pour des raisons de colmatage ou du rendement très faible.

Les autres forages en service mobilisent annuellement un volume de 14,53 hm³, ils sont destinés essentiellement à l'alimentation en eau potable et aussi pour l'industrie (besoins de la zone industrielle).

b. Puits :

A travers la superficie du bassin du Saf-Saf, il existe un nombre considérable de puits qui captent les eaux de la nappe superficielle, dont le rôle est limité uniquement à satisfaire les besoins domestiques (AEP) et l'irrigation de quelques surfaces agricoles. Les débits d'exploitation sont peu significatifs.

c. Sources :

En excluant sa partie amont, le bassin du Saf-Saf possède près de 33 sources, dont la plupart sont captées, assurant l'alimentation en eau potable des mêmes communes où elles se trouvent, avec des débits qui dépassent parfois les 10 l/s (Ben Rabah 2006).

Dans le sous bassin de Zerdézas (amont), et dans le cadre du projet pilote de développement de l'agriculture de montagne (PPDAMOS), une étude établie en 2005, qui porte sur l'inventaire et l'évaluation des ressources en eaux, permet de déceler la présence de près de 102 puits domestiques, et 316 sources d'un débit varie de (0,1 à 1 l/s). La majorité des sources inventoriées sont mal captées ou partiellement aménagées. Certaines d'entre elles ayant un débit intéressant (> 2 l/s).

4.1.2. Mobilisation des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf :

Globalement, les ressources en eau mobilisées dans le bassin du Saf-Saf sont évaluées à près de 35 hm³ par an, soit 74 % des ressources en eau mobilisables.

Les eaux de surface, dont le volume mobilisable est estimé à 30,25 hm³/ an, sont mobilisées à hauteur de 95 %. Cependant, le volume mobilisable pour les eaux souterraines est de l'ordre de 17,29 hm³ par an, mais seulement un taux de 37 % qui est réellement mobilisé.

Tab n°4.4: Potentiel hydrique global dans le bassin du Saf-Saf.

Ressources en eau	Potentiel reconnu (hm³/an)	Rces mobilisables (hm³/an)	Rces mobilisées (hm³/an)
Superficielles	25,89	30,25	28,64
Souterraines	30,47	17,29	6,35
Total	56,36	47,54	34,99

(Source : DHW Skikda, 2014)

En vue de visualiser la répartition des ressources en eau à travers le bassin du Saf-Saf, on a jugé utile de diviser ce dernier en trois parties distinctes; l'amont, le centre et l'aval. Dont, l'amont englobe les communes de Zerdézas, Ouled Hebaba, Es Sebt, et Aïn Bouziane. Les communes qui appartiennent au centre du bassin sont: El Harrouch, Salah Bouchaour, Emjez Edchich, El Ghédir, Sidi Mezghich et Ramdane Djamel. L'aval contient les communes de Skikda, Hamadi Krouma, El Hadaeïk, Bouchetata et Beni Bachir. La répartition des ressources en eau dans les trois parties du bassin du Saf-Saf est représentée dans le tableau ci-dessous.

Tab n° 4.5: Répartition des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf.

Rces en eau	Potentiel reconnu (hm ³ /an)			Rces mobilisables (hm ³ /an)			Rces mobilisées (hm ³ /an)		
	Total	Superficiel	Souterrain	Total	Superficiel	Souterrain	Total	Superficiel	Souterrain
Amont	20,06	18,19	1,87	1,46	0,40	1,05	0,96	0,40	0,56
Centre	17,27	6,32	10,95	15,86	6,25	9,62	10,42	6,25	4,17
Aval	19,03	1,38	17,65	30,23	23,61	6,62	23,61	21,99	1,62
Total	56,36	25,89	30,47	47,54	30,25	17,29	34,99	28,64	6,35

(Source : DHW Skikda, 2014)

Le potentiel hydrique est inégalement réparti dans le bassin, le volume le plus important (20,06 hm³) se trouve en amont du bassin avec un taux de 36 %. L'aval totalise un volume de 19,03 hm³, soit 34 % du potentiel hydrique dans le bassin. La partie centrale du bassin ne contient que 30 % de la totalité des ressources reconnues.

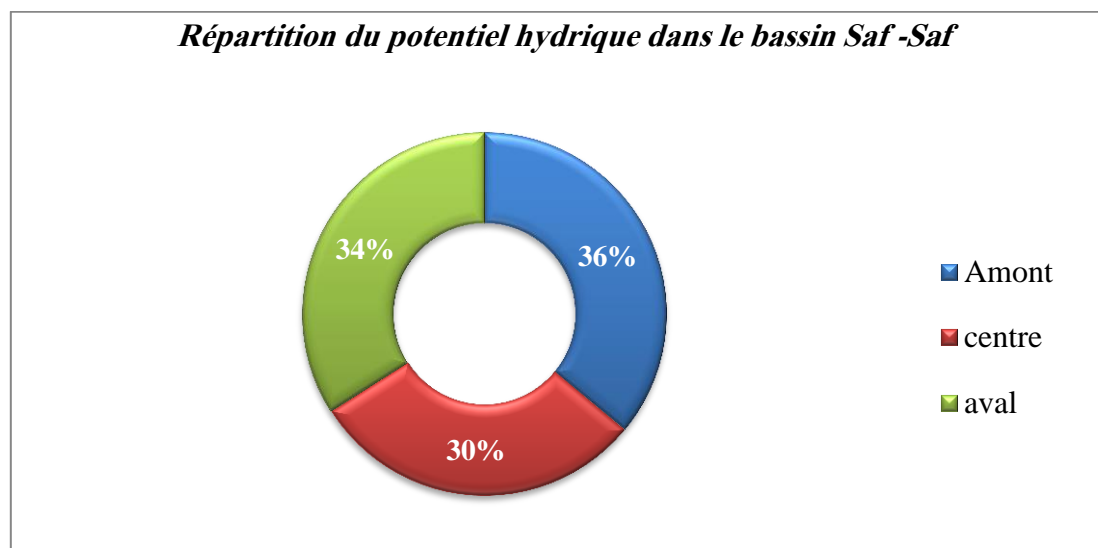


Fig n°4.4: Répartition du potentiel hydrique dans le bassin du Saf-Saf.

En matière de mobilisation, le volume total mobilisé (exploité) est de l'ordre de 34,99 hm³ (pour l'année 2010), soit 74 % de la ressource totale mobilisable. Dont le volume exploité le plus important (23,61 hm³) est concentré en aval du bassin, avec un taux de 67 %, en raison de la concentration démographique dans le chef-lieu de Skikda et l'intensité des activités industrielles (zone industrielle pétrochimique).

Le centre du bassin, avec ses besoins domestiques et agricoles (périmètre irrigué du Saf-Saf), exploite près de 30 % des ressources mobilisées, soit un volume de 10,42

hm³. L'amont du bassin est dépourvu de toute activité industrielle ou agricole, ses ressources en eau mobilisées sont peu significantes, elles représentent 3 % de la totalité des ressources mobilisées.

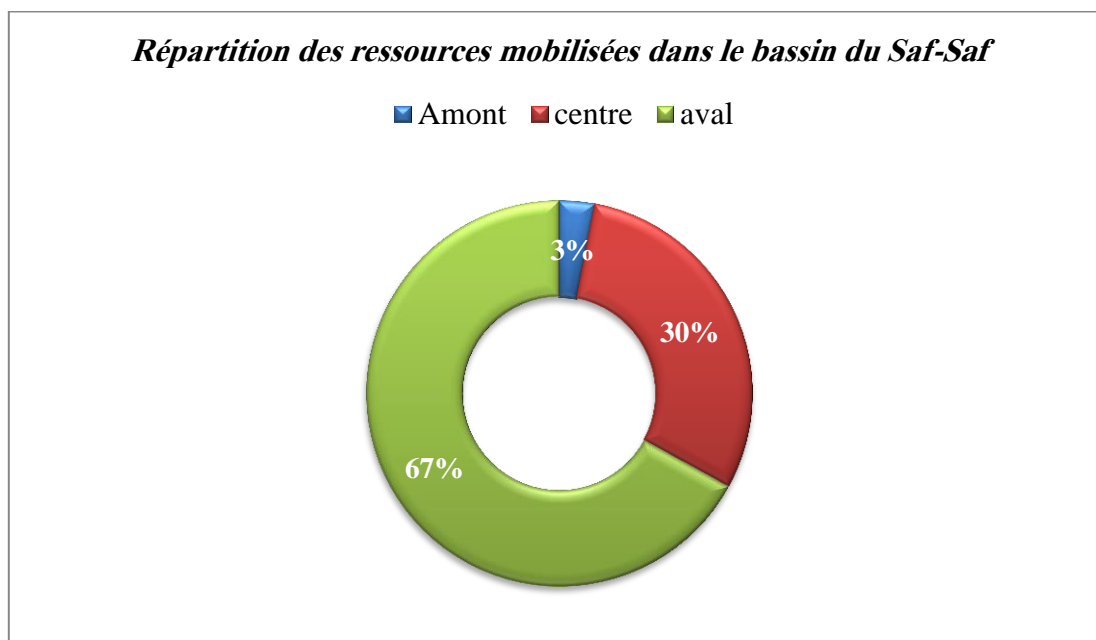


Fig n°4.5: Répartition des ressources mobilisées dans le bassin du Saf-Saf.

4.1.2.1 Mobilisation des eaux de surface :

Les ressources en eau de surface mobilisables dans le bassin du Saf-Saf sont estimées à près de 30,25 hm³ par an, mais seulement un volume de 28,64 hm³ qui est mobilisé par les différentes infrastructures mises en place, traduisant un taux de 95 % de la totalité des ressources mobilisables.

Malgré sa pauvreté en ressources en eau superficielles, l'aval du bassin mobilise un volume de 21,94 hm³ d'eau de surface, en bénéficiant des apports provenant des bassins avoisinants; le barrage de Guenitra (bassin du Guebli), alimente le bassin du Saf-Saf avec un volume annuel de 12,04 hm³, destiné essentiellement à l'approvisionnement en eau potable de la ville de Skikda et ses environs. Outre, le barrage de Zit Emba (bassin Kébir Ouest), participe avec un volume de 9,49 hm³ par an pour la satisfaction des besoins en eau potable de la ville de Skikda, ainsi que sa zone industrielle.

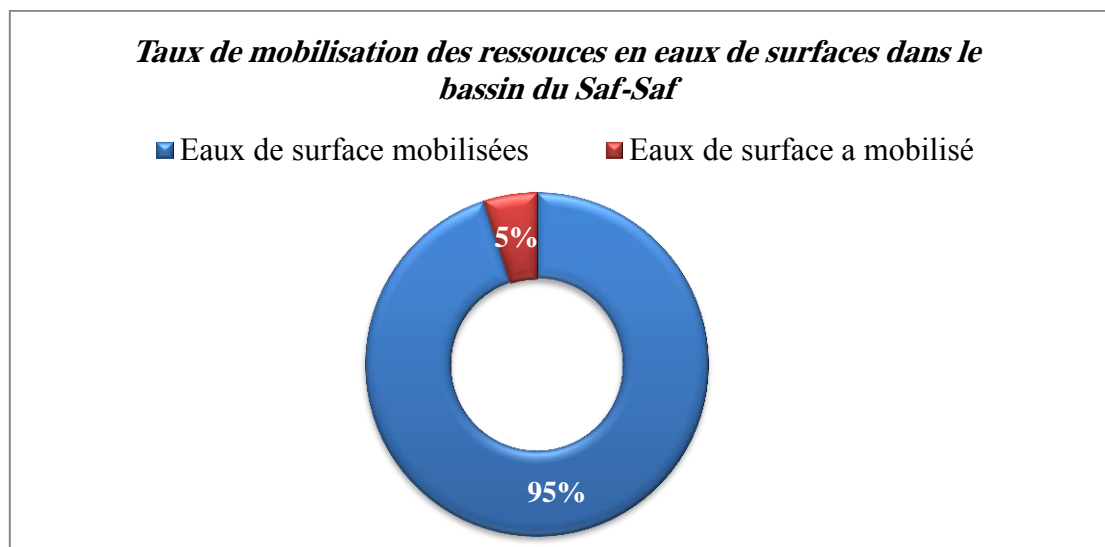


Fig n°4.6 : Taux de mobilisation des ressources en eau de surface dans le bassin du Saf-Saf.

4.1.2.2. Mobilisation des eaux souterraines :

Contrairement aux eaux de surface, en matière de mobilisation, les eaux souterraines sont restées plus ou moins limitées, le volume mobilisable est estimé à 17,29 hm³ par an, mais seulement 6,35 hm³ sont exploitées, soit un taux de 37 % des eaux souterraines mobilisables. Près de 63 % des ressources souterraines restent encore à mobiliser, par l'implantation des forages et la réhabilitation de ceux qui sont en mauvais état.

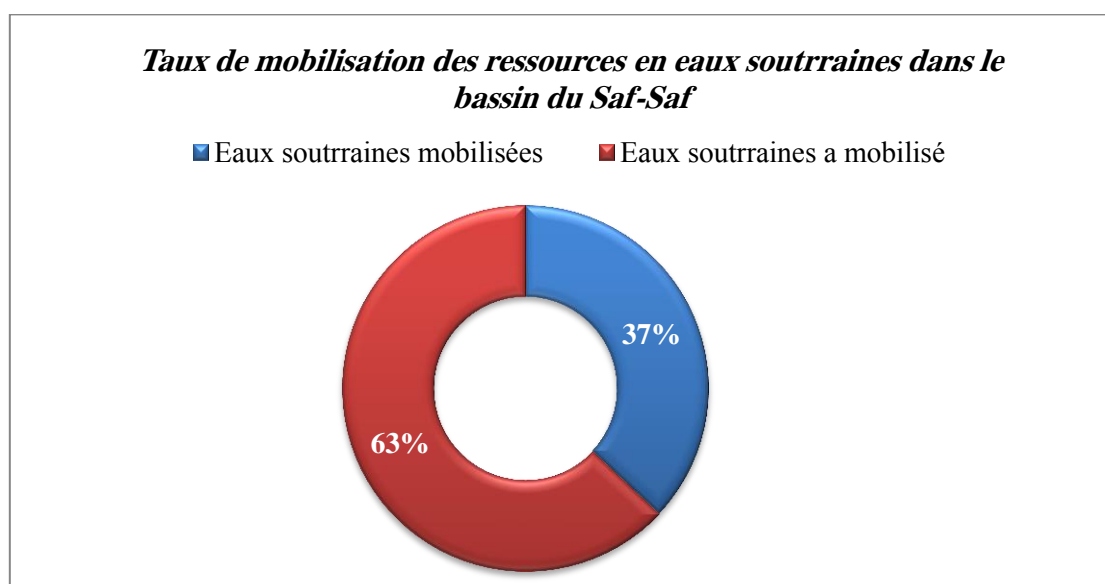


Fig n° 4.7: Taux de mobilisation des ressources en eaux souterraines dans le bassin Saf-Saf.

4.2 Affectation des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf :

Concernant l'affectation des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf, la partie la plus importante des eaux mobilisées est destinée à la satisfaction des besoins domestiques (alimentation en eau potable), avec un volume de 25,29 hm³ par an, soit un taux de 44 %. Toutefois, cette dominance est due aux besoins des populations qui ne cessent à croître.

L'irrigation tient une place prépondérante dans les prélèvements d'eau dans le bassin, un volume de 23,46 hm³, soit 42 % de la totalité des ressources mobilisées, sont destinés aux usages agricoles. Le volume consacré pour couvrir les besoins en eau industrielle est évalué à 7,77 hm³ par an, soit 14 % des ressources mobilisées.

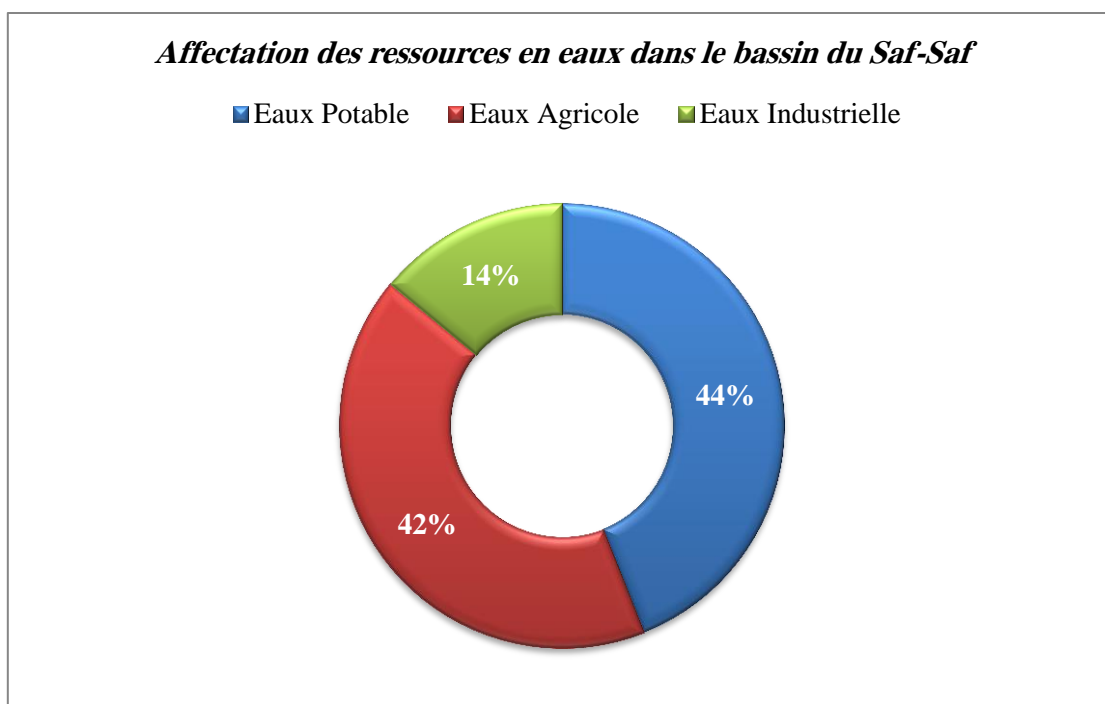


Fig n° 4.8: Affectation des ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf.

4.3 Alimentation en eau dans le bassin du Saf-Saf :

A chaque usage (domestique, industriel ou agricole), correspond des besoins en eau très variables en quantité et en qualité, suivant les secteurs et surtout les saisons. La demande en eau pour des usages domestiques devrait croître considérablement dans les prochaines années dans les pays en voie de développement.

Dans une étude récente, l'Organisation des Nations Unies rappelle que près de 1,1 milliards de personnes manquent d'eau potable, et que 2,9 milliards de personnes ne disposent pas de services d'assainissement, et estime que les problèmes d'approvisionnement en eau potable dans les pays en voie de développement se

verront aggravés par le taux élevé de croissance de population et la concentration graduelle de la population dans les grandes villes (ONU.1997 in Blanco).

Le bassin du Saf-Saf ne fait pas exception, ses besoins en eau sont en augmentation continue. Globalement, on estime les besoins en eau dans le bassin à près de 76,7 millions de m³ par an, dont la consommation domestique (AEP) est considérée comme le grand consommateur d'eau avec un volume de 30,95 millions de m³, soit un taux de 40 % de la totalité des besoins en eau du bassin. Toutefois cette dominance est due au développement démographique considérable dans le bassin.

Les besoins en eau d'irrigation pour alimenter le périmètre du Saf-Saf sont estimés à 36,75 millions de m³, soit un taux de 48 %. Quant aux besoins en eau industriels, ils ne représentent que 12 % de l'ensemble des besoins en eau du bassin du Saf-Saf. Cette distinction aux besoins en eau pour chaque usage fait ressortir la vocation agricole du bassin du Saf-Saf, concentrée surtout dans sa partie centrale.

Conclusion :

Le bassin du Saf-Saf d'une superficie de 1158 Km², couvre entièrement les Daïra de Skikda, Ramdane Djamel et El Harrouch, et partiellement les Daïra d'El Hadaeïk et Sidi Mezghiche. La population du bassin atteint les 451 717 habitants (2010), dont plus de 230 milles habitants (soit un taux de 53 %) sont localisés dans sa partie aval, Les besoins en eau dans le bassin sont estimés à près de 76,7 millions de m³ par an.

En matière d'approvisionnement en eau potable, Les dotations en eau présentées par habitant dans le bassin sont globalement bien inférieures à la moyenne nationale (150 l/j/hab), elles seraient en moyenne de l'ordre de (94 l/j/hab), mais elles sont très inégales suivant les régions, où dans le centre et l'aval du bassin les dotations dépassent les (105 l/j/hab).

Cependant, pour l'amont elles n'atteignent pas les (95 l/j/hab), les besoins en eau vont s'augmenter donc à 30,95 millions de m³. Cependant, le volume réellement produit pour couvrir ces besoins en eau domestiques est de l'ordre de 14,12 millions de m³ par an, soit un taux de satisfaction de près de 45,6 %.

Chimie et qualité des eaux

*Le modèle DPSIR pour la gestion d'un
périmètre irrigué dans le bassin versant
du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)*

Introduction

Malgré l'importance indéniable des aspects quantitatifs, les questions de qualité de l'eau sont au cœur des enjeux futurs. Il est primordial de souligner que le domaine de la préservation de l'écosystème et la protection des ressources en eau contre les différents types de pollutions, en tant que composante du système de la gestion intégrée des ressources en eau, présente un défi majeur pour les prochaines années, et un domaine promoteur de la protection de l'environnement; il devrait en effet être intégrée à tous les secteurs d'activité susceptibles d'avoir un impact sur l'environnement.

En plus de la pression exercée par les différents usagers, les ressources en eau dans le bassin du Saf-Saf se trouvent menacées dans leur qualité, sous l'effet des pollutions qu'elles subissent, principalement des pratiques industrielles et agricoles intensives. Ainsi que celles de l'individu dans son habitat (pollution domestique). Il s'agit donc d'un problème à grande échelle, dont l'extension est constante.

5.1 Chimie et qualité des eaux :

Les cours d'eau jouent le rôle de récepteurs et de transport des différents rejets urbains, industriels et agricoles. La charge de pollution est plus ou moins importante quand le phénomène d'autoépuration ne suffit plus. L'oued Saf-Saf représente le principal cours d'eau dans le bassin, la qualité de ses eaux varie de dans l'espace de l'amont vers l'aval et dans le temps suivant les saisons (hautes et basses eaux).

Dans le but de bien appréhender l'évolution de la qualité des eaux superficielles a pris en considération les résultats des analyses chimiques effectuées en 2009 par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH) de Constantine, ainsi que celles effectuées en 2012 par le Laboratoire des Etudes Maritimes (LEM Alger).

Le présent travail est une caractérisation physico-chimique et biologique de la qualité des eaux de l'oued Saf-Saf dans sa partie amont qui est dominé par des terres agricoles principalement montagneuses.

La présente étude consiste à la réalisation de quatre (04) campagnes (une campagne par trimestre) de prélèvement d'échantillons d'eau au niveau de la partie amont l'oued Saf-Saf.

Les différentes campagnes ont été effectuées comme suit :

- 1^{ère} campagne: 19 mai 2012. (Hautes eaux).
- 2^{ème} campagne: 15 août 2012. (Basses eaux).
- 3^{ème} campagne: 17 novembre 2012. (Basses eaux).
- 4^{ème} campagne: 22 mars 2013. (Hautes eaux).

A cet effet, l'échantillonnage a été effectué au niveau de deux (02) stations préalablement positionnées. Soit au total 08 échantillons d'eau à analyser au laboratoire au cours des campagnes. Les échantillons d'eau feront l'objet d'analyses en vue de la détermination de leurs caractéristiques physico-chimiques et leurs teneurs en polluants chimiques et organiques.

Ces analyses ont été réalisées par le laboratoire spécialisé « Centre National des Technologies et du Consulting (CNTC Boumerdes) ».

5.1.1. Mesures in situ :

- **Paramètres physiques :**

Cinq paramètres physico-chimiques (Température, pH, conductivité électrique, salinité et oxygène dissous) ont été mesurés in situ, immédiatement après le prélèvement de l'échantillon.

a. Température :

La température de l'eau, est un facteur écologique qui entraîne d'importantes répercussions écologiques. Elle agit sur la densité, la dissociation des sels dissous, de même que sur les réactions chimiques et biochimiques, le développement et la croissance des organismes vivant dans l'eau et particulièrement les microorganismes.

Dans la zone d'étude, les températures enregistrées oscillent entre 17,2°C et 21,7°C en période humide (hiver et automne), et entre 24,5°C et 28,4°C en période sèche (printemps et été). Ces variations de température suivent celles du climat de la région.

b. Potentiel d'Hydrogène (pH) :

Le pH de l'eau mesure la concentration des protons H^+ contenus dans l'eau. Il résume la stabilité de l'équilibre établi entre les différentes formes de l'acide carbonique et il est lié au système tampon développé par les carbonates et les bicarbonates. Les valeurs observées révèlent que le pH est légèrement neutre à alcalin dans toutes les stations de l'oued Saf-Saf, aussi bien en période de pluie qu'en période sèche. En effet, le pH varie entre 7,25 et 7,61. Ceci est dû à la présence de carbonates qui permettent de tamponner les eaux qui s'écoulent vers l'oued Saf-Saf.

c. Conductivité électrique :

La mesure de la conductivité constitue une bonne appréciation du degré de minéralisation d'une eau où chaque ion agit par sa concentration et sa conductivité spécifique. Les valeurs moyennes enregistrées, montrent des variations entre 1446 $\mu\text{s}/\text{cm}$ (été) et 646

$\mu\text{s/cm}$ (automne). L'explication de cette diminution réside dans la dilution des eaux par l'apport des eaux pluviales.

d. Salinité :

La salinité mesure la concentration d'une eau en sels dissous (chlorure de sodium, chlorure de magnésium, sulfate de magnésium ...etc.). Les salinités mesurées au niveau d'oued Saf-Saf varient de 0,38 ‰ (en automne) et 0,67 ‰ (en été).

e. Oxygène dissous :

Les concentrations en oxygène dissous constituent, avec les valeurs du pH, l'un des plus importants paramètres de qualité des eaux pour la vie aquatique. Les valeurs d'oxygène dissous à l'oued Saf-Saf durant l'année varient de 6,60 et 9,83 mg/l.

5.1.2. Analyses aux laboratoires :

On a procédé à une analyse complète de tous les éléments majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} et HCO_3^-).

Les métaux lourds en traces (Fe^{3+} , Mn^{2+}) ont fait l'objet d'analyse pour les quatre campagnes. Les polluants résultants des activités agricoles ont été l'objet d'un suivi particulier (NO_3^-) ainsi que les matières en suspension (MES), la turbidité, la demande biologique en oxygène (DBO_5) et la demande chimique en oxygène (DCO).

Les résultats des analyses physico-chimiques des eaux de surface en amont de l'oued Saf-Saf durant les quatre campagnes de prélèvement sont présentés ci-dessous

5.1.2.1. Eléments majeurs :

a. Calcium (Ca^{2+}) :

Les concentrations enregistrées pour cet élément entre 100 mg/l à 160 mg/l sont plutôt stables durant l'année avec une diminution en automne arrive jusqu'au 42 mg/l. Les concentrations sont importantes pendant l'année mais ne dépassent pas les valeurs indicatives algériennes d'eau potable parus dans le décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

b. Potassium (K^+) :

Un pic de 7 mg/l est enregistré pour cet élément pendant la saison du printemps, mais sans atteint des valeurs très élevées par rapport aux valeurs indicatives relatives à la qualité d'eau potable. La concentration de cet élément atteint des valeurs très faibles le reste de l'année varient entre 1 mg/l à 2,1 mg/l.

c. Sodium (Na^+) :

Cet élément est plutôt stable pendant l'année avec une légère variation de 30 mg/l à 40 mg/l entre les saisons ; la plus forte concentration c'est 65 mg/l qu'enregistrée pendant la saison d'automne. Ces résultats restent très inférieurs aux valeurs indicatives algériennes d'eau potable.

d. Magnésium (Mg^{+2}) :

Sa concentration est variable dans le temps mais elle reste très faible avec une légère augmentation de 30 mg/l qui commence en hiver et diminue au fur et à mesure avec le temps pour atteindre sa plus faible concentration de 10 mg/l en été. Il n'existe pas de valeur indicative pour cet élément dans le décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

e. Chlorures (Cl^-) :

Les chlorures sont en général stables toute l'année avec des valeurs de 60 mg/l à 100 mg/l qui ne dépassent pas les valeurs indicatives de la qualité d'eau potable.

f. Sulfates (SO_4^{2-}) :

Les sulfates sont présents dans l'eau de l'oued Saf-Saf avec des fortes concentrations de 300 mg/l durant les saisons printemps, en atteignant la valeur indicative relative à la qualité d'eau potable pendant la saison d'été (385 mg/l).

g. Carbonates (CO_3^{2-}) :

La concentration des carbonates est plus ou moins stable durant l'année, elle arrive à 6 mg/l en été. Il n'existe pas de valeur indicative pour cet élément dans le décret exécutif n° 11-125 du 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

5.1.2.2 Métaux lourds et Nitrates :**a. Fer (Fe^{2+}) :**

La plus forte concentration pour cet élément est enregistrée durant l'automne 0,38 mg/l elle dépasse la valeur indicative relative à la qualité d'eau potable; sa concentration diminue et se stabilise entre 0,05 mg/l à 0,1 mg/l pendant le reste de l'année.

b. Manganèse (Mn^{2+}) :

La concentration du manganèse dans l'eau de l'oued est aussi variable avec le temps, la plus forte concentration est 0,11 mg/l enregistrée en automne. Les concentrations de cet élément ont dépassé les valeurs indicatives relatives à la qualité d'eau potable pour presque tous les échantillons sauf pour celle 0,014 mg/l enregistrée en hiver.

c. Nitrates (NO_3^-) :

Les concentrations pour cet élément donnent une information sur l'oxydation de la matière organique. Les teneurs en nitrate varient de 0,05 mg/l à 4,76 mg/l durant toute l'année, ces concentrations restent faible et ne dépassent pas la valeur limite pour les eaux potables de 50 mg/l. Ces faibles valeurs indiquent que l'eau de l'oued est bien oxygénée et la dégradation de la matière organique est plus ou moins complète.

5.1.2.3 Analyses physico-chimiques :**a. Turbidité :**

Les concentrations sont 0,05 mg/l à 1 mg/l qui sont dessous de la valeur indicative toute l'année sauf au printemps ou elle atteint des valeurs très élevées jusqu'à 11 mg/l (10 fois sa valeur moyenne pour les autres saisons).

b. Demande biologique et chimique en Oxygène (DBO_5 , DCO) :

Le résultat moyen était de 37,16 mg/l, c'est une valeur forte pour une eau destinée à être potable et un traitement approprié est nécessaire. On retient que les concentrations de la demande biologique en oxygène (DBO_5) et la demande chimique en oxygène (DCO) sont considérées comme élevé en générale avec des pics pendant l'automne. Ce qui indique une forte pollution au niveau de l'oued.

c. Matières en suspension (MES) :

Les matières en suspension sont absentes pendant l'année, sauf un pic de 200 mg/l enregistré en automne qui pourrait être due à la remise en suspension des matières déposés sur le lit de l'oued.

5.1.2.4. Analyses bactériologiques :

L'analyse bactériologique permet de mettre en évidence la pollution fécale de l'eau. Les organismes pathogènes qui peuvent être présents dans l'eau sont très nombreux et très variés.

a. Germes totaux :

Leur présence dans l'eau témoigne de l'existence d'une contamination fécale.

A 22 °C : dans notre cas, la présence des germes totaux à 22°C a été enregistrée durant les saisons de printemps et été.

A 37°C : par contre pour les germes totaux à 37°C, leur présence a été enregistrée durant toute l'année.

b. Coliformes totaux à 37 °C et fécaux à 44°C :

Les coliformes ont été présents durant toute l'année dans l'eau d'oued Saf-Saf avec une concentration supérieur à 240 NPP/100ml.

c. Streptocoques fécaux 37°C :

Les streptocoques fécaux sont en grande partie d'origine humaine, dans notre cas l'apparition des streptocoques ont été enregistré durant l'automne et l'hiver.

d. Clostridium sulfito-réducteurs 46°C :

Les analyses ont montré une absence totale des clostridium sulfito-réducteurs 46°C durant toute l'année.

Les analyses microbiologiques ont mis en évidence une contamination bactérienne moyenne à importante qui peut être d'origine humaine, agricole ou animale. Cette contamination peut être due aux rejets des eaux domestiques des villageois ainsi que la digestion des animaux d'élevage installés à proximité de l'oued Saf-Saf. Selon la classification Algérienne des eaux de surfaces, les analyses enregistrées classent ces eaux de surfaces de mauvaise qualité bactériologique. Cette eau ne pourrait être destinée à la consommation sans traitement préalable pour éliminer toute pollution bactériologique.

5.1.3. Représentation graphique des analyses chimiques :

Pour une bonne visualisation des résultats (Tableau n° 5.1), on a représenté ces derniers sur les diagrammes de Stabler, Schoëller- Berkaloff, Piper et Stiff.

Tab n°5.1 : Représentation des formules ioniques et les faciès chimiques.

Station	Formule ionique	Faciès chimique
S1C1	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rCO_3^{2-} > rNO_3^- - rCa^{2+} > rMg^{2+} > r(Na^+ + K^+)$	Sulfaté-calcique
S2C1	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rCO_3^{2-} > rNO_3^- - rCa^{2+} > rMg^{2+} > r(Na^+ + K^+)$	Sulfaté-calcique
S1C2	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rCO_3^{2-} > rNO_3^- - rCa^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+}$	Sulfaté-calcique
S2C2	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rCO_3^{2-} > rNO_3^- - rCa^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+}$	Sulfaté-calcique
S1C3	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rCO_3^{2-} > rNO_3^- - r(Na^+ + K^+) > rCa^{2+} > rMg^{2+}$	Sulfaté-sodique
S2C3	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rCO_3^{2-} > rNO_3^- - rCa^{2+} > r(Na^+ + K^+) > rMg^{2+}$	Sulfaté-calcique
S1C4	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rCO_3^{2-} > rNO_3^- - rCa^{2+} > rMg^{2+} > r(Na^+ + K^+)$	Sulfaté-calcique
S2C4	$rSO_4^{2-} > rCl^- > rCO_3^{2-} > rNO_3^- - rCa^{2+} > rMg^{2+} > r(Na^+ + K^+)$	Sulfaté-calcique

a) Le diagramme de Stabler :

L'interprétation des résultats des analyses chimiques des eaux de surface en amont du l'Oued Saf-Saf révèle un faciès dominant de type sulfaté-calcique 87,5%, à l'exception des échantillons de la station (01) durant la campagne 3 (S1C3), on a un faciès sulfaté-sodique.

On constate donc que pour les 08 échantillons analysés, le faciès dominant est de type sulfaté-calcique (Figure n°5.1).

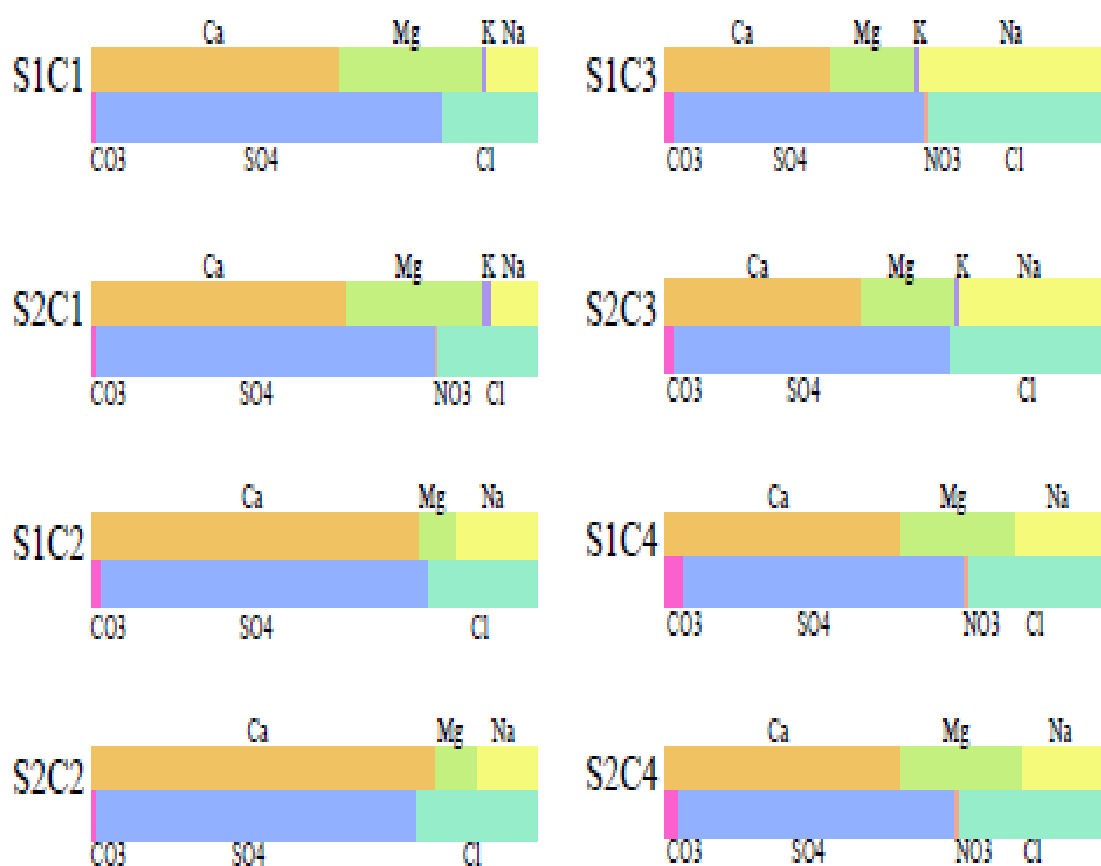


Fig n° 5.1: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de surface en amont du bassin sur le diagramme de Stabler (2012-2013).

b) Diagramme de Schoëller-Berkaloff :

L'interprétation des diagrammes de Schoëller-Berkaloff montre que les eaux de surface en amont du bassin sont dominées par le faciès chimiques sulfaté-calcique, qui apparaît dans la figure (n°5.2).

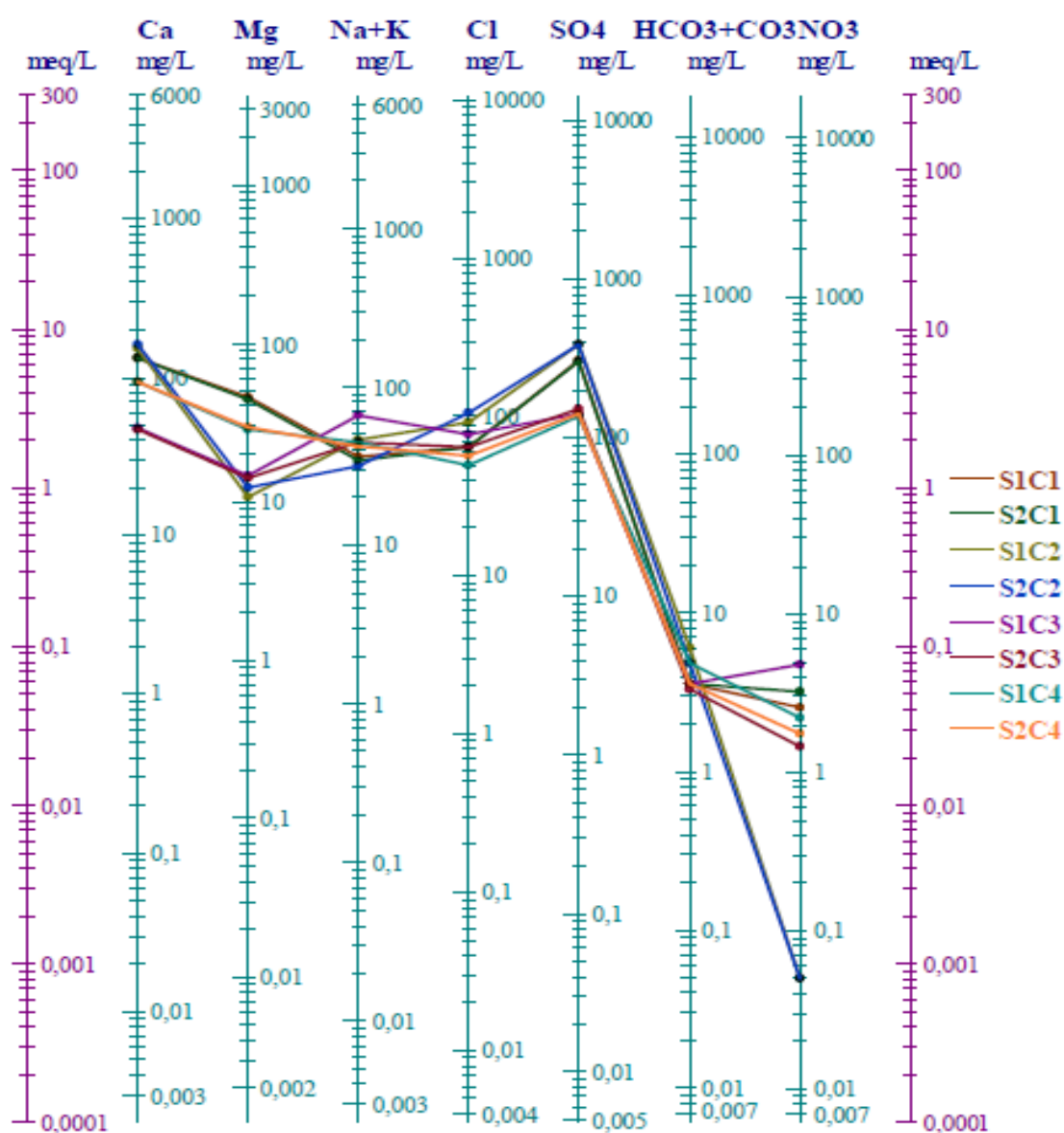


Fig n° 5.2: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de surface en amont du bassin sur le diagramme de Schöeller-Berkaloff (2012-2013).

c) Diagramme de Piper :

A partir du diagramme de Piper des eaux de surface en amont du bassin (Figure n°5.3), les points figuratifs des analyses situent les cations dans le domaine calcique (87%) et accessoirement dans le domaine sodique (13%). Les anions sont plutôt figurés à (100%) dans le domaine Sulfaté. Ainsi, nous observons un faciès chimiques dominant Sulfaté- calcique.

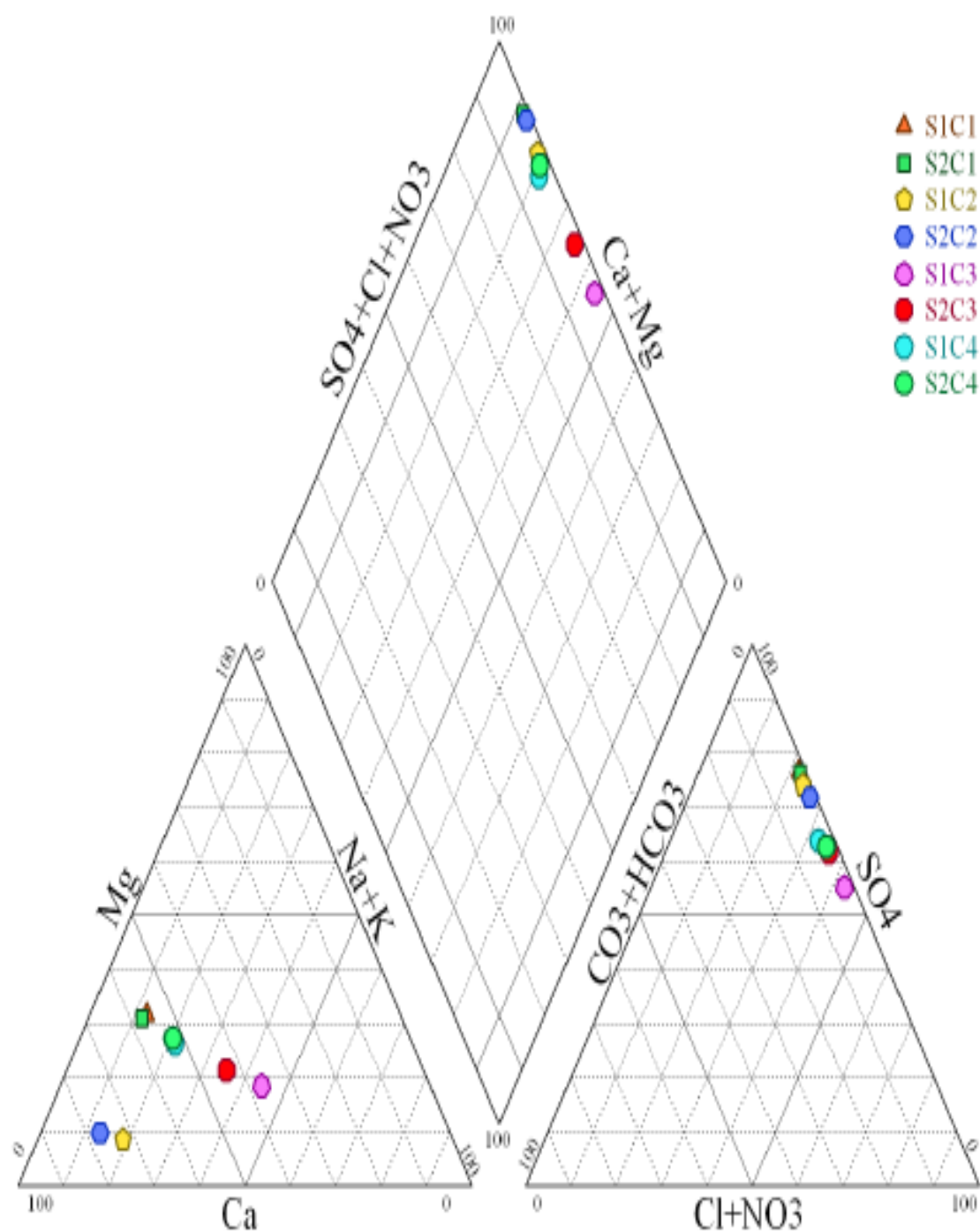


Fig n°5.3: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de surface en amont du bassin sur le diagramme de Piper (2012-2013).

d) Diagramme de Stiff :

Le diagramme de Stiff donne une interprétation claire sur les faciès chimiques cités dans le tableau (n°5.1) En plus, cette représentation permet un archivage graphique des analyses chimiques.

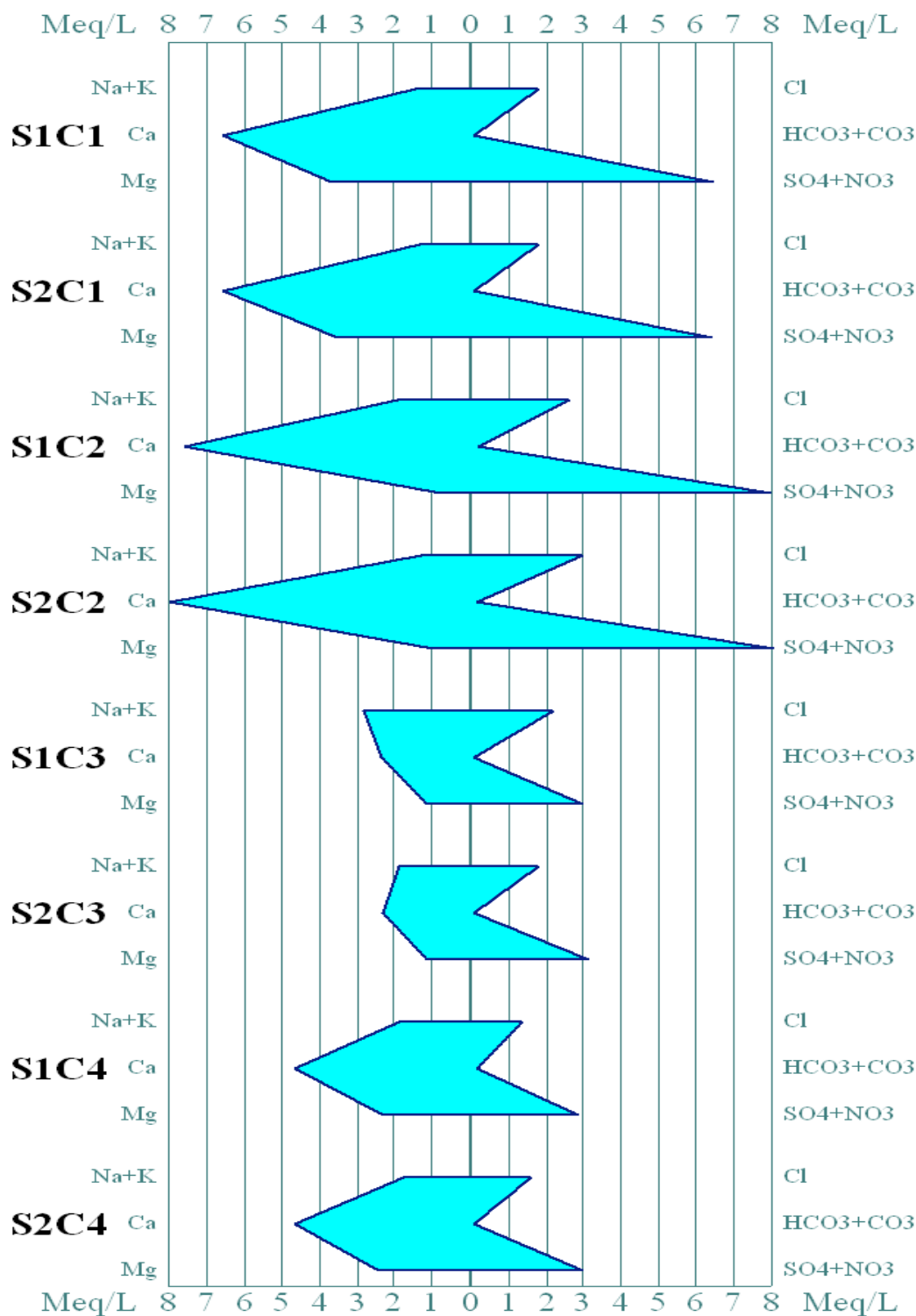


Fig n°5.4 : Représentation graphique des faciès chimiques des eaux de surface en amont du bassin sur le diagramme de Stiff (2012-2013).

5.2. Qualité des eaux du barrage de Zerdézas :

Pour avoir une idée sur la variation temporelle de la qualité des eaux de surface, on a jugé utile d'étudier l'évolution de la qualité des eaux du barrage de Zerdézas. On a pris en considération les résultats des analyses chimiques effectuées par l'agence nationale des ressources hydrauliques (ANRH) de Constantine. Les données ont porté sur une période de quatorze (14) années, s'étendant de 2000 à 2013.

Les concentrations annuelles retenues dans notre étude, représentent les moyennes des valeurs mensuelles enregistrées durant une année (douze prélèvements par année). L'interprétation des résultats d'analyses chimiques a pour but de déterminer les différents faciès chimiques des différentes analyses et d'effectuer des comparaisons temporelles des différents paramètres de potabilité des eaux du barrage.

5.2.1. Représentation graphique des analyses chimiques :

Pour une bonne visualisation des résultats, on a représenté ces derniers sur les diagrammes de Stabler, Stiff, Piper et Schoeller-Berkaloff.

a. Diagramme de Stabler :

Afin de vérifier la fiabilité des analyses, on a vérifié les résultats obtenus en établissant la balance ionique pour chaque analyse, nous avons établi la formule ionique et cela en classant par ordre décroissant de gauche à droite les anions puis les cations. A partir de ces formules ioniques, découle le faciès chimique spécifique pour chaque point de prélèvements. (Tab n° 5.2).

Tab n°5.2: Représentation des formules ioniques et les faciès chimiques.

Années	Formule ionique	Faciès chimique
2000	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+} > r\text{K}^+$	Bicarbonaté-calcique
2001	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Mg}^{2+} > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Sulfaté-magnésien
2002	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Mg}^{2+} > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Bicarbonaté-magnésien
2003	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique
2004	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique
2005	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique
2006	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique
2007	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique
2008	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique
2009	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique

2010	$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+} > r\text{K}^+$	Bicarbonaté-calcique
2011	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+} > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique
2012	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+} > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique
2013	$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{NO}_3^- - r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+} > r\text{K}^+$	Sulfaté-calcique

L'interprétation des résultats des analyses chimiques des eaux du barrage de Zerdézas révèle un faciès dominant de type sulfaté-calcique à magnésien représentant 80% (2003 à 2009 et de 2011 à 2013). Le second est de type bicarbonaté-calcique à magnésien correspond à 20%, 2000, 2002 et 2010).

On constate donc que durant les dix dernières années (2003 à 2013), le faciès dominant est de type sulfaté-calcique (Figure n°5.5).

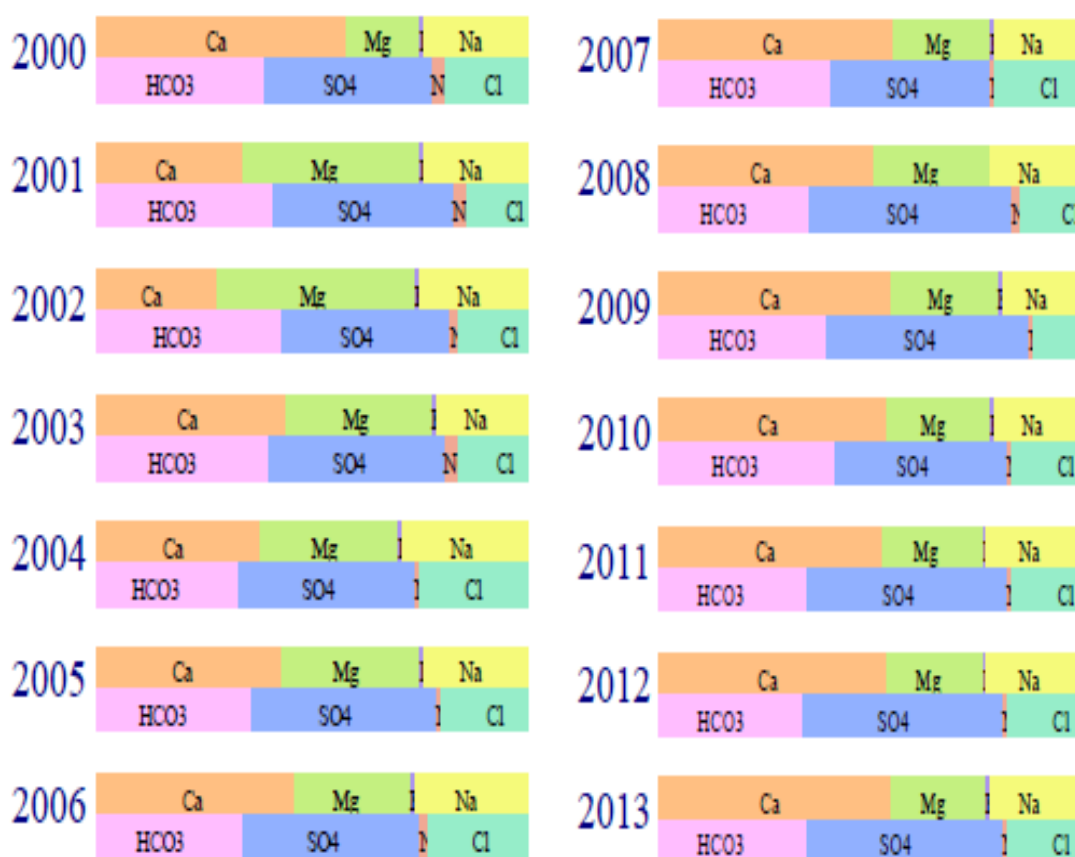


Fig n°5.5: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux du barrage de Zerdézas sur le diagramme de Stabler (2000-2013).

b. Diagramme de Schoëller-Berkaloff :

L'interprétation des diagrammes de Schoëller-Berkaloff montre que les eaux du barrage sont classées en deux faciès chimiques dominants ; sulfaté-calcique et bicarbonaté-calcique à magnésien, qui apparaissent dans la figure (n°5.6).

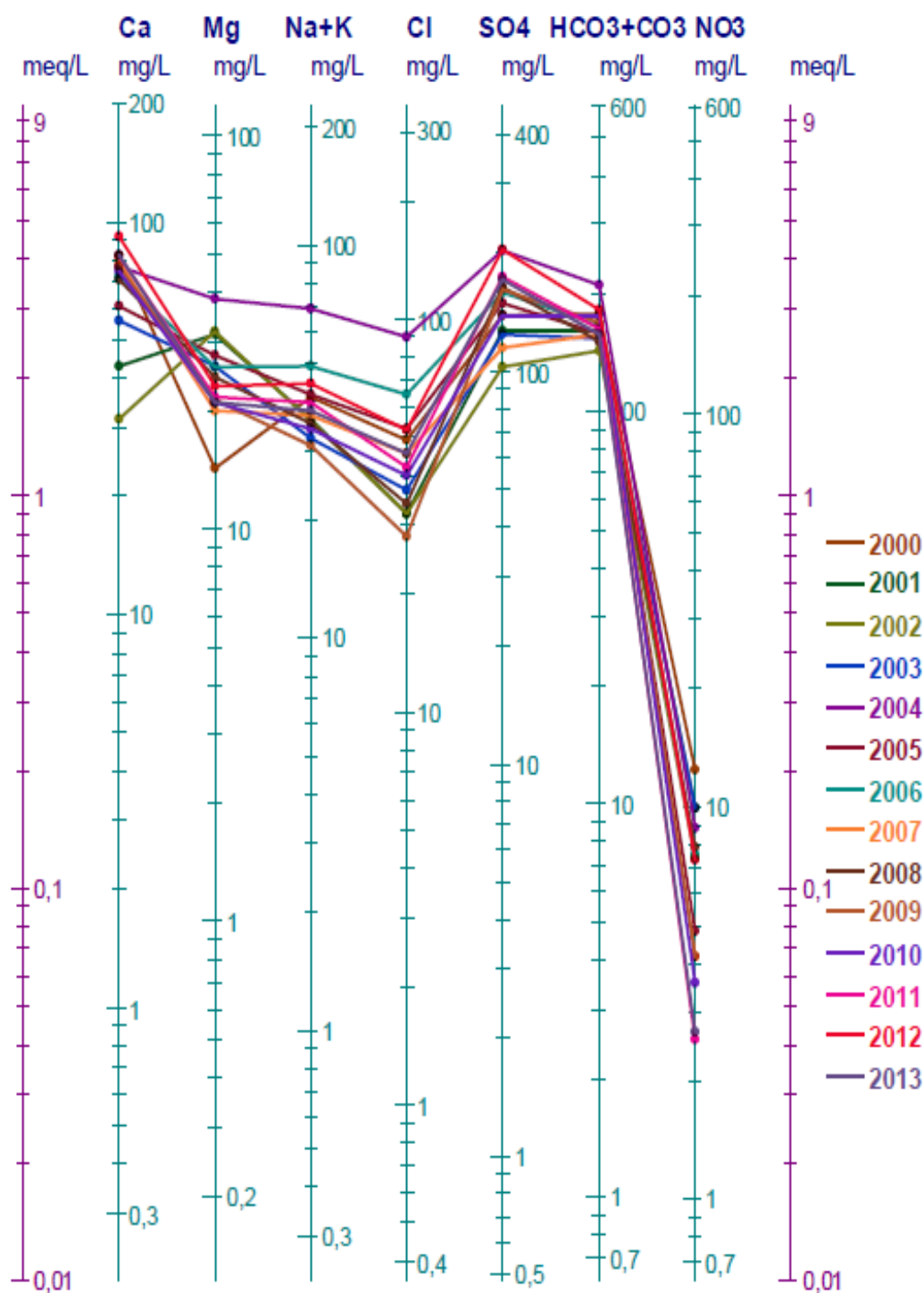


Fig n° 5.6: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux du barrage de Zerdézas (2000-2013) sur le diagramme de Schöeller- Berkaloff.

c. Diagramme de Piper :

A partir du diagramme de Piper des eaux du barrage de Zerdézas (Figure n°5.7), les points figuratifs des analyses situent les cations dans le domaine calcique (85%) et

accessoirement dans le domaine magnésien (15%). Les anions sont plutôt figurés à (71%) dans le domaine Sulfaté et accessoirement dans le domaine bicarbonaté (29%). Ainsi, nous observons deux principaux faciès chimiques :

Sulfaté – calcique.

Bicarbonaté - calcique.

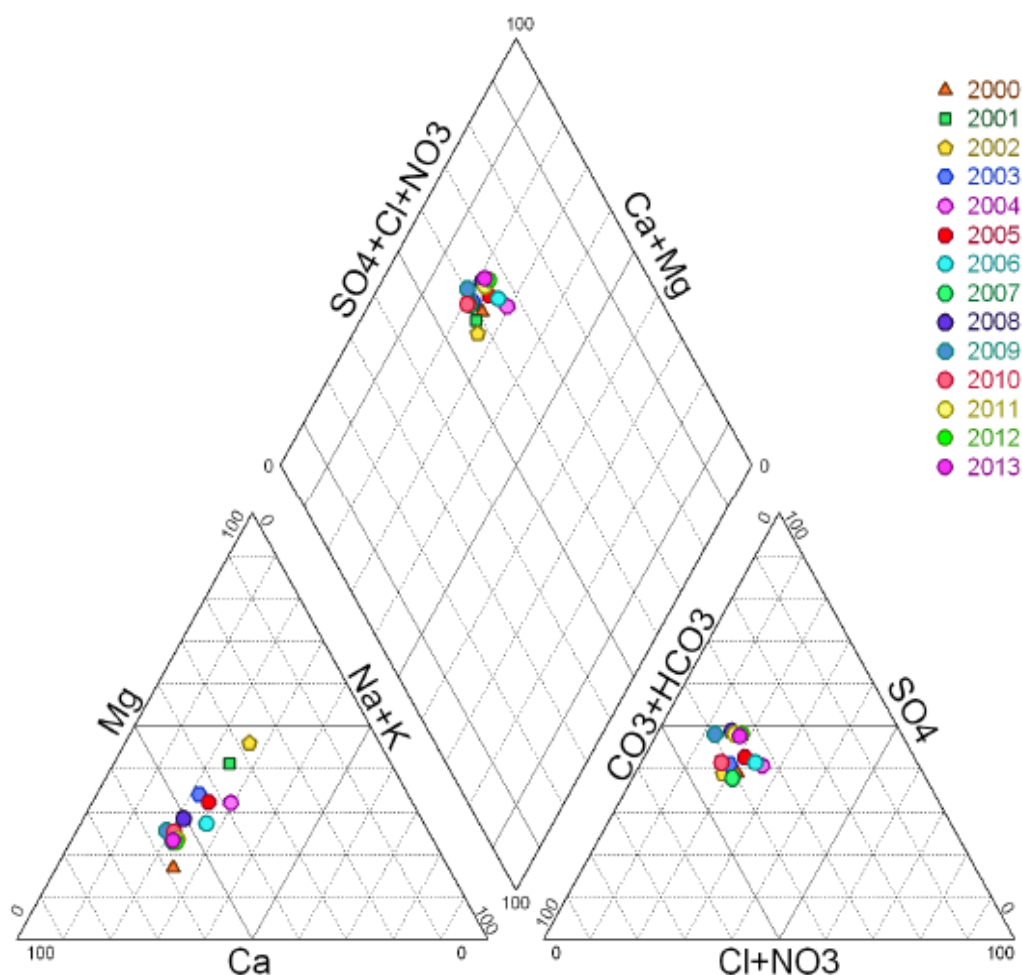


Fig n°5.7: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux du barrage de Zerdézas (2000-2013) sur le diagramme de Piper.

d. Diagramme de Stiff :

Le diagramme de Stiff donne une interprétation claire sur les faciès chimiques cités dans le tableau (n°5.2) En plus, cette représentation permet un archivage graphique des analyses chimiques.



Fig n° 5.8: Représentation graphique des faciès chimiques des eaux du barrage de Zardézas (2000-2013) sur le diagramme de Stiff.

5.2.2 Aptitude des eaux à l'irrigation :

Les eaux de la région d'étude sont destinées à l'irrigation, c'est pour cela que nous sommes obligés de classer ces eaux, en utilisant le diagramme de Wilcox.

5.2.2.1 Principe du diagramme :

Le SAR est donné par la formule :

$$\text{SAR} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{(\text{Ca}^{2+}) + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

Où : Na^+ , Ca^{2+} et Mg^{2+} sont exprimés en méq/l.

Les valeurs de SAR sont représentées en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau, cette dernière permet une estimation de la minéralisation des eaux, elle est exprimée en $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Les eaux du barrage sont destinées aussi à l'irrigation, c'est pour cela que nous sommes obligés de classer ces eaux, en utilisant le diagramme de Wilcox.

Tab n°5.3 : Classification des eaux par degré d'aptitude à l'irrigation (méthode du SAR) du barrage de Zerdézas (2000-2013).

Degré	Qualité	Classe	Années	Etat d'utilisation
2 ^{ème}	Bonne	C ₂ -S ₁	2000, 2001, 2002, 2003, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2012, 2013.	En général, eau pouvant être utilisée sans contrôle particulier pour l'irrigation de plantes moyennement tolérantes en sels.
3 ^{ème}	Admissible	C ₃ -S ₂	2004	En général, eau convenant à l'irrigation des cultures tolérantes en sel, sur des sols bien drainés l'évolution de la salinité doit cependant être contrôlée.

Sur le diagramme de Wilcox (Figure n°5.9), on peut distinguer les classes des eaux étudiées pour les quatorze années, les résultats sont reportés dans le tableau (n°5.3).

Pour les années allant de 2000 à 2003, et de 2005 à 2013, les conductivités électriques varient entre 250 et 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ceci explique pourquoi les eaux figurent dans la classe bonne qualité. Contrairement à l'année 2004 où la conductivité dépasse les 750 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (950 $\mu\text{S}/\text{cm}$), les eaux sont donc de qualité admissible.

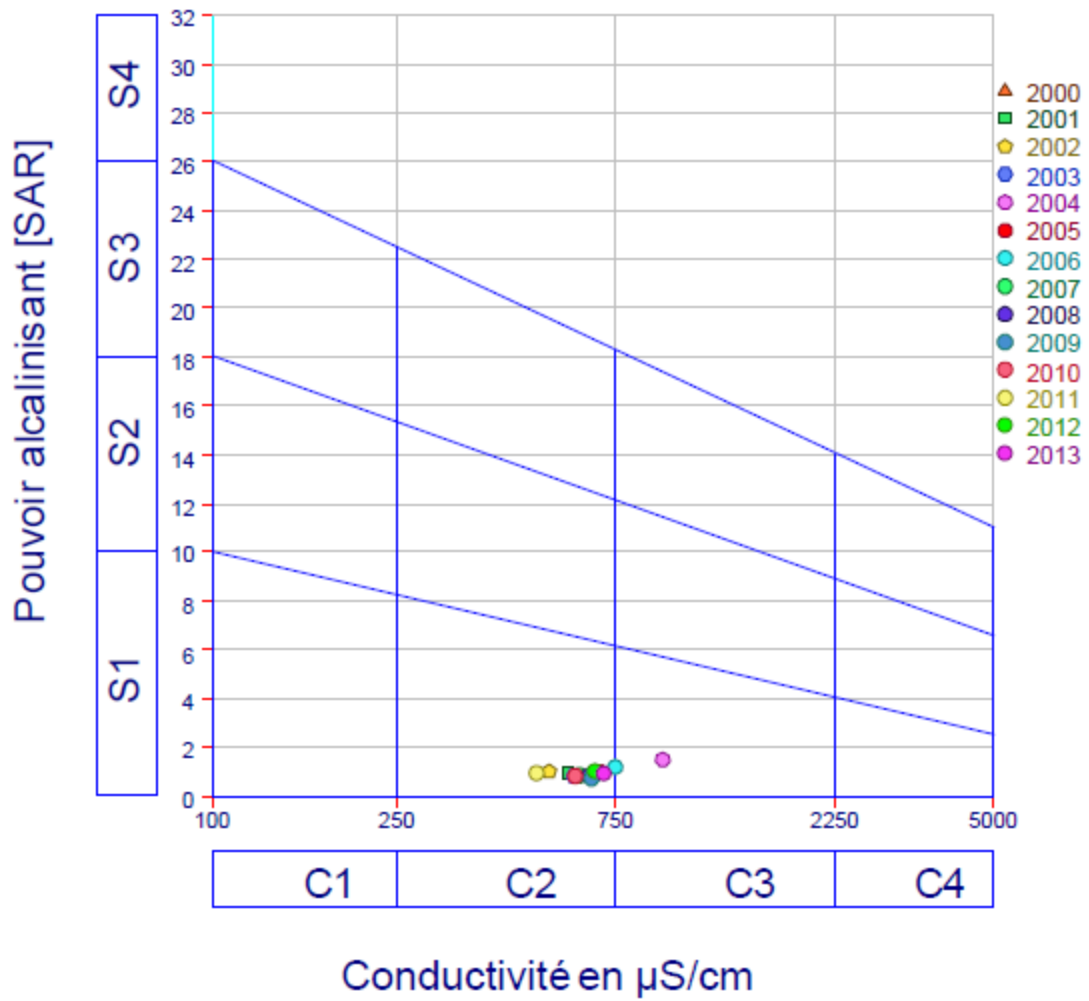


Fig n°5.9: Représentation graphique des eaux du barrage de Zerdézas sur le diagramme de Wilcox (2000-2013).

Conclusion :

Les eaux superficielles de l'oued Saf-Saf sont caractérisées par les faciès chimiques dominants le chloruré-sodique.

Les deux représentations graphiques de Schoeller-Berkaloff et de Piper sur les résultats des analyses chimiques ont donné le même résultat.

Du point de vue salinité, sulfates et conductivité électrique, les eaux de surface correspondent aux bonnes eaux, tandis que pour les chlorures, ces eaux correspondent aux eaux mauvaises.

Pour le sodium les normes ont montré que les eaux de surface sont mauvaises, alors que pour les bicarbonates, le pH et les nitrates les normes ont montré que les eaux de surface de la région d'étude sont bonnes pour l'irrigation.

Dans l'ensemble, les eaux du barrage de Zerdézas ont une bonne qualité vis-à-vis la potabilité. L'interprétation des résultats des analyses chimiques des eaux du barrage révèle deux faciès chimiques dominants, le premier est de type sulfaté-calcique. Le second est bicarbonaté-calcique à magnésien. En tenant compte des considérations du SAR en fonction de la conductivité, les eaux du barrage ont une bonne qualité pour l'irrigation.

Modélisation de la gestion intégrée des ressources en eaux

*Le modèle DPSIR pour la gestion d'un
périmètre irrigué dans le bassin versant
de Saf-Saf (Nord-Est Algérien)*

Introduction :

La gestion intégrée est ainsi basée sur la perception de l'eau comme une partie intégrante des milieux aquatiques, une ressource naturelle et un bien social et économique dont la qualité et la quantité déterminent la nature de son utilisation. En d'autres termes, la GIRE prend en compte les différents éléments et aspects du cycle hydrologique dans un processus de gestion cohérent, contrairement aux approches de gestion sectorielle usitées, et ce, pour maximiser les bénéfices socioéconomiques de manière équitable en préservant les écosystèmes et l'environnement. Ainsi, la ligne directrice de la GIRE est représentée par la politique de gestion adoptée sur le bassin versant, en fonction de ses propres enjeux.

6.1 Développement Durable et Durabilité de la Ressource en Eau :

La gestion intégrée des ressources en eau est un concept empirique élaboré à partir d'expériences sur le terrain. Plusieurs de ses éléments existent déjà depuis plusieurs décennies (depuis la première conférence mondiale sur l'eau qui s'est tenue à Mar del Plata en 1977), mais c'est à partir la Commission Brundtland qu'a défini, lors du Sommet de Rio Janeiro en 1992 à l'issue du Sommet de la Terre pour le développement durable que l'on s'est véritablement interrogé sur la dimension pratique de ce concept.

Le chapitre 18 de l'agenda 21 a traduit la nécessité d'une gestion intégrée du sol, de l'eau et des écosystèmes à l'échelle du bassin versant, unité géographique reconnue comme la plus appropriée.

Le développement durable est « un développement qui permet la satisfaction des besoins présents sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs ». Les **trois piliers** du développement durable : le pilier écologique, le pilier social, le pilier économique (Figure n°6.1). Conjonction du **viable** (plan économique), de **l'équitable** (plan social) et de **vivable** (plan écologique).

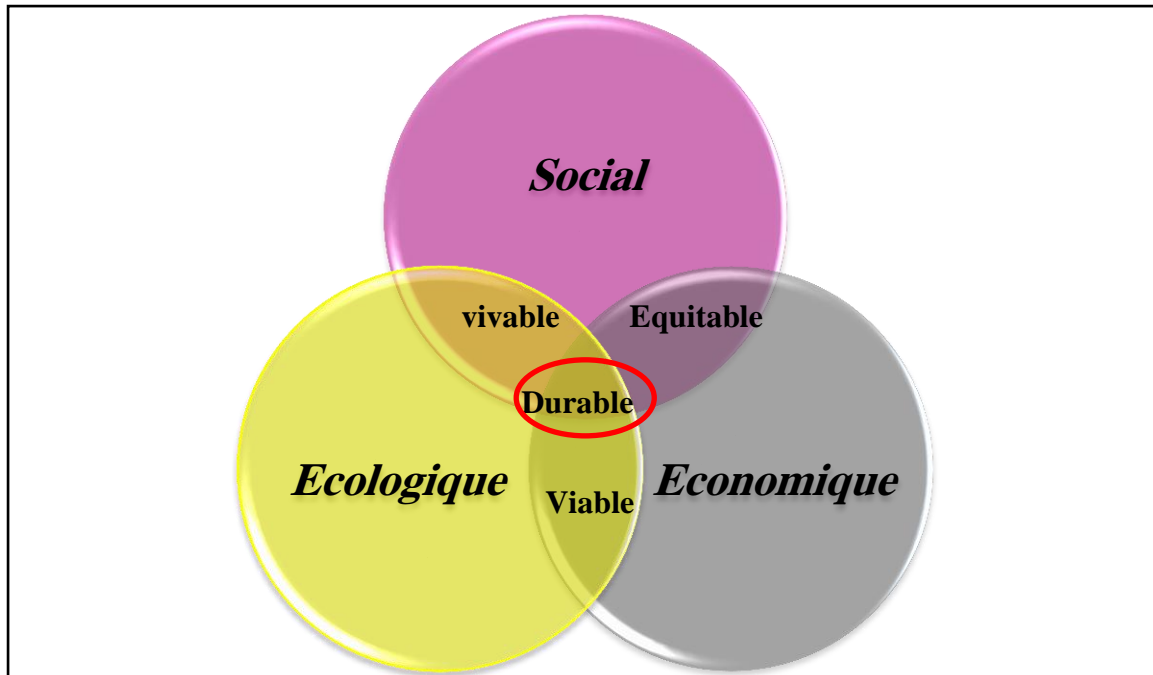


Fig n° 6.1: Les trois piliers du développement durable.

Le cycle hydrologique doit être appréhendé dans sa globalité par une «gouvernance sociétale» qui, seule, peut garantir la pérennité du couple eau-développement durable, en impliquant gouvernements et citoyens (Froger et alii, 2005). La gouvernance sociétale doit intégrer l'ensemble des responsabilités, du local au régional. Si l'enjeu est global, les opportunités d'action sont locales. Cela exige des accords nationaux, notamment pour le partage des ressources entre les secteurs économiques ou riverains, mais aussi en vertu du principe de subsidiarité la réalisation d'une multitude d'actions pour résoudre des problèmes de proximité. Ces actions ont pour but de protéger en quantité et en qualité voire de créer l'accès à la ressource en eau (Merlin-Brogniart et alii, 2009). Ces actions s'inscrivent dans les projets de coopération décentralisée, qui montrent leur efficacité dans la réalisation d'opérations adaptées aux besoins ainsi que dans le transfert de savoir-faire et d'innovation organisationnelle réalisés entre des collectivités françaises.

L'intégration des concepts de durabilité de l'eau dans le secteur de gestion est devenue un objectif général pour tous les pays du monde dans l'ordre d'accomplir la durabilité de ses ressources en eau et sa gestion.

6.1.1 L'objectif de développement :

Moteur du développement économique et social, l'eau est également un élément essentiel à la préservation de l'environnement naturel. L'eau n'étant cependant qu'une

ressource naturelle vitale parmi bien d'autres, il importe de ne pas envisager isolément les questions relatives aux ressources en eau.

Les dirigeants des secteurs publics ou privés ont des décisions cruciales à prendre en matière de répartition de l'eau. Ils sont confrontés à la nécessité de répartir des réserves en diminution, afin de répondre à des demandes toujours plus grandes. Des facteurs tels que les changements climatiques et démographiques accentuent encore les enjeux liés aux ressources en eau. À l'heure où l'approche fragmentée traditionnelle n'est plus viable, il convient d'adopter une approche globale de la gestion des ressources en eau.

Tel est l'objectif auquel entend répondre la gestion intégrée des ressources en eau (GIRE), désormais internationalement reconnue comme la meilleure approche pour une mise en valeur et une gestion efficace, équitable et durable des ressources mondiales limitées en eau, face à des demandes grandissantes.

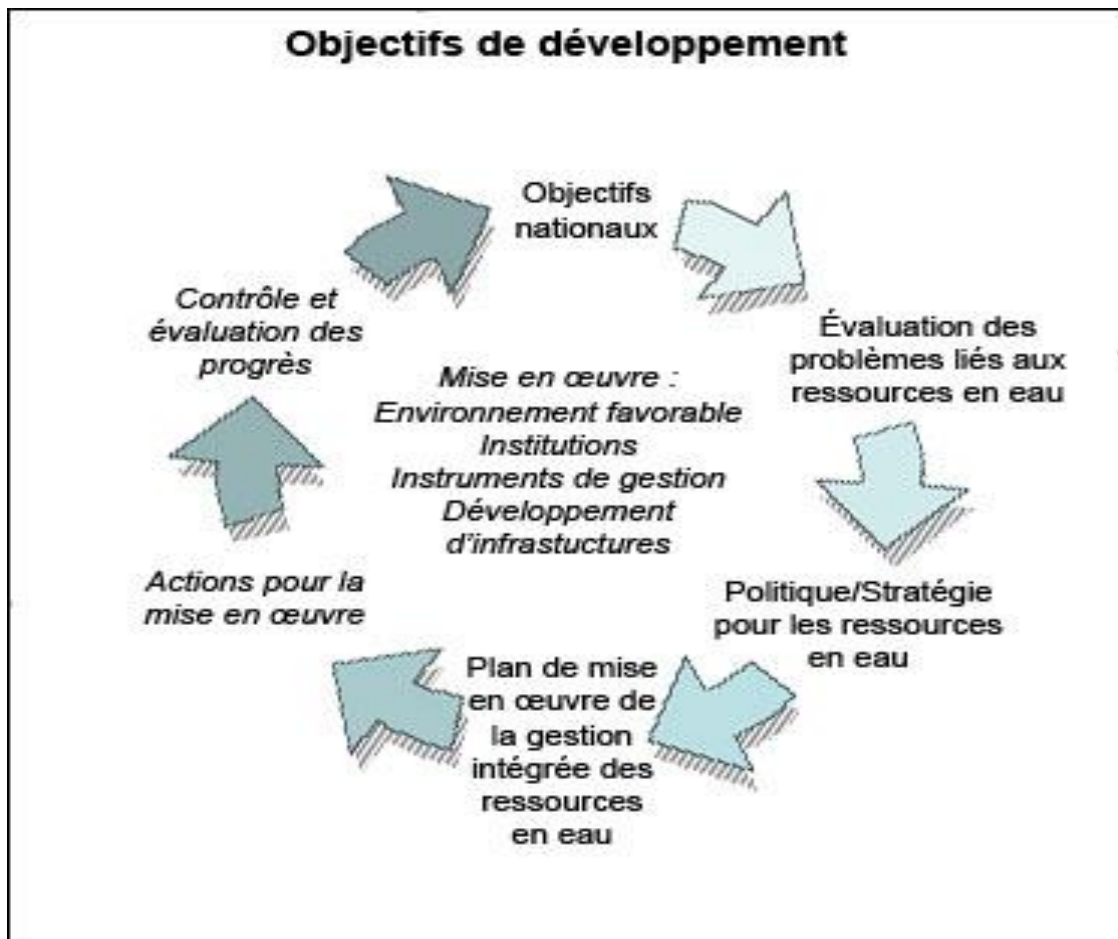


Fig n°6.2 : Étapes de la planification et la mise en œuvre de la gestion intégrée des ressources en eau.

Les disponibilités en eau sont très disparates d'une région à l'autre, des déserts aux forêts tropicales. Elles peuvent en outre évoluer au fil du temps, en conséquence des variations saisonnières et interannuelles. Bien souvent, le degré de variabilité et de périodicité de l'approvisionnement sont imprévisibles : il s'ensuit des fluctuations qui posent un défi considérable aux gestionnaires des ressources en eau en particulier et aux sociétés dans leur ensemble.

Pour la plupart, les pays développés ont réussi à surmonter artificiellement la variabilité naturelle grâce à des infrastructures d'approvisionnement permettant d'assurer des réserves fiables et de réduire les risques. Ces mesures entraînent cependant des coûts importants et des conséquences négatives sur l'environnement, voire sur la santé et les conditions de vie des hommes. Beaucoup de pays moins développés, ainsi que certains pays développés, ont aujourd'hui conscience que les solutions d'approvisionnement ne suffisent pas à faire face à l'accroissement de la demande généré par les contraintes démographiques, économiques et climatiques. Le traitement des eaux usées, le recyclage de l'eau de pluie et la gestion de la demande sont autant d'initiatives qui viennent répondre aux défis posés par la pénurie des ressources.

En plus des problèmes quantitatifs, s'ajoutent des problèmes qualitatifs. La pollution des sources d'eau potable menace les consommateurs et la préservation des écosystèmes naturels. Dans plusieurs régions, quantité et qualité des ressources en eau sont gravement affectées par la variabilité du climat et par les changements climatiques, du fait des précipitations et de phénomènes météorologiques extrêmes. Par ailleurs, la demande augmente du fait de l'accroissement de la population et autres mutations démographiques (en particulier l'urbanisation) ainsi que de l'expansion agricole et industrielle entraînée par les nouveaux schémas de consommation et de production. Certaines régions se trouvent ainsi confrontées en permanence à une demande qui excède leur approvisionnement, tandis que de nombreuses autres le sont à des saisons critiques ou lors d'années de sécheresse.

6.1.2 Qu'est-ce que la « gestion intégrée des ressources en eau »?

La Gestion Intégrée des Ressources en Eau GIRE concerne la gestion de l'eau dans l'ensemble des réservoirs d'eau naturels (atmosphère, biosphère, glaciers, océans, eaux de surface et souterraines) de façon intégrée c'est-à-dire en tenant compte des impacts des usages de l'eau et activités humaines les uns sur les autres.

Le Partenariat Mondial de l'Eau a défini la GIRE comme "un processus qui promeut le développement et la gestion coordonnées de l'eau, des terres et des ressources liées afin de

maximiser le bien-être économique et social résultant de manière équitable sans compromettre la durabilité des écosystèmes vitaux".

La GIRE apporte des réponses originales en alternative à une gestion sectorielle des ressources en eau qui ne les considère pas dans leur ensemble ni pour toutes les activités humaines. Elle permet l'optimisation des usages et le partage des bénéfices entre secteurs ou entre États riverains qui se partagent un même bassin fluvial. Klohn et Appelgren (1998) a souligné la nécessité d'une approche intégrée englobant des politiques sociales, économiques et environnementales, Ils ont évoqué les relations entre la rareté de l'eau et de ses forces motrices, notamment la croissance démographique, la dégradation de l'environnement et l'inégalité à l'accès d'eau. Le défi consiste à adopter une approche de gestion basée sur des facteurs critiques de ressources sociales, en particulier la pénurie d'eau qui ne peut pas être traitées par les techniques classiques axée sur l'offre. Ils ont souligné la nécessité d'élaborer des indicateurs sociaux et non économiques qui reflètent convenablement la capacité de la société à la rareté de l'eau afin d'éviter les conflits internes et externes.

Haddad et Linder (2001) ont effectué un examen critique de la gestion des ressources en eau dans le Moyen-Orient en mettant l'accent sur les Territoires Palestiniens et la Jordanie.

Ils ont été conclu que :

- La solution la moins coûteuse pour le développement de l'eau à court et moyen terme est la conservation de l'eau grâce à des pratiques de gestion de la demande en eau, y compris techniques, économiques, financières, institutionnelles, éducatives et juridiques,
- l'augmentation de l'approvisionnement en eau par la réutilisation des eaux usées, le stockage des eaux pluviales,
- mise supplémentaire des eaux par de dessalement de l'eau de mer et saumâtre.

Jonker (2002) définit la GIRE comme la gestion des activités des gens d'une manière qui favorise le développement durable par les moyens d'amélioration de subsistance sans perturber le cycle de l'eau.

La GIRE aussi, doit aborder les questions de l'accès et de l'équité, la protection des ressources, l'utilisation efficace, la gouvernance et l'utilisation des terres. Il a proposé un cadre conceptuel avec les pratiques des gens à micro-échelle au sein de la GIRE (mésos-échelle) et l'impact sur le développement durable (à macro-échelle).

IAHS (International Association of Hydrological Sciences) en 2003 a tenu deux catégories décisives de la GIRE :

- Le premier est le système naturel qui est un significatif critique pour la disponibilité quantitative et qualitative de l'eau,
- Le second est le système humain qui détermine l'utilisation et la pollution de la ressource.

L'approche intégrée doit équilibrer les deux catégories et leurs interdépendances. Souvent, la balance sera établie entre tous les consommateurs de l'eau et la restauration des eaux dans le cadre de la préservation de la nature.

Le concept d'intégration lie l'eau en quantité et en qualité, la réserve de l'eau et sa conservation, les eaux atmosphériques, superficielles et souterraines, les terres urbanisées et la gestion de l'eau, le développement économique, social et la préservation de l'écosystème, les consommateurs urbains et ruraux, pauvres et riches, la gouvernance de l'eau et la participation publique.

Dans la pratique, la gestion intégrée des ressources en eau varie selon le contexte – Au niveau opérationnel, l'enjeu est de traduire les principes admis en actions concrètes. Pour ce faire, on a souvent recours à ce qu'il est convenu d'appeler la gestion intégrée des ressources en eau, où il est entendu que la gestion englobe aussi bien la notion de gestion, que celle de développement. Cependant, le concept de gestion intégrée des ressources en eau, dont il n'existe pour l'instant aucune définition ne prêtant pas à équivoque, fait l'objet d'une intense controverse. Il s'ensuit que les institutions régionales et nationales doivent mettre au point leurs propres pratiques de gestion intégrée en se fondant sur le cadre participatif qui se dessine peu à peu au niveau régional et local.

6.2 Principes de la Gestion Intégrée des Ressources en Eau :

La réunion de Dublin en 1992 a donné naissance à quatre principes qui ont servi de base à une grande partie de la réforme suivante du secteur de l'eau.

***Principe 1.** L'eau douce est une ressource finie et vulnérable, essentielle au maintien de la vie, au développement et à l'environnement.*

La notion que les eaux douces sont une ressource finie survient alors que le cycle hydrologique produit en moyenne une quantité d'eau fixe par intervalle de temps. Cette quantité globale ne peut pas encore être altérée sensiblement par les actions humaines, bien qu'elle puisse l'être, et soit fréquemment, épuisée par la pollution humaine. La ressource en eau douce est un capital qui doit être maintenu pour s'assurer que les services désirés qu'elle fournisse, soient durables. Ce principe reconnaît que l'eau est nécessaire à des fins, des

fonctions et des services variés; la gestion, doit donc être holistique (intégrée) et implique une prise en compte des demandes de cette ressource et les menaces qui pèsent sur elle.

L'approche intégrée à la gestion des ressources en eau rend nécessaire la coordination de la gamme d'activités humaines qui créent des besoins en eau, déterminent les utilisations foncières et génèrent des produits de déchets connexes à l'eau. Ce principe reconnaît aussi la zone de captage ou le bassin fluvial comme l'unité logique pour la gestion des ressources en eau.

Principe 2. *La mise en valeur et gestion de l'eau devrait se baser sur une approche participative, impliquant les utilisateurs, les planificateurs et les décideurs politiques à tous les niveaux.*

L'eau est un sujet dans lequel chacun est partie prenante. La vraie participation n'a lieu seulement que quand les parties prenantes font partie du processus de prise de décision. Le type de participation dépendra de l'échelle spatiale concernant les décisions particulières de gestion et d'investissement de l'eau. Elle sera surtout affectée par la nature de l'environnement politique dans lequel ces décisions ont lieu. L'approche participative est le meilleur moyen pour réaliser un consensus et un accord durable et commun. La participation concerne la prise de responsabilité, l'identification de l'effet des actions sectorielles sur les autres utilisateurs de l'eau et les écosystèmes aquatiques et l'acceptation de la nécessité du changement pour améliorer l'efficacité de l'utilisation de l'eau et permettre le développement durable de la ressource. La participation ne permet pas toujours d'aboutir au consensus, des processus d'arbitrage ou autres mécanismes de résolution de conflits doivent également être mis en place.

Les gouvernements doivent aider à créer l'opportunité et la capacité de participer, en particulier parmi les femmes et les autres groupes sociaux marginalisés. Il faut reconnaître que créer simplement des opportunités participatives ne signifiera rien pour les groupes actuellement désavantagés à moins que leur capacité à participer soit améliorée. La décentralisation de la prise de décision au plus bas niveau approprié est une stratégie pour une plus grande participation.

Principe 3. *Les femmes jouent un rôle central dans l'approvisionnement, la gestion et la sauvegarde de l'eau.*

Le rôle central des femmes comme fournisseuses et utilisatrices de l'eau et comme gardiennes du cadre de vie a été rarement reflété dans les dispositions institutionnelles pour la mise en valeur et la gestion des ressources en eau. On reconnaît largement que les femmes

jouent un rôle majeur dans la collecte et la sauvegarde de l'eau pour les utilisations domestiques et – dans de nombreux cas – l'utilisation agricole, mais qu'elles ont un rôle beaucoup moins influent que les hommes dans la gestion, l'analyse de problème et les processus de prise de décisions relatifs aux ressources en eau.

La GIRE exige une conscience Genre. En développant la participation entière et efficace des femmes à tous les niveaux de la prise de décision, il faudra prendre en compte la manière dont les différentes sociétés affectent des rôles sociaux, économiques et culturels particuliers aux hommes et aux femmes. Il y a une synergie importante entre l'équité Genre et la gestion durable de l'eau. Faire participer les hommes et les femmes dans les rôles influents à tous les niveaux de la gestion de l'eau peut accélérer la réalisation de la pérennité; et la gestion de l'eau de manière intégrée et durable contribue significativement à l'équité Genre en améliorant l'accès des femmes et des hommes à l'eau et aux services connexes à l'eau pour la satisfaction de leurs besoins essentiels

Principe 4. *L'eau a une valeur économique dans toutes ses utilisations concurrentes et devrait être reconnue aussi bien comme bien économique que bien social.*

Dans ce principe, il est essentiel de reconnaître d'abord le droit fondamental de tous les êtres humains à avoir accès à l'eau potable et à l'assainissement à un prix accessible. La gestion de l'eau en tant que bien économique est une manière importante de réaliser les objectifs sociaux tels que l'utilisation efficace et équitable, et encourager la conservation et la protection des ressources en eau. L'eau a une valeur en tant que bien économique de même que bien social. Beaucoup d'échecs passés dans la gestion des ressources en eau sont attribuables au fait que la pleine valeur de l'eau n'a pas été reconnue.

6.3 Développement et Validation des Indicateurs :

La prise en compte du facteur humain dans le tissu naturel des interactions a appelé à des nouvelles méthodologies pour étudier les systèmes naturels et économiques et de résoudre des problèmes de santé publique. La complexité du risque pour la santé publique, de la durabilité économique et la qualité de l'environnement sont difficiles à comprendre et sont encore difficiles. Ces difficultés ont contribué à promouvoir les approches indicateurs-base de gestion. Par conséquent, dans la dernière décennie, la croissance des indicateurs est devenue une approche commune, en particulier l'influence de l'homme a été présentée comme une nouvelle variable en recherche scientifique pour la connaissance du monde naturel. Sans un système indicateurs-base intégrée et durable, il est difficile d'établir des liens, généralement acceptée et mise en pratique (Bowen et Riley, 2003).

6.3.1 Qu'appelle-t-on indicateur ?

Un indicateur est un signe ou un signal utilisé pour représenter des événements ou des systèmes complexes. Toujours défini au moyen de règles et de conventions, il fournit une interprétation empirique de la réalité. Généralement, les indicateurs sont utilisés pour suivre l'évolution d'un système dans le temps, ou pour comparer plusieurs systèmes (p.ex. deux pays). Il en découle deux caractéristiques essentielles : un indicateur doit être suivi de façon récurrente dans le temps, être calculable d'une manière identique pour les systèmes que l'on compare. Concrètement, un indicateur peut être une variable (par exemple, la quantité totale de déchets produits annuellement par les ménages), ou une fonction de variables (par exemple, le rapport entre la quantité de déchets recyclés et la quantité totale de déchets produits par les ménages).

Le plus souvent quantitatifs, les indicateurs peuvent aussi faire intervenir des variables qualitatives (par exemple, le degré de satisfaction de la population par rapport au système de collecte de déchets).

Un indicateur traduit donc un ensemble de données en une information succincte afin que celle-ci puisse être comprise et intégrée dans l'activité de l'utilisateur pour lequel l'indicateur a été conçu. Cette utilisation peut, dans certains cas, se limiter à de l'information, dans d'autres, et le plus souvent, il s'agit de prises de décision. La diversité des utilisateurs possibles, allant des experts au grand public en passant par les décideurs politiques et économiques, appellerait idéalement à concevoir des indicateurs qui répondent spécifiquement aux besoins et capacités de chacun d'entre eux. En tout état de cause, chaque système d'indicateurs utilisé, outre sa description précise et ses limites de validité, devrait être accompagné d'une présentation des valeurs et conventions implicites qui ont guidé sa construction.

L'Agence Européenne pour l'Environnement (AEE) a défini l'indicateur comme "la valeur observée représentant d'un phénomène à étudier".

Le Plan Bleu a expliqué les indicateurs comme des moyens de consolider et résumer les informations quantitatives, mais surtout ce sont des moyens privilégiés de communiquer et d'objectiver les situations et les politiques. L'approche générale du Plan Bleu pour les indicateurs est :

∞ Du problème à l'indicateur : le problème est mieux analysé à l'aide d'indicateur quantifiable.

∞ Un outil privilégié pour le dialogue : la sélection et la quantification des indicateurs constitue un outil extraordinaire pour le dialogue et la participation du publique.

∞ Une procédure qui évolue dans le temps : la valeur ajoutée pour les indicateurs réside dans leur calendrier et leur réajustement constant, en tenant compte de l'évolution souvent rapide des questions en jeu et comment elles sont perçues.

Une définition plus rigoureuse est donnée par l'Institut international pour le développement durable: "Un indicateur quantifie et simplifie des phénomènes et nous aide à comprendre des réalités complexes. Les indicateurs sont des agrégats de matières premières et des données traitées, mais elles peuvent être agrégés pour former des complexes indices" (IIDD, 1995).

Les indicateurs sont un outil pragmatique utilisé pour simplifier la description des systèmes complexes. Ils peuvent être utilisés individuellement, en tant que partie d'un ensemble, ou regroupés dans un ensemble pour améliorer la compréhension par les utilisateurs finaux (Van Passel et al. 2007).

Les trois fonctions de l'indicateur sont de simplifier, de quantifier et de communiquer facilement. Au niveau des exploitations, évaluation directe de l'état écologique des ressources en eau peuvent être la meilleure approche pour évaluer la durabilité.

Payraudeau et Van Der Werf (2005) appellent ce concept la pertinence environnementale d'une mesure et classifient les mesures en deux types d'indicateurs:

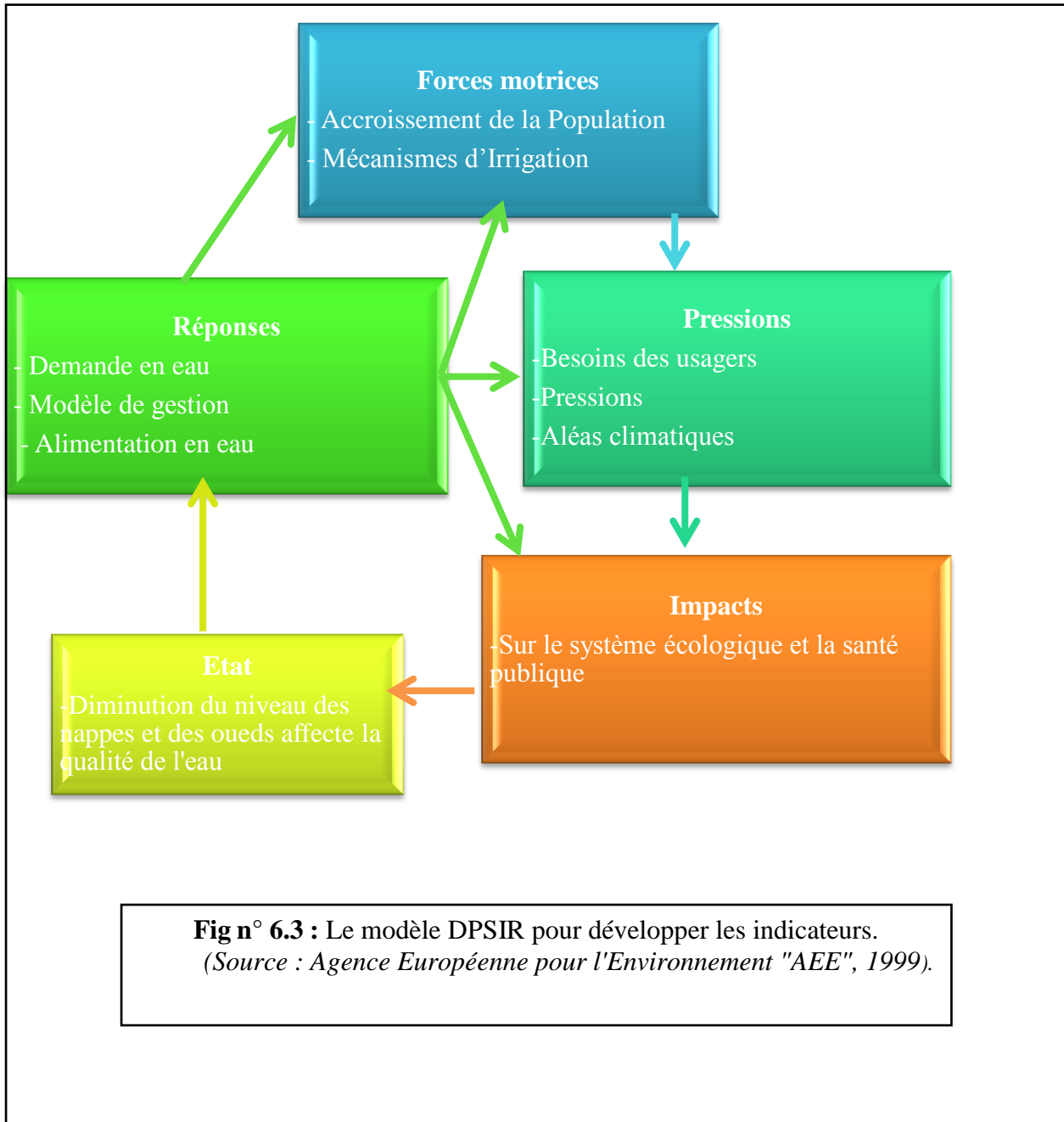
1. Le premier type est de performance environnementale qui cherche à mesurer l'écart entre la réalité et les objectifs environnementaux comme quantifiés et fixés par les politiques.
2. Le deuxième est d'indicateurs de développement durable qui ont l'intention de mesurer les progrès vers la réalisation du développement durable dans les pays méditerranéens.

La mesure directe des variables d'état est souvent trop coûteuse et techniquement difficile à mettre en œuvre au niveau des secteurs de l'eau (Girardin et al. 1999).

6.3.2 Description du modèle de GIRE appliqué (DPSIR) :

L'approche DPSIR représente plus efficacement les complexités de l'interaction socio-environnementale et met en lumière la nécessité de comprendre et de mesurer la nature et l'ampleur de cette dynamique. L'intégration plus efficace de la condition sociale, de la dynamique environnementale et de la réponse institutionnelle peut enrichir un processus

d'informer les décideurs sur l'utilisation durable des ressources et les pratiques du développement (Bowen et Riley, 2003).



La structure de l'indicateur le plus largement acceptée est le "modèle de l'impact de l'état de la pression des forces motrices" (DPSIR). Le modèle DPSIR est une extension du PSR (Pression-State-Réponse) modèle qui a été développé par Anthony Friend dans les 1970.

La partie environnementale du développement était restée relativement moins traitée par des indicateurs récurrents que la dimension économique de celui-ci. Or, ces dernières années ont vu un accroissement important des travaux à ce sujet.

L'intégration efficace de la condition sociale, de la dynamique environnementale et de la réponse institutionnelle peut enrichir un processus d'informer les décideurs sur l'utilisation durable des ressources et les pratiques du développement.

Une majorité des approches actuelles se réfère à un cadre méthodologique général qui tend à s'imposer comme un standard: le DPSIR, sigle qui désigne la séquence *Driving force – Pressure – State – Impact – Response*, ou en français, Force directrice, Pression, Etat, Réponse (DPER).

L'Agence Européenne pour l'Environnement AEE et l'Évaluation Globale des Eaux Internationales GIWA à l'an 2001 ont expliquées ce modèle comme :

D : Les forces motrice (driving forces) englobant les facteurs socio-économiques et sectoriels influençant sur l'ensemble des variables pertinentes,

P : Les indicateurs de pression décrivant les variables qui provoquent directement les problèmes environnementaux,

S : Les indicateurs d'état (state) illustre les conditions existantes et le changement observable de l'environnement,

I : Les indicateurs d'impact décrivent les effets maximaux des changements d'état sur l'homme et l'écosystème,

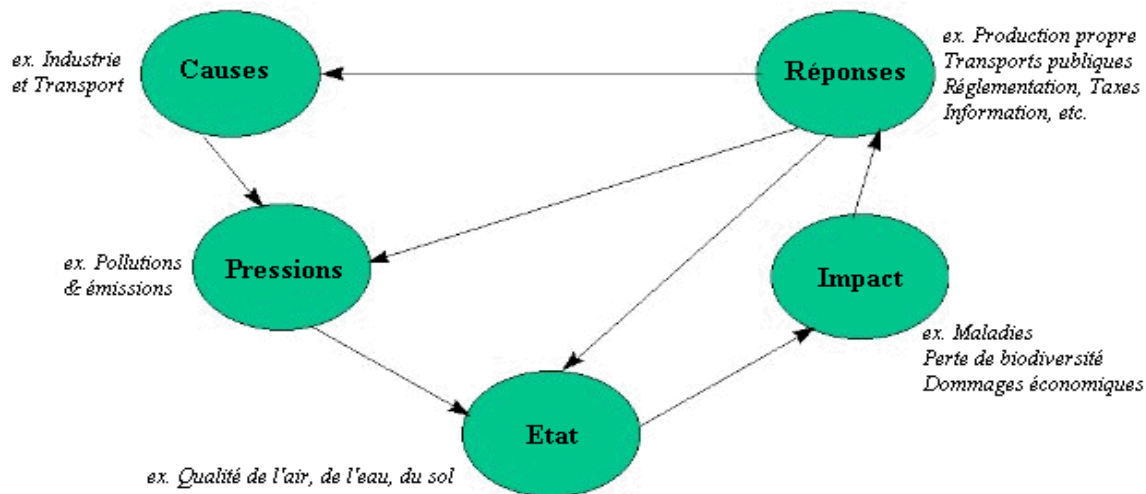
R : Les indicateurs de réponse présentent les effets au niveau des administrateurs et les politiciens pour traiter et résoudre les problèmes.

Pour mieux comprendre ce modèle, le modèle Force motrice -Pression -État-Impact -Réponse (DPSIR) fournit un mécanisme intégral pour l'analyse de problèmes environnementaux :

- **Des Forces motrices**, comme l'industrie et le transport, produisent des
- **Pressions** sur l'environnement, comme les émissions polluantes, qui dès lors dégradent
- **l'État** de l'environnement, qui ensuite à des
- **Impacts** sur la santé humaine et les écosystèmes, conduisant la société à

- **Répondre** par diverses mesures politiques, comme des règlements, informations et taxes, pouvant s'adresser à n'importe quelle autre partie du système.

Le modèle DPSIR
pour le reporting des problèmes d'environnement



Le rôle de l'évaluation environnementale consiste à :
Renseigner sur les éléments de DPSIR et
leurs interconnexions, et sur l'efficacité des Réponses

Fig n°6.4: (Vers des indicateurs de pression environnementale pour l'UE- Première édition 1998).

6.3.2.1 Description analytique du modèle de GIRE appliqué (DPSIR) :

Les éléments les plus importants et les sciences liées à l'eau ont été décrits dans la forme cycle matrix (figure n°5.5) comme un nouveau modèle conceptuel.

La figure (n°5.5) indique que le développement et la gestion des ressources en eau doit être avec les limites de la durabilité écologique et la disponibilité des ressources naturelles des eaux. Ce modèle conceptuel est basé principalement sur les trois catégories décisives suivantes:

1. Le système naturel qui forme un critère signifiant pour la disponibilité de l'eau en quantité et qualité,
2. Le système humain qui détermine l'utilisation de l'eau et la pollution de cette ressource,
3. Le système de gestion et institutionnel qui doit équilibrer la balance entre le système humain et le système naturel et leurs interdépendances.

Dans la figure (n°6.5), les trois systèmes sont divisés en cinq catégories basées sur la relation cause-effet du modèle (DPSIR) pour le développement des variables reliées à l'eau. Ces variables reflètent et traduisent les concepts de la durabilité de l'eau et les approches préventives et écosystémiques. Les cinq catégories sont : les aspects socioéconomiques, les pressions de la pollution anthropique, l'état de la qualité de l'eau, l'impact écologique et de la santé publique, et les réponses institutionnelles. Le système humain est expliqué par les variables des pressions socioéconomiques, de la pollution anthropologique et la santé publique. Le système naturel est représenté par l'état de l'eau et l'impact écologique. Le système institutionnel est représenté par les réponses institutionnelles. La figure n°6.5 présente une interaction continue entre le système humain d'un côté et le système naturel dans l'autre côté. D'ailleurs, il y a une relation duale entre l'interaction du système humain, naturel et le système institutionnel. Suivant, une balance sera établie entre la demande en eau de la société et la restauration des eaux dans le côté de la conservation de la nature.

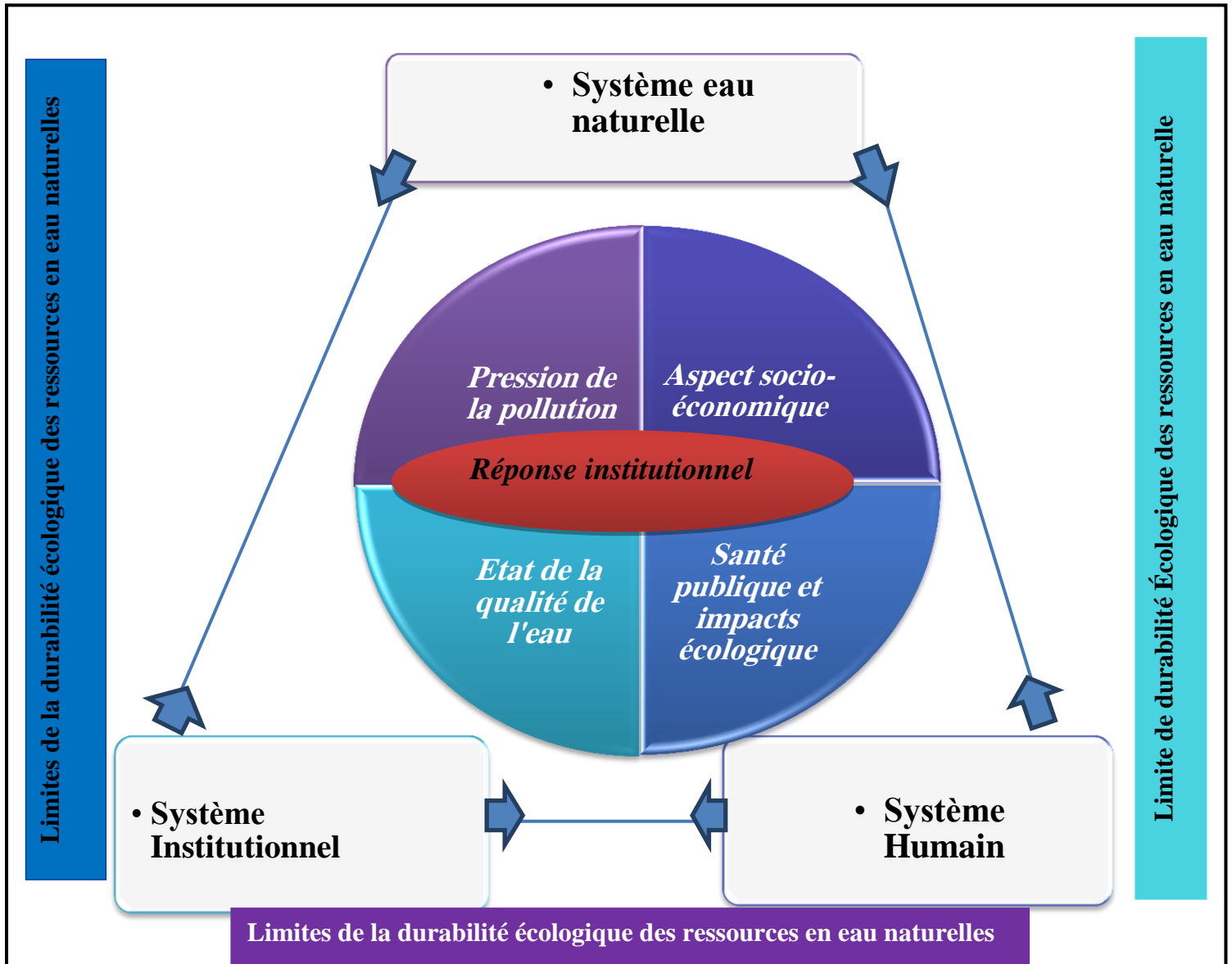


Fig n°6.5 : Pyramide de démarche de la GIRE.

Chaque catégorie du modèle DPSIR englobe un ensemble des variables les plus pertinentes qui reflètent les aspects critiques des ressources en eau (Figure n° 6.6). Les suivants sont les catégories et les variables possibles sélectionnées:

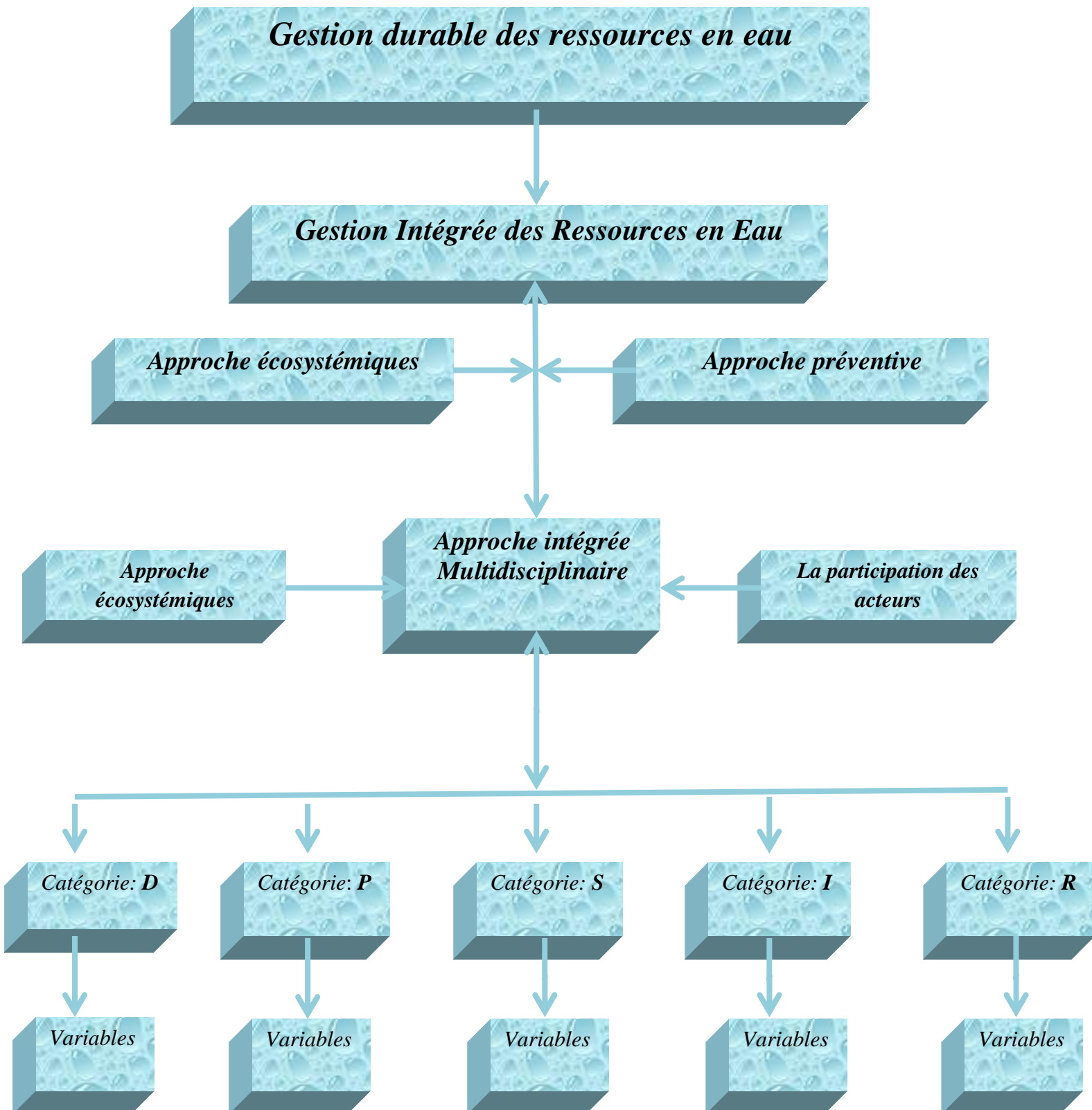


Fig n°6.6 : Le diagramme des catégories du modèle conceptuel du DPSIR (Sakaa B, 2013).

1. La Mobilisation des Ressources en Eau à partir du bassin versant
2. Le Total des Sels Dissous (TDS)

- **La Catégorie des variables de la force motrice (Driving force) :**

3. La Population
4. Les Revenues par Employant
5. L'Occupation du Sol
6. La Dotation journalière de l'Eau d'Irrigation
7. Évacuation des Eaux Pluviales
8. Le Prix de l'Eau
9. La Taxation sur l'Eau
10. La Consommation de l'Eau d'Agriculture
11. Les Pertes d'Eau

- **La Catégorie des variables de Pression :**

12. Les Déchets Solides Sauvages
13. Les Pesticides
14. Les Engrais Chimiques
15. Les Engrais Organiques
16. Le Dioxyde de Carbone (CO₂)

- **La Catégorie des variables d'État :**

- La qualité de l'eau :**

17. Les Nitrates
18. Les Chlorure
19. Le Sodium
20. Le Calcium
21. Le Magnésium
22. Le Potassium
23. Les Sulfate
24. Les Bicarbonates
25. La Demande Biochimique en Oxygène (DBO₅)
26. La Demande Chimique en Oxygène (DCO)
27. La Température
28. Le potentiel en Hydrogène (pH)

- **La Catégorie des variables d'Impact :**

- Écologique :**

29. La Perte de Productivité

30. La Perte des Zones Humides

• **La Santé Publique :**

31. Les Maladies à Transmission Hydrique

La Catégorie des variables de Réponse :

32. Le Stockage des Eaux Pluviales

33. L'Importation de l'Eau

34. L'Efficacité dans l'Eau d'Irrigation

35. L'Efficacité des Systèmes d'Information

36. La Sensibilisation sur l'Eau

L'objectif de l'étude est l'application du régime d'analyse DPSIR en même temps que chacune de ses composantes, en identifiant également les priorités pour la région étudiée. Par conséquent, les pressions environnementales et les données actuelles qualité de l'eau basée sur un programme de surveillance prolongée sont évalués, et les impacts indirects ainsi que les réponses politiques sont discutées.

La série d'indicateurs sélectionnés qui ont été choisis pour décrire le modèle DPSIR sont énumérés au-dessus. Dans les sections suivantes, les forces motrices, les pressions, l'état, les impacts et les réponses dans un bassin sont discutés :

❖ **Analyse Critique de la Gestion de l'Eau en Algérie :**

La politique engagée vise à créer un outil de décision à moyen terme, actualisable ultérieurement sans intervention extérieure, pour le développement et la gestion des ressources hydriques de l'Algérie. Elle s'articule autour des concepts suivants:

- Préciser l'étendue et la qualité des ressources hydriques y compris les ressources non conventionnelles;
- Évaluer les demandes en eau, aujourd'hui et à l'avenir;
- Dresser l'inventaire des infrastructures existantes et projetées, identifier de nouvelles potentialités et engager les actions pour leur mobilisation et transfert;
- Confronter, d'une manière dynamique, les ressources et les besoins et chiffrer les coûts et les bénéfices de chaque variante ainsi que son impact sur l'économie nationale;
- Examiner le cadre institutionnel et son adéquation pour la gestion et la protection de la ressource.

6.4 L'Application du Nouveau Modèle Conceptuel de la GIRE dans le périmètre d'irrigation de Saf-Saf :

L'utilisation de l'eau nécessite la mise en place d'infrastructures complexes et génère des impacts environnementaux tant au niveau de la ressource elle-même qu'au niveau des infrastructures d'exploitation et d'assainissement. Sa gestion est cruciale et fait l'objet de nombreux textes réglementaires.

Le cycle de vie dans le cadre de la gestion des ressources en eau dans le périmètre d'irrigation de Saf-Saf est représenté par la figure qui se suit (Figure n° 6.7). La mobilisation de l'eau se fait à partir des différents types de ressources (conventionnelles et non conventionnelles), pour assurer l'alimentation en eau d'irrigation. L'alimentation en eau pour l'irrigation se fait à partir des barrages, retenues collinaires, puitsetc. La satisfaction de cette quantité se fait par les barrages,

Dans le périmètre, la pollution des eaux peut être menée par l'utilisation intensive des pesticides et les fertilisants chimiques ou organiques dans l'agriculture.

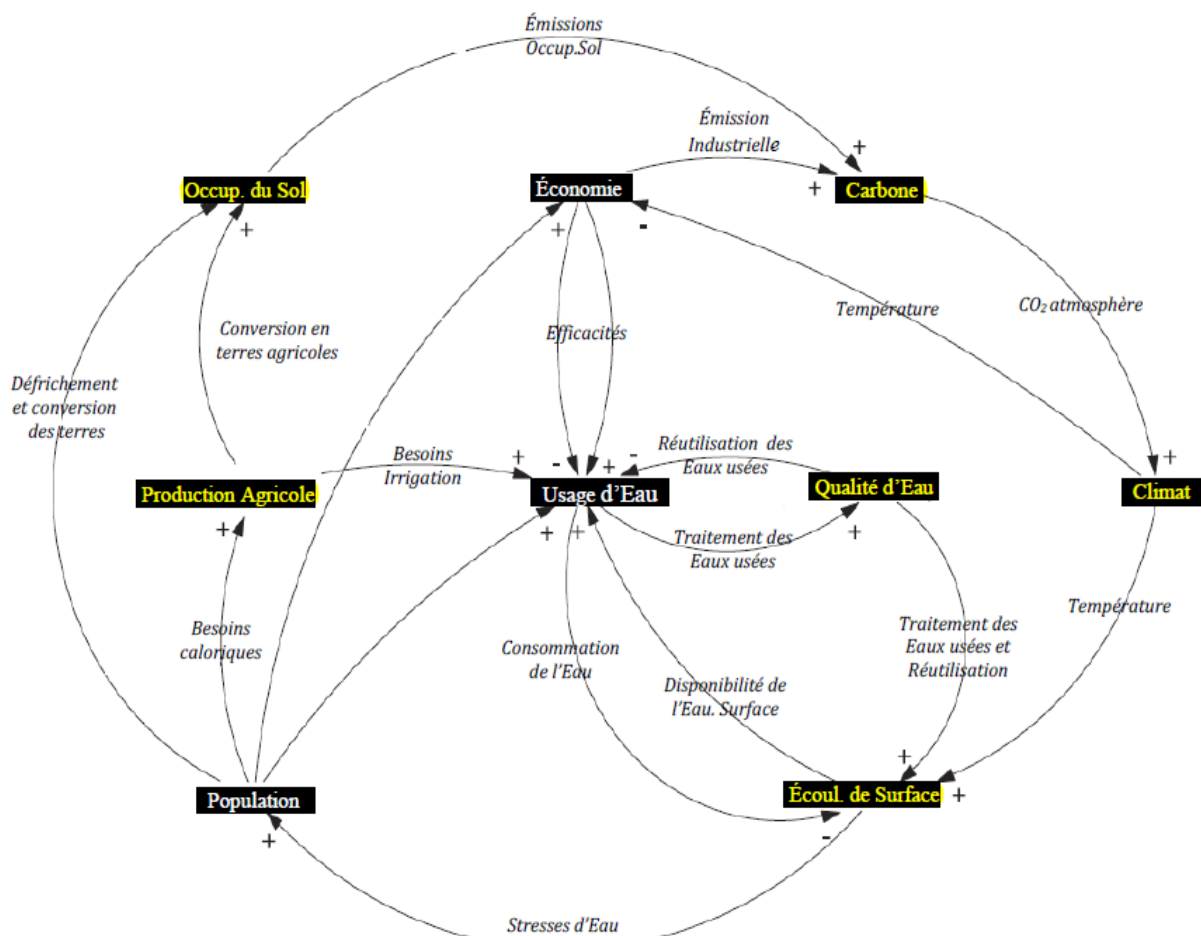


Fig n° 6.7: Le cycle de vie dans le cadre de la gestion des ressources en eau (Sakaa; 2013).

Tab n°6.1 : Données de l'index proposé pour l'agriculture, afin de décrire le modèle DPSIR.

Forces motrices	Pression	Etat	Impacts	Réponse
Agriculture	Utilisation des engrais et pesticides, changement de l'occupation du sol, l'irrigation, l'élevage	des Concentration de chlorophylle- a dans l'eau, la destruction de l'habitat	Détérioration de la qualité de l'eau, l'eutrophisation, l'état de conservation	Les politiques agricoles, plans de gestion de la pollution diffuse

(Source : L'étude de l'application du modèle DPSIR dans le bassin versant de Kalamas (NW Grèce)).

6.4.1 La Description des Variables (Indicateurs) :

L'an 2012 était constaté comme une année de référence pour la collecte des données, et la qualité des eaux de surfaces. La mobilisation de la ressource en eau à partir des barrages sera la variable dépendante des variables Force motrice (**D**Driving force), des variables de l'Impact et les variables de **R**Réponse. Le total des solides dissous (TDS) sera une variable dépendante des variables de **P**Pression et de l'État (**S**State) de la qualité de l'eau de surface la pression de pollution.

6.4.1.1. La Mobilisation de la Ressource en Eau (MRE) :

Elle représente la quantité d'eau mobilisée pour l'irrigation du terre agricole dans le périmètre irrigué de Saf-Saf, elle est mesurée en million de mètre cube par an ($\text{hm}^3 \cdot \text{an}^{-1}$).

6.4.1.2. Le Total des Solides Dissous (TDS) :

Le TDS reflète la salinité des eaux douces et son origine naturel (précipitation, lessivages des formations,etc.). Il comprend les sels inorganiques principalement le Calcium, le Magnésium, le Potassium, le Sodium, les Carbonates, les Bicarbonates, Chlorures, Sulfates et Phosphates. Le TDS est mesuré en milligramme par litre (mg/l).

6.4.1.3 Les variables forces motrices (Driving forces) :

- **L'Occupation du Sol (OccupS) :**

Elle représente le rapport entre la superficie du périmètre d'irrigation totale et la superficie irriguée dans le bassin de Saf-Saf, elle est mesurée en pourcentage (%) ou par (ha).

- **Le Taux de Raccordement aux Réseaux de l'Eau d'irrigation(TxEI)**

Il représente la proportion de terre connectée aux réseaux de l'alimentation de l'eau d'irrigation (AEI), il est mesuré en pourcentage (%).

- **Le Prix de l'Eau d'Irrigation (PrixEI) :**

L'eau à usage agricole est actuellement facturée selon un tarif administré résultant de l'application du décret n°98-156 du 16 mai 1998. Le prix de l'eau est le quotient du coût total des dépenses (distribution) par le volume vendu, il est estimé en dinars algériens (DA).

- **La Taxation sur l'Eau d'Irrigation (TaxEI) :**

C'est le rapport de la taxation des services eaux sur les revenus collectés, donc les taxes sont mesurées en pourcentage (%).

- **La Consommation de l'Eau d'Irrigation (ConEI) :**

Cette variable reflète la quantité d'eau consommée dans chaque secteur, elle est mesurée en million de mètre cube par an (hm^3/an)

- **Les Pertes d'Eau d'Irrigation (PerteE) :**

Cette variable représente la proportion de la quantité d'eau perdue dans les systèmes des réseaux de distribution de l'eau potable dans chaque commune, elle est estimée en million de mètre cube par an (hm^3/an).

6.4.1.4 Les variables de Pression :

- **Les pesticides (Pesticid) :**

Les pesticides représentent tous les produits phytosanitaires utilisés dans l'agriculture tels que les herbicides, insecticides, les nématicides et les fongicides, ils sont mesurés en tonnes par an (tonnes/an).

- **Les Engrais Chimiques (EngrCh) :**

Ils représentent la quantité des engrais chimiques utilisés en agriculture pour l'amélioration du rendement, les engrais incluent les ammonitrates, les sulfates de potassium, les phosphates et les sulfates ammoniacaux, ils sont mesurés en tonnes par an (tonne.an-1).

- **Les Engrais Organiques (EngrOrg) :**

Les engrais organiques représentent la quantité des déchets organiques générés par les animaux domestiques qui sera transféré par les bactéries en sels ammoniacaux (NH_4^-), puis en nitrites (NO_2^-) et ensuite en nitrates (NO_3^-), ils sont mesurés en tonnes par an (tonne/an).

6.4.1.5 Les variables d'État de la qualité de l'eau des barrages (State) :

- **Les Nitrates (NO_3^-) :**

Les nitrates représentent l'état de l'oxydation intermédiaire d'azote dans l'oxydation biochimique du sel ammoniacal (NH_4^+) en nitrates (NO_3^-), les concentrations élevées des nitrates dans les eaux des barrages sont dues : aux déchets solides, aux eaux usées, ou bien à l'utilisation des engrais et les pesticides dans l'agriculture. L'OMS n'autorise qu'une concentration inférieure à 45 mg/l. Les réserves d'eau qui contient des concentrations élevées en nitrates provoquent des risques sur la santé publique.

Tab n°6.2 : Les normes des Nitrate recommandées par OMS 1994.

Classe de qualité	Unité	Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution excessive
Nitrates NO_3^-	mg /l	<5	5à25	25à40	50à80	>80

Source : Cahiers de l'Agence de Bassin Hydrographique Constantinoise-Sebousse-Mellegue.

- **Les Phosphates (PO_4^-) :**

Les phosphates en excès est à l'origine de l'eutrophisation, dont la forme la plus courante est la prolifération d'algues planctoniques qui donnent une couleur verte ou brune à l'eau. Il provient essentiellement des rejets domestiques (en particulier en raison de lessives phosphatées) et industriels. L'OMS n'autorise qu'une concentration inférieure à 2 mg/l.

Tab n°6.3: Les normes des Phosphates recommandées par OMS 1994.

Classe de qualité	mg /l	Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution excessive
Phosphate PO_4^-		<0.2	0.2à0.5	0.5à1	1à2	>2

(Source ; Cahiers de l'Agence de Bassin Hydrographique Constantinoise-Sebousse-Mellegue)

- **Ammonium (NH_4^+) :**

Il provient des rejets domestiques et de l'industrie chimique, notamment de la fabrication d'engrais. L'OMS n'autorise qu'une concentration inférieure à 2 mg/l.

Tab n°6.4: Les normes des Ammoniums recommandées par OMS 1994.

Classe de qualité	mg /l	Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution excessive
NH_4^+		<0.1	0.1à0.5	0.5à2	2à8	>2

Source ; Cahiers de l'Agence de Bassin Hydrographique Constantinoise-Sebousse-Mellegue.

- **Les Chlorures (Cl^-) :**

Les chlorures indiquent les composantes du chlore avec les autres éléments spécialement le sodium, le calcium et le magnésium. L'abondance des chlorures dans les eaux souterraines est prévenue à des eaux usées industrielles, ou bien par l'infiltration des eaux d'irrigation ou par l'intrusion marine pour les aquifères côtiers, l'OMS autorise des concentrations inférieures à 250 mg/l.

- **Le Sodium (Na^+) :**

Il représente le sel sodique soluble dans les eaux, les concentrations élevées du sodium sont causées par le lessivage des formations géologiques ou bien par une intrusion marine. En général le sel sodique n'est pas toxique, le sodium doit être autour de 200 mg/l.

- **Le Calcium (Ca^{2+}) :**

Dans les eaux souterraines le calcium dépend de la lithologie des formations traversées par ces eaux, le calcium est abondant dans les calcaires les dolomies...etc., il contribue à la dureté de l'eau. L'OMS autorise une concentration de 100 mg/l.

- **Le Magnésium (Mg^{2+}) :**

Il appartient aux sels très solubles dans les eaux, et contribue à la dureté de l'eau, l'excès de concentration de magnésium est indésirable dans l'eau potable, il est mesuré en mg/l.

- **Le Potassium (K^+) :**

Les concentrations du potassium dans les eaux souterraines sont dues généralement à l'utilisation des engrais chimiques dans l'agriculture, l'OMS n'autorise que 5 mg/l.

- **Les Sulfates (SO_4^{2-}) :**

Dans les eaux souterraines les sulfates sont dérivés à des minéraux évaporitiques (gypses), ils sont considérés parmi les anions les moins toxiques, les effets physiologiques résultent à des concentrations supérieures à 600 mg/l.

- **Les Bicarbonates (HCO_3^-) :**

Ils indiquent la présence des anions de HCO_3^- dans les eaux souterraines et de surface, ils sont mesurés en milligramme par litre (mg/l).

- **Matières oxydables :**

L'oxygène dissous :

Tab n° 6.5: Les normes d'oxygène dissous recommandées par OMS 1994.

Classe de qualité	Unité Excellente	Bonne	Passable	Médiocre	Pollution Excessive
-------------------	------------------	-------	----------	----------	---------------------

O ₂ dissous	%	90	70	50	30	>30
------------------------	---	----	----	----	----	-----

Source : Cahiers de l'Agence de Bassin Hydrographique Constantinoise-Sebousse-Mellegue.

6.4.1.6 La Catégorie des variables d'Impact :

○ Sur la santé publique :

● Les maladies à transmission hydrique (MaladTrHy) :

Cette variable indique le nombre de personnes affectées par les maladies à transmission des produit Toxique par l'utilisation intensive des pesticides en général, ces maladies sont causées par une pénétration des eaux usées aux réseaux de l'alimentation en eau potable.

○ Sur l'Écologie :

● La Perte de Productivité Agricole (PertePAg) :

La perte de la productivité agricole signifie la diminution du rendement des terres agricoles qui due à l'extension urbaine, et au vieillissement des arbres fruitières, elle est estimée en tonnes.

● La Perte des Zones Humides (PerteZnHu) :

Il s'agit de la superficie des zones humides déjà polluées à la suite de l'urbanisation et L'industrialisation à la partie centre et aval du bassin versant de l'oued. Elle est mesurée en hectare.

6.4.1.7 La Catégorie des variables de Réponse :

● Le Stockage des Eaux Pluviales (StoEPluv) :

Le stockage des eaux de pluies représente le volume d'eau collecté par les barrages, les retenues collinaires et les réservoirs d'eau d'irrigation, il est mesuré en million de mètre cube par an (hm³.an-1).

● L'Importation de l'Eau d'irrigation (ImportEI) :

Cette variable représente la quantité d'eau importée à partir des ressources hors périmètre, elle est mesurée en million de mètre cube par an (hm³.an-1).

● L'Efficacité dans l'Eau d'Irrigation (EfEIrrig) :

Cette variable indique la proportion de la consommation de l'eau d'irrigation par rapport à la production totale de l'eau d'irrigation, elle mesurée en pourcentage (%).

● L'Efficacité des Systèmes d'Information (EfSyInf) :

Elle indique l'existence des systèmes d'information, en incluant les ressources humaines, les équipements de mesure et les logiciels qui aident à améliorer la gestion des ressources en eau, elle est mesurée en %.

● La Sensibilisation sur l'Eau (SensibE) :

La sensibilisation représente le nombre d'agriculteur à éduquer sur l'utilisation correcte de l'eau et la pollution des eaux et de l'environnement. Le ministère de l'éducation à arranger des programmes qui s'intéressent à l'eau et l'environnement, ainsi l'ABH et la direction de l'environnement organisent des campagnes de sensibilisation sur l'eau durant la journée internationale de l'eau.

Ces indicateur sont les variable concernant le domaine agricole le cas de périmètre irrigué du bassin versant de Saf-Saf, mais par manque de données je reprends ici les principaux résultats concernant le domaine agricole obtenus par Mr: Sakaa (2013) dans le cadre de son thèse de doctorat.

6.5 Les Statistiques Descriptives des Variables Dépendantes et Indépendantes :

Le choix des procédures d'analyse appropriées des données exige les statistiques descriptives de l'ensemble des variables dans une forme qui indique leurs caractéristiques. Ces sont souvent : la moyenne, la médiane, l'écart type, les quartiles à 25% et à 75% et le coefficient d'asymétrie. Les statistiques descriptives sont calculées pour les variables de la force motrice (Driving force), les variables de Pression, les variables de l'État (State) de la qualité des eaux de surfaces, les variables d'Impact et les variables de Réponse. Pour la mobilisation de la ressource en eau MRE et le total des solides dissous (TDS) seront aussi discutés.

6.5.1 Les Variables Dépendantes, la MRE et le TDS :

La boîte à moustache de Tukey pour la variable dépendante MRE (Figure n°6.8.b) permet d'affiner la précision des statistiques. On remarque que vingt-trois (23) observations i.e. fréquences absolues (76,66% de données) sont localisées dans la gamme de deux déviations standards (+/- SD). Donc cette proportion des données est plus grande que celle désignée pour des données distribuées normalement (68,3%), alors que cinq (05) fréquences sont localisées dans la gamme de double déviations standards (+/- 2SD) et les deux (02) dernières fréquences se localisent à l'extérieur de la gamme des quatre déviations standards (+/- 4SD). Ce qui indique que la distribution des données est équilibrée. Pour le TDS l'ensemble d'effectif se localise dans la gamme de double déviations standards (+/- 2SD), indiquant une distribution équilibrée (Figure n°6.8.a).

Le tableau n°6.6 montre que les deux variables dépendantes (MRE et TDS) ont un coefficient d'asymétrie positif différent, ces coefficients signifient que les faibles valeurs de ces variables correspondents aux grandes fréquences, ainsi que les moyennes sont supérieurs ou

proches aux médianes et inférieurs au quartile 75%, donc raisonnablement les deux variables sont distribuées normalement

Tab n°6.6 : Les statistiques descriptives des variables dépendantes, la MRE et le TDS.

Les Statistiques descriptives des variables dépendantes (Outputs) MRE et TDS							
	N	Moyenne	Médiane	Sous.quartile	Sur quartile	Écart type	Asymétrie
MRE	30	1,965	0,800	0,06	7,23	0,35	3,3
TDS	30	1120	1177,5	446	1631,5	871	1334,4

Source : Sakaa ;(2013).

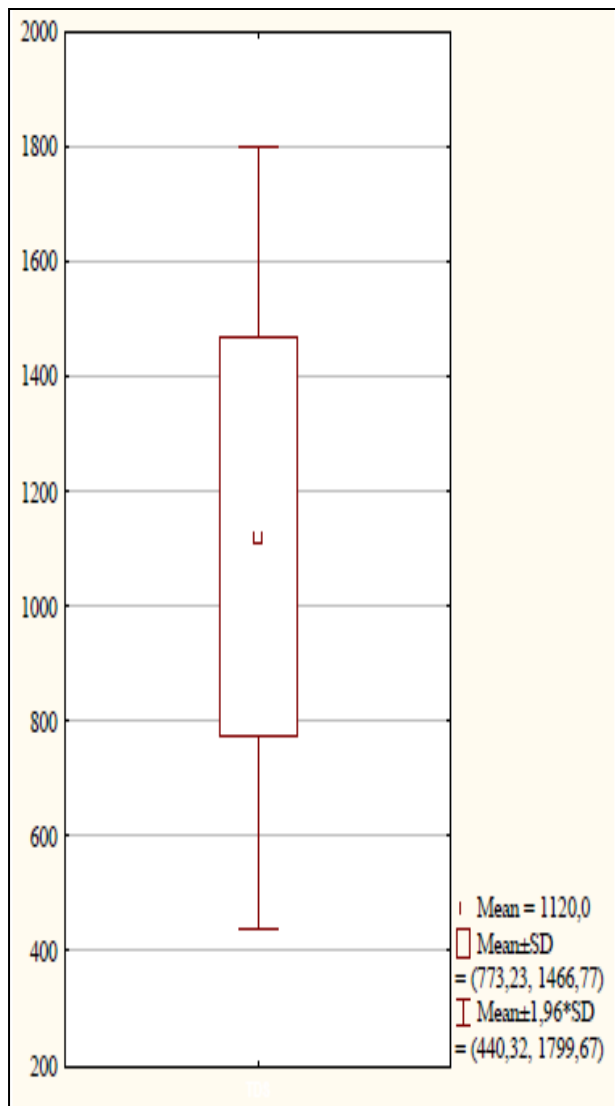


Fig n° 6.8.a: la boîte a Tukey pour le TDS.

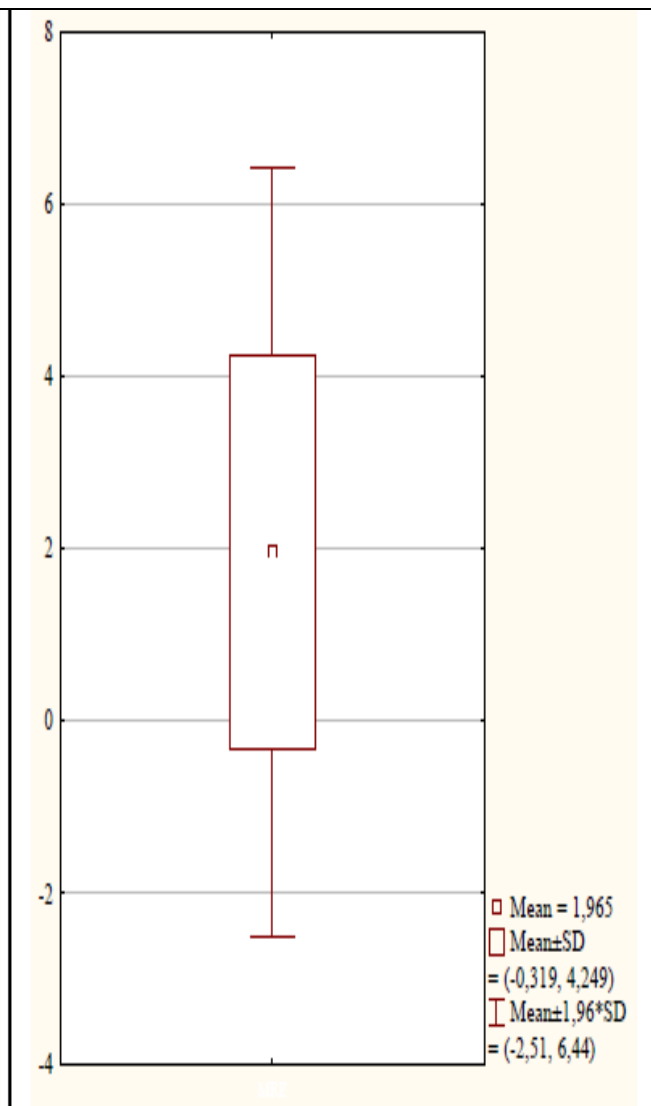


Fig n° 6.8.b: la boîte à Tukey pour la MRE.

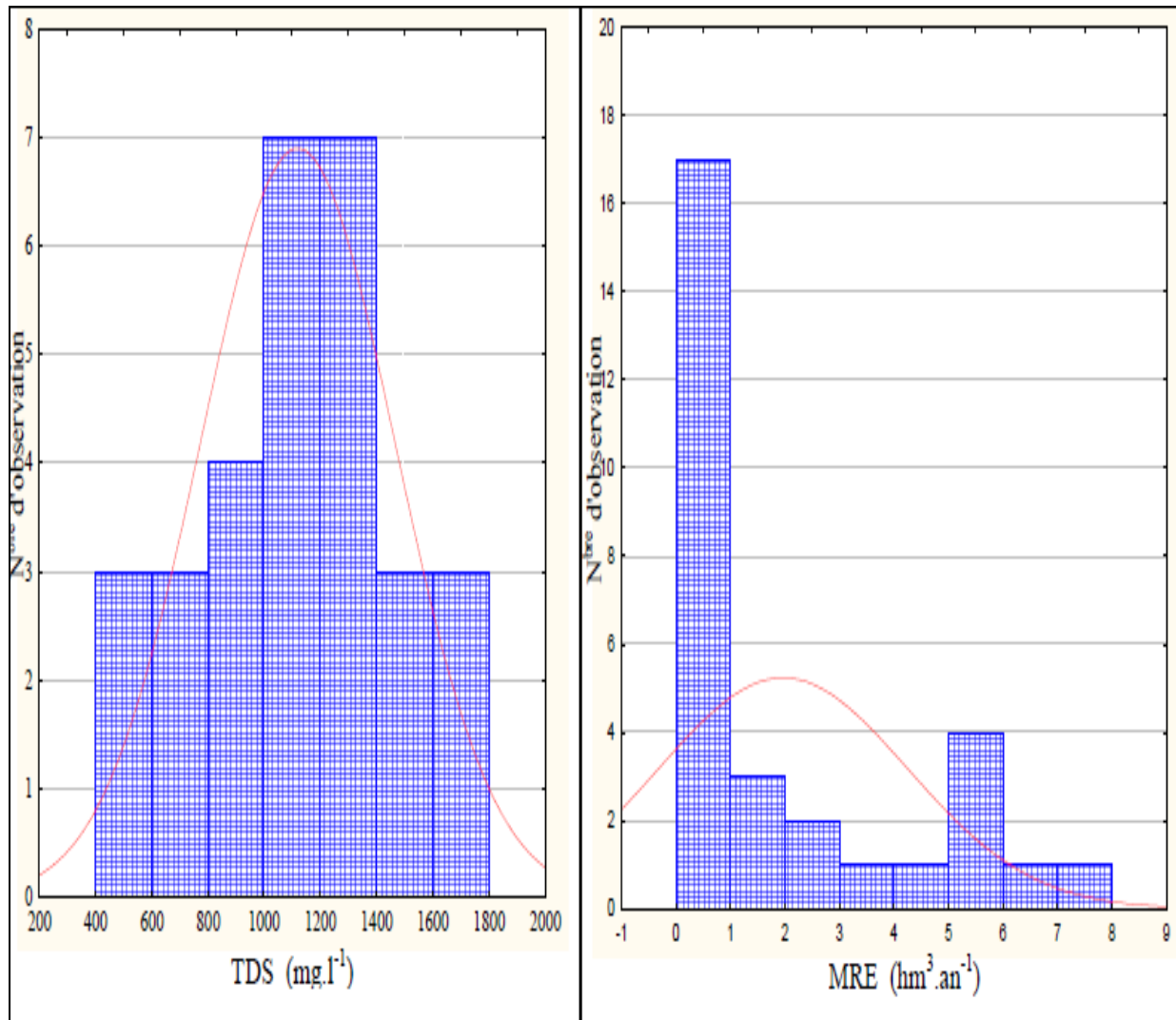


Fig n°6.9.a: Histogramme pour le TDS.

Fig n° 6.9.b: Histogramme pour la MRE.

6.5.2 Les Variables indépendantes de la force motrice (Driving force) :

Le tableau montre que la majorité des variables de la Force motrice « D » ont des coefficients d'asymétrie positifs avec différentes valeurs (Asymétrie à droite) à l'exception du taux de raccordement aux eaux usées et à l'eau potable, les taxes sur l'eau et les pertes de l'eau qui présentent des coefficients d'asymétrie négatifs (Asymétrie à gauche). La population, le taux de raccordement au réseau AEP, le taux de raccordement au réseau des eaux usées, l'évacuation des eaux pluviales, la dotation en eau potable, le prix de l'eau, l'intégration des femmes et les pertes d'eau ont des coefficients d'asymétries assez faibles et distribuées normalement (distribution Gaussienne). Alors que les revenus par employant, le tourisme, la consommation en eau d'agriculture, l'occupation du sol et les taxes sur l'eau présentent des coefficients d'asymétries assez importants et ne s'ajustent pas à la loi normale. La distribution de toutes les variables est testée par le test "D" de Kolmogorov-Smirnov.

Tab n°6.7: Les statistiques descriptives des variables Force motrice (D).

Les Statistiques Descriptives des variables Force motrice D							
	N	Moyenne	Médiane	Sousquartile	Sur quartile	Écart type	Asymétrie
Pop	30	15833,6	9780	4236	21370	15175,18	1,345
Remp	30	323180	311677,5	307058	335213	28668,98	1,412
Tourism	30	2789,7	0,00	0,00	0,00	8378,64	3,925
OccupS	30	17,60	2,00	0,30	10,0	32,27	1,836
TxEp	30	67,40	74,0	52,0	87,0	25,63	-0,712
TxEU	30	78,50	80,0	70,0	90,0	14,78	-1,086
EvEPluv	30	43,90	29,5	15,0	79,0	31,86	0,460
DotEP	30	90,10	83,5	60,0	135,0	43,53	0,247
PrixE	30	14,90	12,4	6,3	24,5	8,35	0,198
TaxE	30	27,10	37,0	10,0	37,0	13,23	-0,583
ConEAg	30	0,90	0,00	0,0	0,70	1,94	2,891
IntégFem	30	6,90	6,00	2,0	10,0	5,33	0,931
PerteE	30	25,3	25,00	20,0	30,0	6,48	-0,757

Source : Sakaa (2013).

6.5.3 Les Variables indépendantes de Pression :

Les déchets solides sauvages, les eaux usées domestiques, les pesticides, les engrais chimiques et organiques sont des variables qui présentent des asymétries faibles et distribuées Normale. Alors que les autres variables (StCarb, EUInd et le CO₂) présentent des asymétries importantes et ne s'ajustent pas à la loi Normale. Sachant qu'on a utilisé le test "D" de Kolmogorov-Smirnov pour tester la Normalité de la distribution.

Tab n°6.8: Les statistiques descriptives des variables de Pression (P).

Les Statistiques Descriptives des variables de Pression P

	N	Moyenne	Médiane	Sous-quartile	Sur quartile	Écart type	Asymétrie
DécSauv	30	13,515	9,00	4,200	17,80	11,754	1,228
EUDom	30	1,323	0,725	0,320	1,650	1,513	1,891
Pesticid	30	1,080	0,725	0,310	1,710	1,005	1,131
EngrCh	30	130,488	100,4	39,500	155,75	124,97	1,565
EngrOrg	30	1244,4	1122,0	210,00	2050,0	1055,42	0,440
StCarb	30	0,633	0,000	0,0000	1,000	0,964	1,324
EUInd	30	9,057	0,004	0,0005	0,005	37,457	4,962
CO₂	30	460,53	377,5	372,00	509,00	132,996	2,263

Source : Sakaa (2013).

5.5.4 Les Variables indépendantes de l'État (State) de la qualité des eaux de surface :

Le tableau (n°6.9) montre que le sodium et les sulfates, la DBO₅ et la température présentent des coefficients d'asymétries considérables et le test "D" montre que la distribution de ces variables est non-normale. Alors que Le calcium, le magnésium, le potassium, les nitrates, les chlorures, les bicarbonates, la DCO, la CE et le pH ayant des coefficients d'asymétries faibles et sont distribuées normalement.

Tab n°6.9 : Mes statistiques des variables de l'état (S) de la qualité des eaux de surface.

Les statistiques descriptives des variables de l'État (S) de la qualité des eaux de surface

	N	Moyenne	Médiane	Sous.quartile	Sur quartile	Écart type	Asymétrie
Na⁺	30	101,61	115,00	70,00	131,00	39,575	-0,598
Ca⁺⁺	30	132,14	145,00	76,20	168,00	50,601	-0,232
Mg⁺⁺	30	95,92	100,00	78,00	124,00	41,013	-0,326
K⁺	30	5,070	5,350	4,500	6,00	1,581	-0,229
NO₃⁻	30	36,47	39,750	15,000	48,00	21,184	0,317
Cl⁻	30	255,84	290,00	102,00	375,00	128,728	-0,633
SO₄²⁻	30	184,04	164,90	151,00	225,80	58,884	1,245
HCO₃⁻	30	265,82	259,00	210,00	332,60	74,775	0,338
DBO₅	30	29,532	8,950	5,500	60,00	34,158	1,044
DCO	30	58,817	45,300	28,60	85,60	39,547	0,862
CE	30	1427,4	1536,5	950,00	1755,00	493,210	-0,233
T	30	14,600	15,00	14,00	15,00	0,4983	-0,430
pH	30	7,753	7,775	7,500	8,000	0,3716	-0,561

(Source : Sakaa 2013).

6.5.5 Les Variables indépendantes d'Impact :

Les trois variables d'impact présentent des coefficients d'asymétrie signifiant positifs et la répartition de ces variables est non Normale. (Le test d'ajustement se fait par le test "D" avec un seuil de confiance FD = 0.05).

Tab n° 6.10 : Les statistiques descriptives des variables de d'Impact (I).

Les statistiques descriptives des variables de d'Impact (I)

	N	Moyenne	Médiane	Sous-quartile	Sur-quartile	Ecart type	Asymétrie
PertePAg	30	72,433	35,00	8,00	86,00	98,85	2,012
PerteZnHu	30	4,5666	0,000	0,000	5,00	9,009	1,950
MaladTrH	30	1,000	0,000	0,000	2,00	1,313	1,077

(Source: Sakaa 2013).

6.5.6 Les Variables indépendantes de Réponse :

Le tableau montre que le dessalement de l'eau de mer, le stockage des eaux pluviales, la sensibilisation sur l'eau l'efficacité des systèmes d'information présentent des coefficients d'asymétries importants et la répartition ne s'ajuste pas à la loi normale, alors que

l'importation de l'eau, l'efficacité dans l'eau d'irrigation ayant des coefficients d'asymétries assez faibles et sont distribuées normalement.

Tab n°6.11: Les statistiques descriptives des variables de Réponse (R).

statistiques descriptives des variables de Réponse (R)							
	N	Moyenne	Médiane	Sous-quartile	Sur-quartile	Ecart type	Asymétrie
DEM	30	0,0597	0,000	0,0000	0,0000	0,2249	3,890
StoEPlu	30	1,1173	0,0375	0,0000	0,1500	5,6456	5,472
ImportE	30	1,8223	0,650	0,0000	3,0500	2,6736	1,749
EfeIrrig	30	53,5000	57,50	50,000	69,000	20,946	-1,604
SensbE	30	565,870	360,00	230,00	745,00	515,40	1,5687
EfSyInf	30	37,3333	50,00	20,000	50,000	22,884	-0,4252

(Source : Sakaa 2013).

Remarques :

- Une moyenne des fuites d'eau de l'ordre de 25% dans l'ensemble des municipalités et des agglomérations du bassin.
- Le total des sels dissous TDS dépasse la norme admise par l'OMS (1000 mg/l) dans la majorité des eaux de surface de la partie aval du bassin versant.
- Les systèmes d'information qui aident à la gestion de l'eau ne sont disponibles que dans quelques sites (Harrouch, Ramdane Djamel et Zerdézas).
- L'efficacité dans les systèmes d'irrigation varie de 75% à 90%, cette variabilité est due aux différentes techniques utilisées dans l'irrigation.

6.6 Les Outils et le Plan d'Analyse :

5.6.1 Le Plan d'Analyse :

Les objectifs du plan d'analyse sont :

- La caractérisation et la classification par ordre de priorité les variables effectives possibles appartenant aux variables de base dans le cadre des cinq catégories du modèle de DPSIR décrit. L'ensemble des variables sélectionnées, et ainsi que les municipalités (observations) ont été classées et organisées de telle sorte que les municipalités sous la stresse d'eau ont été bien identifiées.
- Un modèle de prévision reliant entre la mobilisation de la ressource en eau d'une part et les variables forces motrices (D), les variables de l'état de la qualité de l'eau de surface (S), et les

variables des réponses politiques(P) d'une autre part. La prévision entre la qualité de l'eau et les variables de pression de pollution a été également mise en place.

Les outils choisis pour ce travail sont : l'ANN (les Réseaux de Neurone Artificiels), l'évaluation du risque sur la santé humaine, les statistiques multi-variées. Les logiciels utilisés sont : le STATISTICA version 8.0.

6.6.2 Les étapes de l'analyse :

Les étapes à suivre pour procéder à l'analyse des données sont présentées dans la Figure (n°6.10).

Les étapes de l'analyse de données sont :

1. Exprime la création d'un modèle d'ANN (RNA), la caractérisation et la classification des variables efficaces pour la simulation des relations entre les variables dépendantes et indépendantes.
2. Présente la comparaison entre le classement des variables selon les avis des experts (données du questionnaires) avec celui obtenu par la sensibilité des réseaux de neurones dans l'étape (1).
3. Présente les matrices de corrélation pour les cinq catégories du DPSIR.
4. Deux techniques d'analyses multi-variées sont entreprises dans l'étape (4) pour grouper les variables sélectionnées par les RNA ayant les mêmes caractéristiques et les identifier les municipalités sous stress d'eau.

Les résultats dans l'étape (1) et (4) ont été également réintroduire pour compléter le modèle DPSRI avec les variables sélectionnées et les municipalités qui sont sous la stresse d'eau. L'ensemble des résultats sera une base pour étudier l'évaluation stratégique de l'environnement.

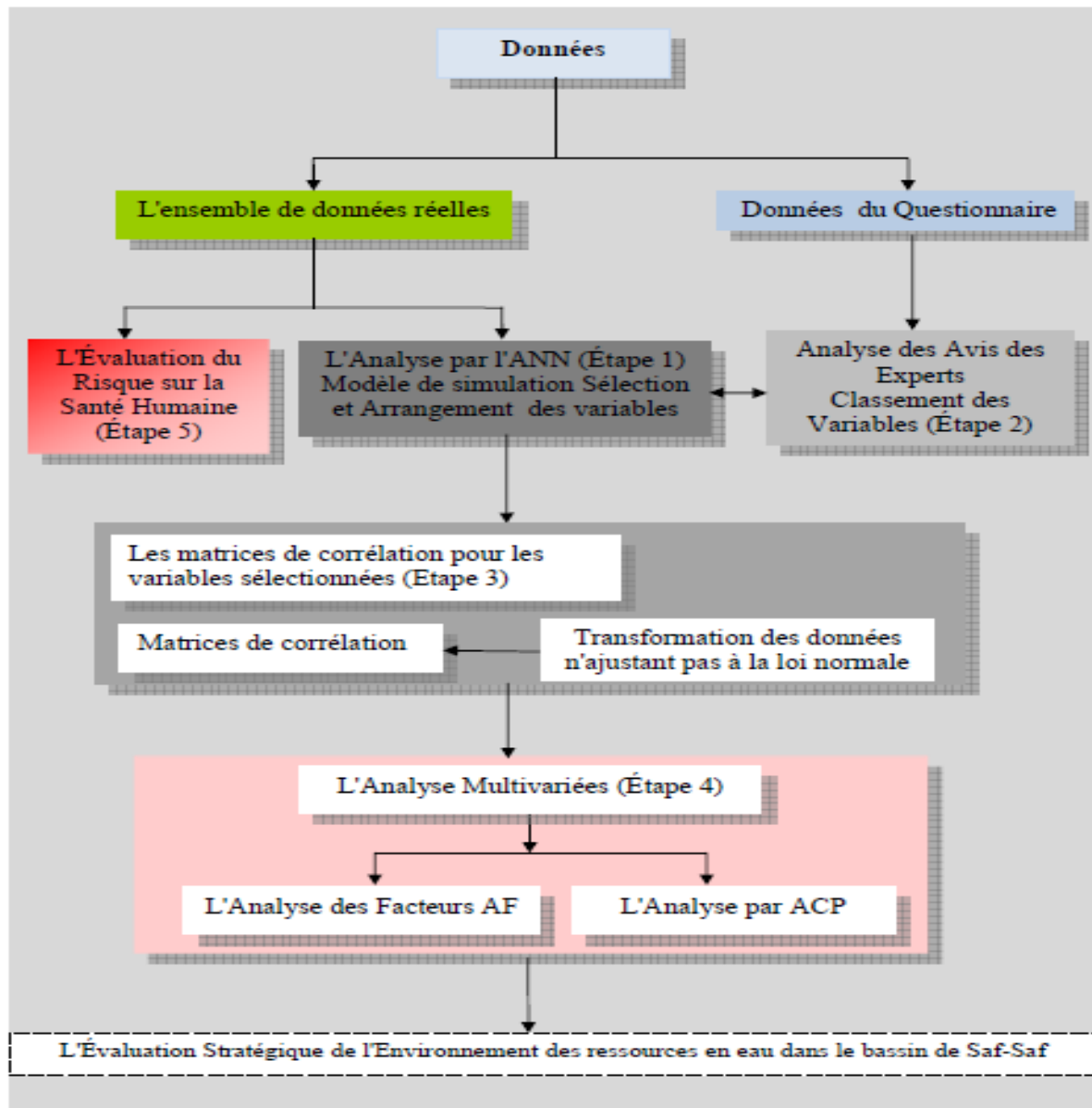


Fig n° 6.10: Les Étapes de l'Analyse des Données (Sakaa 2013).

6.6.3 Les Outils d'Analyse :

Les outils d'analyse utilisés dans ce travail sont : les réseaux de Neurone Artificiels (ANN), les statistiques descriptives, l'analyse des matrices de corrélation, l'analyse multivariée inclue l'analyse des composantes principales et l'analyse des facteurs.

6.6.3.1 Les Réseaux de Neurones Artificiels (ANN) :

Plongeons-nous dans l'univers de la reconnaissance de formes. Plus particulièrement, nous allons nous intéresser à la reconnaissance des chiffres (0, 1, ..., 9). Imaginons un programme qui devrait reconnaître, depuis une image, un chiffre. On présente donc au programme une image d'un "1" manuscrit par exemple et lui doit pouvoir nous dire "c'est un 1". Supposons que les images que l'on montrera au programme soient toutes au format

200x300 pixels. On aurait alors 60000 informations à partir desquelles le programme déduirait le chiffre que représente cette image.

L'utilisation principale des réseaux de neurones est justement de pouvoir, à partir d'une liste de n informations, pouvoir déterminer à laquelle des p classes possibles appartient cette liste.

De façon plus générale, un réseau de neurone permet l'approximation d'une fonction. Ici, il s'agit d'une fonction de classification : à chaque n -up let d'informations en entrée la fonction associe une classe.

Dans la suite, on notera :

$$X = (x_i)_{1 \leq i \leq n}$$

Un vecteur dont les composantes sont les n informations concernant un exemple donné.

Dans l'exemple de la reconnaissance de formes, un exemple est une image représentant plus ou moins approximativement un chiffre. C'est un objet descriptible par n informations. De plus, on notera C_1, C_2, \dots, C_p les p class. Dans l'exemple précédent, les classes correspondent aux chiffres.

Voyons maintenant d'où vient la théorie des réseaux de neurones artificiels.

Une origine... biologique !

Comment l'homme fait-il pour raisonner, parler, calculer, apprendre... ? Comment s'y prendre pour créer une intelligence artificielle ? Deux types d'approches ont été essentiellement explorés :

Approches adoptée en recherche en Intelligence Artificielle.

- procéder d'abord à l'analyse logique des tâches relevant de la cognition humaine et tenter de les reconstituer par programme. C'est cette approche qui a été privilégiée par l'Intelligence Artificielle symbolique et la psychologie cognitive classique. Cette démarche est étiquetée sous le nom de cognitivisme.
- puisque la pensée est produite par le cerveau ou en est une propriété, commencer par étudier comment celui-ci fonctionne. C'est cette approche qui a conduit à l'étude des réseaux de neurones formels. On désigne par connexionnisme la démarche consistant à vouloir rendre compte de la cognition humaine par des réseaux de neurones.

La seconde approche a donc mené à la définition et à l'étude de réseaux de neurones formels qui sont des réseaux complexes d'unités de calcul élémentaires interconnectées. Il existe deux courants de recherche sur les réseaux de neurones : un premier motivé par l'étude

et la modélisation des phénomènes naturels d'apprentissage pour lequel la pertinence biologique est importante ; un second motivé par l'obtention d'algorithmes efficaces ne se préoccupant pas de la pertinence biologique. Nous nous plaçons du point de vue du second groupe. En effet, bien que les réseaux de neurones formels aient été définis à partir de considérations biologiques, pour la plupart d'entre eux, et en particulier ceux étudiés dans ce cours, de nombreuses caractéristiques biologiques (le temps, la mémoire...) ne sont pas prises en compte. Toutefois, nous donnons, dans la suite de cette introduction, un bref aperçu de quelques propriétés élémentaires de neurophysiologie qui permettent au lecteur de relier neurones réels et neurones formels. Nous donnons ensuite un rapide historique des réseaux de neurones.

La physiologie du cerveau montre que celui-ci est constitué de cellules (les neurones) interconnectées. Les principales étapes de cette découverte sont :

Découvertes

- Van Leuwenhook (1718) : première description fidèle de ce qu'on appellera plus tard les axones ;
- Dutrochet (1824) : observation du corps cellulaire des neurones ;
- Valentin : découverte des dendrites ;
- Deiters (1865) : image actuelle de la cellule nerveuse ;
- Sherington (1897) : les synapses ;
- les neuro-transmetteurs (première moitié du 20ème siècle).

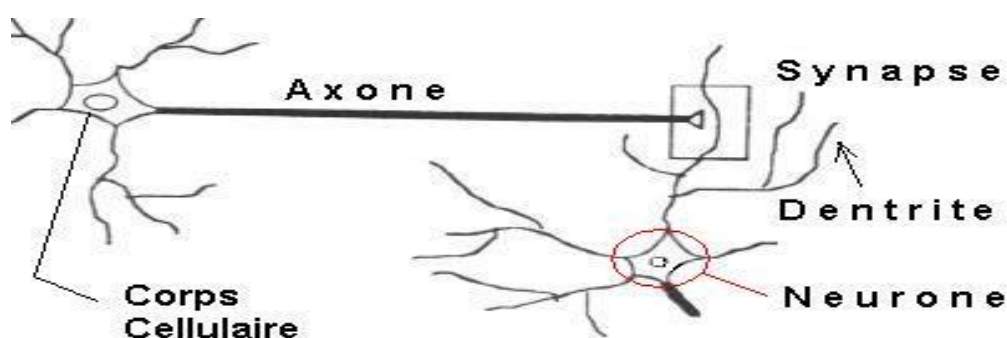


Fig n° 6.11: Modèle du neurone biologique.

Les neurones reçoivent les signaux (impulsions électriques) par des extensions très ramifiées de leur corps cellulaire (les dendrites) et envoient l'information par de longs prolongements (les axones). Les impulsions électriques sont régénérées pendant le parcours le

long de l'axone. La durée de chaque impulsion est de l'ordre d'1 ms et son amplitude d'environ 100 mV.

Les contacts entre deux neurones, de l'axone à une dendrite, se font par l'intermédiaire des synapses. Lorsqu'une impulsion électrique atteint la terminaison d'un axone, des neuromédiateurs sont libérés et se lient à des récepteurs post-synaptiques présents sur les dendrites. L'effet peut être excitateur ou inhibiteur.

Chaque neurone intègre en permanence jusqu'à un millier de signaux synaptiques. Ces signaux n'opèrent pas de manière linéaire : il y a un effet de seuil.

Voici quelques informations à propos des neurones du cerveau humain :

Informations diverses sur les neurones du cerveau humain

- le cerveau contient environ 100 milliards de neurones.
- on ne dénombre que quelques dizaines de catégories distinctes de neurones.
- aucune catégorie de neurones n'est propre à l'homme (cela serait trop beau !).
- la vitesse de propagation des influx nerveux est de l'ordre de 100m/s, c'est à dire bien inférieure à la vitesse de transmission de l'information dans un circuit électronique.
- on compte de quelques centaines à plusieurs dizaines de milliers de contacts synaptiques par neurone. Le nombre total de connexions est estimé à environ 10^{15} .
- la connectique du cerveau ne peut pas être codée dans un "document biologique" tel l'ADN pour de simples raisons combinatoires. La structure du cerveau provient donc en partie des contacts avec l'environnement. L'apprentissage est donc indispensable à son développement.
- le nombre de neurones décroît après la naissance. Cependant, cette affirmation semble remise en question.
- on observe par contre une grande plasticité de l'axone, des dendrites et des contacts synaptiques. Celle-ci est surtout très importante après la naissance (on a observé chez le chat un accroissement des contacts synaptiques de quelques centaines à 12 000 entre le 10^{ème} et le 35^{ème} jour). Cette plasticité est conservée tout au long de l'existence, bien qu'affaiblie lors du processus de vieillesse ; on parle alors de "rigidité synaptique".
- les synapses entre des neurones qui ne sont pas simultanément actifs sont affaiblies puis éliminés.
- il semble que l'apprentissage se fasse par un double mécanisme : des connexions sont établies de manière redondantes et aléatoires puis seules les connexions entre des

neurones simultanément actifs sont conservés (phase de sélection) tandis que les autres sont éliminés. On parle de stabilisation sélective.

Un neurone seul :

Un neurone est, comme vous l'avez vu, l'unité élémentaire de traitement d'un réseau de neurones. Il est connecté à des sources d'information en entrée (d'autres neurones par exemple) et renvoie une information en sortie. Voyons comment tout cela s'organise.

Entrées :

On note :

$$(X_i)_{1 \leq i \leq k}$$

Les k informations parvenant au neurone. De plus, chacune sera plus ou moins valorisée vis à vis du neurone par le biais d'un poids. Un poids est simplement un coefficient w_i lié à l'information x_i . La i -^{ème} information qui parviendra au neurone sera donc en fait :

$$w_i * x_i.$$

Il y a toutefois un "poids" supplémentaire, qui va représenter ce que l'on appelle le *coefficient de biais*. Nous le noterons w_0 et le supposons lié à une information $x_0 = -1$. Nous verrons plus tard son utilité, dans la section Fonction d'activation. Le neurone artificiel (qui est une modélisation des neurones du cerveau) va effectuer une somme pondérée de ses entrées plutôt que de considérer séparément chacune des informations. On définit une nouvelle donnée, in , par :

$$in = \sum_{i=0}^k w_i \times x_i = \left(\sum_{i=1}^k w_i \times x_i \right) - w_0$$

C'est en fait cette donnée-là que va traiter le neurone. Cette donnée est passée à la fonction d'activation, qui fait l'objet de la prochaine section. C'est d'ailleurs pour ça que l'on peut parfois appeler un neurone une unité de traitement.

Neurone artificiel

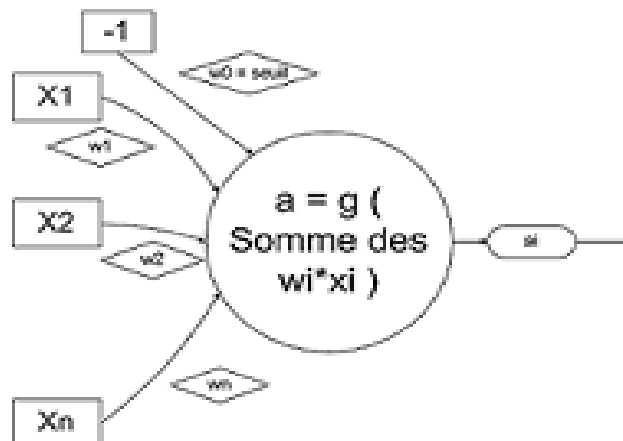


Fig n° 6.12: Modélisation du neurone artificiel.

Fonction d'activation :

La fonction d'activation, ou fonction de transfert, est une fonction qui doit renvoyer un réel proche de 1 quand les "bonnes" informations d'entrée sont données et un réel proche de 0 quand elles sont "mauvaises". On utilise généralement des fonctions à valeurs dans l'intervalle réel $[0,1]$. Quand le réel est proche de 1, on dit que l'unité (le neurone) est *active* alors que quand le réel est proche de 0, on dit que l'unité est *inactive*. Le réel en question est appelé la *sortie* du neurone et sera noté a . Si la fonction d'activation est linéaire, le réseau de neurones se réduirait à une simple fonction linéaire.

En effet, si les fonctions d'activations sont linéaires, alors le réseau est l'équivalent d'une régression multi-linéaire (méthode utilisée en statistiques). L'utilisation du réseau de neurone est toutefois bien plus intéressante lorsque l'on utilise des fonctions d'activations non linéaires. En notant g la fonction d'activation, on obtient donc la formule donnant la sortie d'un neurone:

$$a = g(in) = g\left(\sum_{i=0}^k w_i \times x_i\right)$$

Remarquez que le coefficient de biais est inclus dans la somme, d'où la formule plus explicite:

$$a = g(in) = g\left(\left(\sum_{i=1}^k w_i \times x_i\right) - w_0\right)$$

Il y a bien sûr beaucoup de fonctions d'activations possibles, c'est à dire répondant aux critères que nous avons donnés, toutefois dans la pratique il y en a principalement 2 qui sont utilisées :

Les 2 fonctions de transfert les plus utilisées :

- La fonction de Heaviside
- La fonction sigmoïde

La fonction *de Heaviside* est définie par :

$$X = (x_i)_{1 \leq i \leq n} \quad \text{si} \quad X = (x_i)_{1 \leq i \leq n}, 0 \text{ sinon.}$$

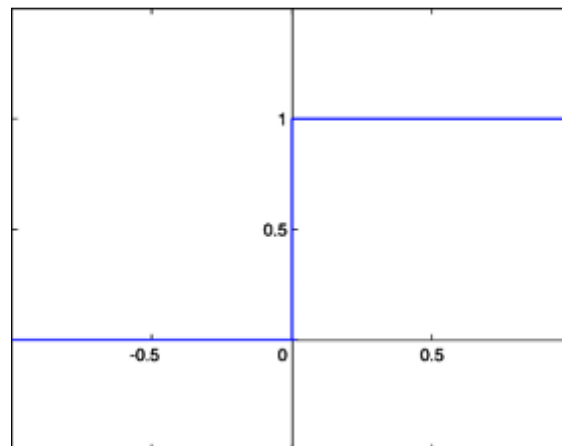


Fig n°6.13: Graphe de la fonction de Heaviside

La fonction *sigmoïde* est quant à elle définie par :

$$\forall x \in \mathbb{R}, g(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

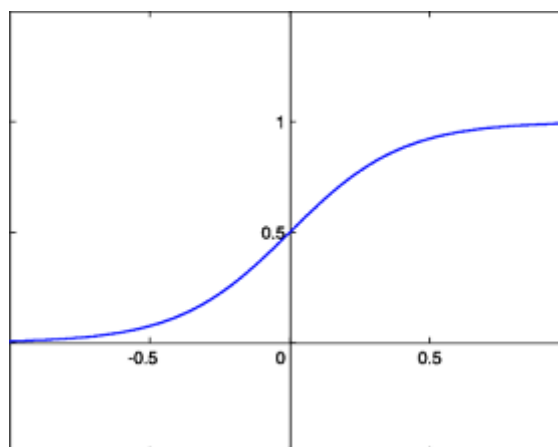


Fig n°6.14 : Graphe de la fonction Sigmoïde.

La fonction sigmoïde présente l'avantage d'être dérivable (ce qui va être utile par la suite) ainsi que de donner des valeurs intermédiaires (des réels compris entre 0 et 1) par opposition à la fonction de Heaviside qui elle renvoie soit 0 soit 1. Toutefois, les deux

fonctions possèdent un seuil. Celui de la fonction de Heaviside est en $x = 0$ et vaut 1 alors que celui de la fonction sigmoïde est en 0 également mais vaut 1/2.

Revenons à notre neurone et demandons-nous quand est-ce que le seuil est atteint, ou dépassé dans le cas de la fonction sigmoïde. Il est dans tous les cas atteint quand in vaut 0.

$$in = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=0}^k w_i \times x_i = 0 \Leftrightarrow \left(\sum_{i=1}^k w_i \times x_i \right) - w_0 = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^k w_i \times x_i = w_0$$

C'est là qu'intervient réellement le *coefficient de biais*. Nous voyons donc que l'on atteint le seuil de la fonction d'activation lorsque la somme pondérée des informations d'entrée vaut le *coefficient de biais*. De plus :

$$in \geq 0 \Rightarrow g(in) \geq \text{seuil}$$

Où seuil vaut 1 si g est la fonction seuil, 0 si g est la fonction sigmoïde. Les propriétés énoncées ci-dessus sont vraies grâce à la croissance des fonctions d'activations.

Maintenant, notons $\mathbf{W} = (w_i)_{1 \leq i \leq n}$ le vecteur dont les composantes sont les poids et $\mathbf{X} = (x_i)_{1 \leq i \leq n}$ le vecteur dont les composantes sont les informations d'entrées du neurone. Avec cette notation on obtient :

$$\mathbf{W} \cdot \mathbf{X} = 0$$

Ceci définit un hyperplan d'un espace de dimension n . En fait, l'espace dont il est question est l'espace des informations d'entrées. De la même manière que dans notre monde nous décrivons des points avec nos 3 coordonnées souvent notées (x,y,z) , dans l'espace des informations d'entrée on note les coordonnées (x_1, \dots, x_n) . Un hyperplan est un espace de dimension $n-1$. Dans notre monde, l'espace est de dimension 3 (car 3 coordonnées) et un hyperplan est donc un espace de dimension 2. En dimension 3, un hyperplan est donc simplement un plan. En dimension 2, un hyperplan est par conséquent une droite.

Plaçons-nous en dimension 2. Tracez donc 2 axes perpendiculaires. Maintenant, tracez une droite. Vous voyez que cette droite sépare le plan en 2 parties. A quoi cela sert-il ? En fait, un réseau de neurone simple (nous le verrons plus loin) va permettre de classer les points du plan dans une partie ou l'autre du plan grâce à cette droite, dans le cas de la dimension 2. Encore une fois, dans ce cas-là, ceux qui seront dans une partie du plan appartiendront à la première classe et ceux qui seront dans l'autre partie du plan (de l'autre côté de la droite) appartiendront à la deuxième classe.

Activation et condition d'activation :

On dit que le neurone est actif lorsque $in \geq 0$, autrement dit lorsque :

$$a = g(in) \geq \text{seuil}_g = g(0).$$

Similairement, on dit que le neurone est inactif lorsque $in \leq 0$, autrement dit lorsque

$$a = g(in) \leq \text{seuil}_g = g(0).$$

Exemple en dimension 2 : la fonction booléenne OU :

Dans ce cas, nous allons décrire une entrée par 2 informations. En effet, la fonction booléenne OU prend 2 informations en entrée (deux nombres qui peuvent valoir 0 ou 1 chacun) et retourne 1 si l'un des deux au moins vaut 1. Ici, nous allons grâce à un neurone simuler cette fonction, en rajoutant de la souplesse (en entrée nous accepterons des nombres réels compris entre 0 et 1).

Tout d'abord, il faut que nous-même sachions décrire le fonctionnement. Nous pouvons dire que le neurone pourra être actif lorsque $w_1x_1 + w_2x_2 \geq 0.5$, ce qui représente la partie des réels entre 0 et 1 qui est la plus proche de 1. Nous avons donc déjà le seuil du neurone, qui sera ici 0,5. De plus, on peut considérer que si $x_1 = x_2 = 0.25$, le neurone renverra 1. On va donc finalement choisir comme poids $w_1 = w_2 = 1$ et comme nous l'avons dit, le coefficient de biais, aussi appelé *seuil*, $w_0 = 0.5$.

Tracez les axes perpendiculaires puis la droite qui passe par les points (0.25,0) et (0,0.25). Tous les points qui se trouvent en-dessous de la droite seront ceux pour lesquels le neurone renverra 0, les autres seront ceux pour lesquels le neurone renverra 1.

En effet, prenons par exemple comme entrées le couple (0.1,0.8). Le calcul fait par le neurone est le suivant :

$$in = 1 \times 0.1 + 1 \times 0.8 = 0.9 \geq 0.5$$

Donc : $a = g(in) = 1$.

Ainsi on remarque que le point (0.1,0.8) est un point pour lequel le neurone doit renvoyer la valeur 1 en sortie, car la somme pondérée des entrées est supérieure au seuil. Si l'on regarde sur le dessin contenant la droite séparatrice que vous avez tracé, on constate effectivement que ce point-là se situe bien dans la zone supérieure du plan que délimite la droite.

Etant donné que la fonction OU renvoie 1 ou 0 généralement, et non pas un réel de $[0,1]$, la fonction seuil suffira bien amplement pour notre neurone.

Nous avons ainsi entièrement déterminé notre neurone. Ainsi, ce neurone prend les mêmes valeurs que la fonction booléenne OU, ce qui constitue une approximation parfaite de cette dernière. Maintenant, essayez de reproduire cette démarche pour la fonction XOR. La fonction booléenne XOR renvoie 1 quand l'une de ses deux entrées vaut 1, 0 sinon. Essayez donc de placer les points pour lesquels $x \text{ XOR } y$ vaut 1 en noir et ceux pour lesquels $x \text{ XOR } y$ vaut 0 en gris clair. Essayez maintenant de tracer *une droite* séparant les points noirs des points blancs. Vous verrez alors que c'est impossible. On voit donc les limitations du neurone seul. Qui plus est, le modèle de réseau de neurone qui va être étudié dans la partie qui suit ne permet pas non plus de représenter la fonction XOR, car il ne servira qu'à obtenir plusieurs sorties au lieu d'une seule, chaque neurone faisant sa partie du travail.



Fig n°6.15 : La fonction XOR n'est pas linéairement séparable.

A titre informatif, le modèle qui vient d'être présenté est celui établi par McCulloch et Pitts en 1943. Nous allons justement dans la partie qui suit étudier le modèle du perceptron.

En résumé :

- Un neurone est l'unité élémentaire de traitement d'un réseau de neurones ;
- Un neurone est relié à chacune de ses informations et à chacune de ces liaisons est attaché un nombre réel, nommé *poids* ;
- Un neurone possède un seuil, qui est modélisé par une information de valeur -1 et un poids w_0 , où justement w_0 est le seuil ;
- Un neurone ne traite pas chaque information indépendamment, mais effectue la somme des produits des informations par leur poids associé et traite cette donnée ;
- Il existe plusieurs fonctions de transferts remplissant les conditions nécessaires ;
- Quelle que soit la fonction de transfert, elle prendra l'image de la somme pondérée des informations, y compris le $-w_0$;
- La fonction booléenne OU peut être approchée par un seul neurone. Il en est de même pour la fonction ET ;

- Une fonction de classification qui consiste en l'insertion d'un hyperplan séparant les points appartenant à une première classe de ceux appartenant à une seconde est approchable par un neurone seul ;
- Pour les fonctions pour lesquelles c'est impossible, il faut établir un réseau de neurones multicouche.

Réseau de neurones monocouche : le perceptron :

Un réseau de neurones monocouche, aussi appelé perceptron, est caractérisé de la manière suivante :

- Il possède n informations en entrée ;
- Il est composé de p neurones, que l'on représente généralement alignés verticalement. Chacun peut en théorie avoir une fonction d'activation différente. En pratique, ce n'est généralement pas le cas ;
- Chacun des p neurones est connecté aux n informations d'entrée.

Le réseau de neurones possède ainsi n informations en entrée et p sorties, chaque neurone renvoyant sa sortie.

Pour la suite, on notera :

- $\mathbf{X} = (x_i)_{1 \leq i \leq n}$ les n informations d'entrée ;
- $w_{i,j}$ pour $1 \leq i \leq n$ et $1 \leq j \leq p$, le poids reliant l'information x_i et le neurone j puis a_j l'activation du j -^{ème} neurone ;
- $w_{0,j}$ le coefficient de biais, également appelé *seuil*, du j -^{ème} neurone ;
- in_j la donnée d'entrée (somme pondérée) du j -^{ème} neurone.

On a donc l'équation suivante :

$$\forall 1 \leq j \leq p, a_j = g(in_j) = g\left(\sum_{i=1}^n w_{i,j} \times x_i\right) = g\left(\sum_{i=1}^n w_{i,j} \times x_i - w_{0,j}\right)$$

Chaque neurone de la couche donnera donc une sortie. Une utilisation courante est que chaque neurone de la couche représente une classe. Pour un exemple \mathbf{X} donné, on obtient la classe de cet exemple en prenant la plus grande des p sorties. Essayons maintenant d'approfondir ce modèle.

Modélisation Matricielle :

Avec la notation que nous avons définie pour les poids, on obtient ainsi une matrice

$$\mathbf{W} = (W_{i,j})_{(i,j) / 1 \leq i \leq n \text{ et } 1 \leq j \leq p}$$

Où le coefficient ligne i colonne j représente le coefficient liant la i -ème information au p -ème neurone. Si on représente par :

$$\mathbf{A} = (a_j)_{1 \leq j \leq p}$$

La liste des p sorties du réseau de neurone, on obtient l'équation matricielle suivante, en adaptant la fonction de transfert à notre nouvelle modélisation : on définit une nouvelle fonction g qui prend l'image d'un vecteur en calculant l'image de chacune de ses composantes, et retourne un vecteur dont les composantes sont les images des composantes de départ :

$$A = g({}^tW \times X)$$

Cette modélisation n'est pas fréquemment utilisée mais représenter un réseau de neurones monocouche par une matrice permet d'avoir une autre vision du problème.

Evaluation RdN(X) :

L'évaluation d'un exemple $\mathbf{X} = (x_i)_{1 \leq i \leq n}$ par un réseau de neurones donne un vecteur à p composantes. On définit la notation suivante.

$$RdN(X) = g({}^tW \times X)$$

Où $RdN(X)$ est un vecteur à p composantes, \mathbf{W} une matrice à n lignes et p colonnes et \mathbf{X} le vecteur dont chacune des n composantes représente une information d'entrée.

Les différents types de perceptrons :

Il existe 2 types de perceptrons : les perceptrons *feed-forward* et les perceptrons *récurrents*. Les perceptrons *récurrents* sont ceux qui alimentent leurs entrées avec leurs sorties, alors que les perceptrons *feed-forward* non.

Séparation linéaire et conditions d'approximabilité :

Pour un perceptron dont les fonctions de transferts sont toutes la fonction seuil (perceptron à seuil), en dimension 2, comme nous l'avons vu plus haut, on peut parfois tracer une droite telle que d'un côté de la droite, les points appartiennent à une première classe et de l'autre côté ils appartiennent à une seconde classe. Cette notion de séparation est généralisée. Pour un perceptron à p neurones, on parle de *séparation* de l'espace par un *hyperplan* de cet espace. Toutefois, on ne peut pas toujours avoir un hyperplan qui sépare l'espace en 2 parties, dans les cas où la fonction qu'on veut approcher est plus complexe.

Dans le cas où l'on peut séparer l'espace avec un hyperplan, on dit que la fonction à approcher est linéairement séparable.

En général, les perceptrons à seuil ne permettent de représenter que des fonctions linéairement séparables. De même, les perceptrons à sigmoïde sont assez limités, à la seule différence.

Comment choisir les poids ?

Malgré cette limitation, les perceptrons à seuil ont une propriété intéressante qui est celle que nous allons aborder dans la section suivante : il existe un (en fait plusieurs) algorithme(s) qui permet (tent) à un perceptron d'adapter ses poids à un ensemble d'exemples de sorte à obtenir pour cet ensemble la classification attendue. Ainsi, si l'ensemble d'exemples est assez vaste (les exemples sont assez variés), on pourra obtenir un perceptron qui donnera des résultats convenables pour des exemples non rencontrés.

Apprentissage simple du perceptron : méthode du gradient et algorithme de Widrow-Hoff :

Il y a deux algorithmes, principalement, pour "faire apprendre" à un réseau de neurones monocouche. Le premier est la méthode simple et se nomme la *descente de gradient*. L'autre, un peu plus efficace généralement, se nomme algorithme de *Widrow-Hoff*, du nom des deux scientifiques qui ont élaboré cette technique.

Les deux méthodes consistent à comparer le résultat qui était attendu pour les exemples puis à minimiser l'erreur commise sur les exemples. Toutefois, il existe bien sûr une nuance entre les deux méthodes, qui va être expliquée plus loin.

Nous allons, pour chacune des méthodes, étudier la correction des poids concernant seulement l'un des neurones. Il suffira d'appliquer successivement la méthode de votre choix à chacun des neurones du réseau monocouche.

Apprentissage par descente de gradient :

Pour comprendre cette méthode d'apprentissage, il faut définir l'erreur quadratique E . Si l'on est en présence de N exemples, alors pour $1 \leq k \leq N$, notons (\mathbf{X}_k, y_k) le couple *exemple* - sortie attendue, où $\mathbf{X}_k = (x_i)_{1 \leq i \leq n}$ est le vecteur dont les coordonnées sont les n informations d'entrée de l'exemple et où y_k est la sortie attendue (la sortie "vraie") pour cet exemple-là de la part de notre neurone. Enfin, on note s_k la sortie obtenue pour le k -ème exemple avec les poids actuels. Alors, l'erreur quadratique est définie comme suit.

$$RdN(X) = g({}^tW \times X)$$

On voit donc que l'erreur est nulle si le réseau de neurones ne se trompe sur aucun des exemples, c'est à dire s'il parvient à calculer la bonne sortie (par exemple classifier) pour

chacun des exemples correctement. C'est rarement le cas car souvent on démarre avec des poids tirés aléatoirement. Il s'agit donc de minimiser, pour un ensemble de N exemples donné, cette erreur quadratique. Je n'ai pas jugé nécessaire de vous présenter en milieu de ce cours le calcul qui permet d'obtenir une minimisation de l'erreur quadratique. Toutefois, le résultat étant très important, la démonstration est disponible en annexe de cet article. On obtient la variation à appliquer à chaque poids afin de classifier au mieux (parfaitement, dans le meilleur des cas) chacun des N exemples.

On va noter α un nombre réel auquel on donne le nom de taux d'apprentissage. C'est nous qui devons lui donner une valeur lors de la mise en pratique de l'apprentissage. Comme nous ne considérons qu'un neurone à la fois, on va noter w_i le poids reliant la i -^{ème} information à notre neurone.

La méthode de descente du gradient consiste en fait à effectuer les actions suivantes :

Etapes de la méthode de descente du gradient

- Créer n variables dw_i , pour $1 \leq i \leq n$, égales à 0
- Prendre un exemple e_k , pour $1 \leq k \leq N$
- Calculer la sortie obtenue avec les poids actuels, notée s_k (1)
- Rajouter à dw_i , pour tout $1 \leq i \leq n$, le nombre $X = (x_i)_{1 \leq i \leq n}$ (2)
- Répéter (1) et (2) sur chacun des exemples
- Pour $1 \leq i \leq n$, remplacer w_i par $w_i + dw_i$

Voici donc l'algorithme d'apprentissage par descente du gradient, appliqué à un seul neurone, qu'il faudra donc répéter sur chacun des neurones.

Sélectionnez :

Entrée : n poids reliant les n informations à notre neurone ayant des valeurs quelconques N exemples (X_k, y_k) où X_k est un vecteur à n composantes x_i ,

Chacune représentant une information de cet exemple

Sortie : les n poids modifiés

Pour $1 \leq i \leq n$

$dw_i = 0$

Fin pour

Pour tout exemple $e = (X_k, y_k)$

Calculer la sortie s_k du neurone

Pour $1 \leq i \leq n$

$di = dw_i + \alpha * (y_k - s_k) * x_i$

```
Fin pour
Pour 1 <= i <= n
    w_i = w_i + dw_i
Fin pour
```

Afin d'obtenir de bons résultats, il faudra passer plusieurs fois les exemples à chaque neurone, de sorte que les poids convergent vers des poids "idéaux". Le problème avec cette méthode est que l'on corrige sur la globalité des exemples, ce qui fait que le réseau ne s'adaptera aux exemples qu'après un certain moment. Il y a une autre méthode qui permet de corriger sur chacun des exemples, et qui se nomme méthode d'apprentissage de *Widrow-Hoff*.

Apprentissage par l'algorithme de Widrow-Hoff :

L'algorithme de *Widrow-Hoff*, ou encore "la règle delta", n'est en fait qu'une variante de l'algorithme précédent. Je vais détailler ceci.

Comme nous l'avons vu dans l'algorithme précédent, on engrange les erreurs commises sur chaque exemple puis pour terminer on corrige le poids, et ce pour chaque poids. Vous ressentirez probablement cette méthode comme assez "grossière", dans le sens où elle n'est pas très précise et met beaucoup de temps avant de tendre vers le bon coefficient. On ressent le fait qu'elle ne corrige qu'un petit peu alors qu'elle pourrait corriger beaucoup mieux pour chaque exemple. Et c'est là que l'algorithme de *Widrow-Hoff* intervient. En effet, la méthode élaborée par Widrow et Hoff consiste à modifier les poids après chaque exemple, et non pas après que tous les exemples aient défilé. Ceci va donc minimiser l'erreur de manière précise, et ce sur chaque exemple. Instinctivement, on constate bien que le réseau de neurones va s'améliorer nettement mieux et va tendre bien plus rapidement à classifier parfaitement (ou presque) chacun des exemples, bien que des méthodes plus efficaces encore existent. Voici donc l'algorithme de *Widrow-Hoff*.

Sélectionnez :

Entrée : n poids reliant les n informations à notre neurone ayant des valeurs quelconques N exemples (X_k, y_k) où X_k est un vecteur à n composantes x_i ,

Chacune représentant une information de cet exemple

Le taux d'apprentissage alpha

Sortie : les n poids modifiés

Pour tout exemple = (X_k, y_k)

Calculer la sortie s_k du neurone

```
Pour 1 <= i <= n
    w_i = w_i + alpha*(y_k - s_k)*x_i
```

Fin pour

Cette méthode est bien sûr plus efficace, comme dit précédemment, mais l'algorithme est plus simple également ! Je vous invite donc à tester tout d'abord cet algorithme dans des cas assez simples, comme les fonctions booléennes ainsi que tout autre exemple de ce genre auquel vous pourriez penser. Appliquer plusieurs fois cet algorithme permettra d'affiner la correction d'erreur et d'obtenir un réseau de neurones de plus en plus performant. Attention toutefois, car l'appliquer un trop grand nombre de fois mènerait à ce que l'on appelle "*l'overfitting*" (sur-apprentissage), c'est à dire que votre réseau devient très performant sur les exemples utilisés pour l'apprentissage, mais ne parvient peu ou pas à généraliser pour des informations quelconques.

Les types de réseaux de neurones :

Il s'agit de généraliser ce qui a été vu en 4.3. Un réseau de neurones est simplement un ensemble de neurones liés entre eux, le poids étant partie intégrante de cette liaison. La façon de lier un neurone à un autre est de prendre la sortie de ce premier, d'affecter un poids à sa valeur et de rejoindre une entrée d'un autre neurone, comme nous l'avons déjà vu.

Les réseaux de neurones *feed-forward* sont des réseaux où les neurones ne sont connectés que dans un sens, le sens orienté de l'entrée vers la sortie. Les réseaux de neurones *récurrents* sont des réseaux où les neurones de sortie par exemple peuvent voir leur sortie utilisée comme entrée d'un neurone d'une couche précédente (nous verrons ce que sont les couches) ou de la même couche. Par conséquent, instinctivement il est évident que ce modèle est bien plus compliqué. Comme l'indique le titre de cet article, ce n'est pas ce modèle qui est étudié dans le cas d'un réseau de neurones à plusieurs couches.

Perceptron multicouche :

Nous avons précédemment étudié les perceptrons (réseaux monocouche) et nous avons vu que les neurones de sortie étaient chacun connectés aux mêmes informations. Nous les avons perçus comme une couche (alignés verticalement). Ainsi, une couche est constituée de neurones étant connectés aux mêmes informations mais n'étant pas connectés entre eux. Il s'agit maintenant de généraliser le perceptron. On peut ainsi disposer les neurones en plusieurs couches. Ainsi les informations en entrée sont connectés à tous les neurones de la première couche, tous les neurones de la première couche sont connectés à tous les neurones de la seconde couche, et ainsi de suite jusqu'à la dernière couche, appelée couche de sortie.

Toutes les couches excepté la couche de sortie sont considérées comme "*couches cachées*". Toutefois, n'ayez crainte : il a été prouvé que dans la plupart des cas, un réseau à 2

couches (*informations* -> *une couche* -> *couche de sortie*) où chaque neurone de la couche cachée a comme fonction d'activation la fonction sigmoïde et chaque neurone de la couche de sortie a comme fonction d'activation une fonction linéaire permet d'approximer une fonction continue. Il s'agit du Théorème de Cybenko. Pour des fonctions discontinues, nous n'avons aucune garantie.

Du fait du résultat précédent, nous allons restreindre notre étude aux réseaux neuronaux à une seule couche cachée. La couche cachée permet plus d'interaction et instinctivement, on est conscient que notre réseau de neurone pourra apprendre des "*fonctions*" plus complexes en rajoutant une couche. Le fonctionnement n'est pas pour autant complexe. On a toujours le choix de la fonction d'activation, et l'évaluation de la sortie d'un neurone se déroule de la même manière. La seule différence est que la sortie d'un neurone de la couche cachée sera l'une des informations d'entrées des neurones de la couche de sortie.

Evaluation :

Il y a par rapport au perceptron monocouche une étape supplémentaire lors de l'évaluation de la sortie du réseau de neurone. On obtient ainsi une matrice des poids pour passer des informations à la couche cachée, et une autre matrice de poids pour passer de la couche cachée à la couche de sortie. Ensuite, cela revient au même que pour le réseau monocouche.

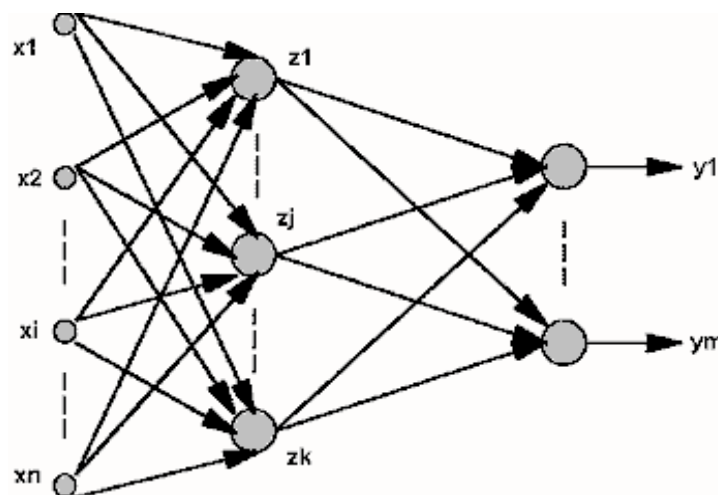


Fig n°6. 16: Modélisation du perceptron multicouche.

Dimensionner un perceptron multicouche :

Dimensionner signifie ici déterminer le nombre de neurones de chacune des deux couches. Pour la couche de sortie, cela dépend de la nature du résultat que vous attendez. Si vous avez besoin de n nombres en sortie, il vous faudra n neurones sur la couche de sortie, comme pour le perceptron monocouche. Pour la couche cachée, les choses sont beaucoup

moins simples. Il n'existe aucune loi, aucune règle, aucun théorème qui permettrait de déterminer le nombre de neurones à placer dans la couche cachée pour avoir un réseau de neurones optimal. La méthode pour s'en rapprocher est d'essayer "au hasard" plusieurs nombres de neurones en couche cachée jusqu'à avoir des résultats les plus probants possibles après l'apprentissage. Il existe toutefois des résultats concernant certains types de fonctions que l'on souhaite approcher. Malheureusement, aucun de ces résultats n'est pour le moment assez générique pour être exploité dans les cas courants.

Nous ne nous attardons pas sur la présentation et l'explication du fonctionnement du perceptron multicouches étant donné qu'il fonctionne de manière analogue au perceptron monocouche. C'est pourquoi nous allons maintenant nous pencher sur l'apprentissage du perceptron multicouche.

Apprentissage du perceptron multicouche :

De la même manière que le perceptron monocouche, le perceptron multicouche est lui aussi capable d'apprentissage. En effet, il existe également un algorithme permettant de corriger les poids vis à vis d'un ensemble d'exemples donnés. Cet algorithme est appelé ;

Algorithme de rétro-propagation du gradient :

Cet algorithme utilise la même règle de modification des poids ("*delta rule*") que l'algorithme de *Widrow-Hoff*. L'algorithme va être donné dans sa version la plus générale, c'est à dire avec plusieurs couches cachées. On notera g la fonction d'activation. Une démonstration de l'efficacité de cet algorithme exige de la fonction d'activation qu'elle soit indéfiniment dérivable. On notera s_i la sortie du neurone i de la couche de sortie et y_i la sortie attendue pour ce même neurone. Enfin, pour des neurones d'une couche cachée, on notera o_i la sortie calculée du neurone.

Sélectionnez :

Entrée : un exemple, sous la forme (vecteur_x, vecteur_y); epsilon le taux d'apprentissage un Perceptron MultiCouches avec $q-1$ couches cachées C_1, \dots, C_{q-1} , une couche de sortie C_q .

Répéter :

```
Prendre un exemple (vecteur_x, vecteur_y) et calculer g(vecteur_x)
Pour toute cellule de sortie i   di <- si(1-si)(yi-si) finPour
Pour chaque couche de q-1 à 1
    Pour chaque cellule i de la couche courante
        di = oi(1-oi) * Somme [pour k appartenant aux
indices des neurones
```

```
                                Prenant en entrée la sortie du
neurone i] de dk*w_ki
                                Fin Pour
                                Fin Pour

                                Pour tout poids w_ij <- w_ij + epsilon*di*x_ij
Fin Pour
Fin Répéter
```

La variable "di" apparaît deux fois dans le code. Il s'agit de deux variables différentes, car en fait on suppose que les neurones sont numérotés de sorte que l'on puisse associer à un identifiant un neurone et réciproquement. Par conséquent, le 'i' de "di" identifie un neurone et ainsi on peut effectuer la dernière boucle de manière uniforme sans différencier pour la couche de sortie et les couches cachées.

Voici quelques remarques sur cet algorithme.

- L'algorithme de rétropropagation du gradient est une extension de l'algorithme de *Widrow-Hoff*. En effet, dans les deux cas, les poids sont mis à jour à chaque présentation d'exemple et donc on tend à minimiser l'erreur calculée pour chaque exemple et pas l'erreur globale.
- La méthode donne de bons résultats pratiques. Dans la plupart des cas, on rencontre peu de problèmes dus aux minima locaux, mais il y en a. Toutefois, il est moins performant que d'autres algorithmes de propagation d'erreur : il tend moins rapidement vers des poids plus ou moins optimaux.
- Il n'y a pas de condition d'arrêt pour le REPETER. C'est à vous de fixer le critère. On peut par exemple répéter cela jusqu'à ce que l'erreur sur chaque exemple descende en dessous d'un certain nombre.
- Le choix de l'architecture initiale du réseau reste un problème difficile. Ce choix peut être fait par l'expérience. Des méthodes dites "auto-constructives" existent : il s'agit d'ajouter des neurones au cours de l'apprentissage pour que l'apprentissage se fasse bien. Mais ces méthodes rencontrent souvent le problème de "sur-apprentissage", mentionné dans la section 5.2. L'architecture peut aussi être choisie à l'aide de méthodes basées sur les algorithmes génétiques.

Un modèle de réseau neuronal est modèle connexionniste qui simule le traitement de l'information ayant lieu dans le système nerveux. Cependant, ce réseau est composé par un ensemble de nœuds (les unités) connectés par des liens orientés, ou connexions. Les modèles

connexionnistes utilisent une information numérique et sont des systèmes dynamiques qui affectent des calculs analogues à ceux d'un neurone. En effet, un réseau connexionniste est constitué d'éléments extrêmement simples qui interagissent pour donner au réseau son comportement global.

Il y a principalement deux facteurs qui influent sur l'apprentissage. Ce sont la qualité de l'échantillonnage d'apprentissage (les exemples qui constituent la base d'apprentissage) et la diversité des valeurs. En effet, le réseau de neurones généralisera mieux (aura plus de chances de répondre correctement en lui donnant en entrée des informations non présentes dans les exemples d'apprentissage) si la qualité de l'échantillonnage est meilleure et si les données des exemples d'apprentissage sont variées. Intuitivement, on est conscient que s'il sait répondre correctement pour un nombre fini de situations les plus diverses, il sera alors plus proche de ce que l'on veut dans une situation nouvelle.

Nous avons présenté la théorie des réseaux de neurones artificiels *feed-forward* (c'est à dire ne comportant pas de connexions vers des couches précédentes). Il existe des structures de réseaux de neurones beaucoup plus complexes.

L'ANN est utilisé dans le domaine d'hydrogéologie et hydrologie (Lallahem et Mania, 2003a, b), dans le domaine de la gestion de l'eau, l'ANN est utilisé pour la prévision des paramètres de la qualité de l'eau (Mier et Dandy, 1996), la prévision de la demande de l'eau (Liu et al, 2003), la modélisation pluie-débit (Minns et Hall, 1996), la prévision des flux (Coulibaly et al, 2000 ; Chang et al, 2003), la relation entre la pluie et le débit (Rajurkar et al 2004 ; Riad et al, 2004) la gestion des aquifère côtiers (Jalala S, 2005).

5.6.3.2 Le Logiciel :

STATISTICA est un système complet et intégré d'analyse des données, de représentation graphique, de gestion de bases de données et de développement d'applications personnalisées, offrant une large gamme de procédures élémentaires ou avancées pour les sciences, le data mining et toutes les applications industrielles ou commerciales.

STATISTICA offre non seulement des procédures généralistes pour les statistiques, les graphiques et la gestion analytique des données, mais également un ensemble complet de méthodes spécialisées pour l'analyse des données (par exemple, le data mining, les sciences sociales, la recherche biomédicale ou les applications industrielles et commerciales).

Le module Data Mining (Automated Neural Networks) du logiciel *STATISTICA*, version 8.0 a été utilisée dans ce travail pour caractériser les variables d'efficacité et d'établir des relations par simulation entre la variable de Sortie (dépendante) et les variables Entrées

indépendantes. L'ANN est un programme complet, État de l'Art, puissant et extrêmement rapide, le module ANN sous STATISTICA 8.0 comportant :

- Intégration prêt post-traitement, y compris la sélection des données, mise à l'échelle, la normalisation et la substitution des valeurs manquantes, l'interprétation de la classification, régression, et les problèmes de séries chronologiques.
- La facilité exceptionnelle de l'utilisation couplée avec une puissance analytique non sur passée, par exemple, un type unique intelligent (Solveur du Problème) peut guider étape par étape dans la procédure de création des différents réseaux et en choisissant le réseau le plus performant.
- Des techniques analytiques et exploratoires puissantes, y compris la sélection des algorithmes d'entrée (choix des variables d'entrée appropriées à l'analyse exploratoire des données, qui est une application typique des réseaux de neurones).
- État de l'Art des algorithmes d'apprentissage hautement optimisé, et plein contrôle sur tous les aspects qui influent sur les performances du réseau telles que l'activation et les fonctions d'erreur, ou la complexité du réseau.
- Graphique compréhensif et statistique qui facilite les analyses exploratoires interactives et,
- La Sélection d'un modèle neuronal soutient les classes les plus importantes des réseaux de neurones MLP, y compris, Fonction Radiale de Base (RFB), pour résoudre vos problèmes concrets.

6.6.3.3 Les Matrices de Corrélation :

Le coefficient de corrélation de Bravais-Pearson est un indice statistique qui exprime l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives. C'est une mesure de la liaison linéaire, c'est à dire de la capacité de prédire une variable x par une autre y à l'aide d'un modèle linéaire. Il permet de mesurer l'intensité de la liaison entre deux caractères quantitatifs. C'est donc un paramètre important dans l'analyse des régressions linéaires (simples ou multiples). En revanche, ce coefficient est nul ($r = 0$) lorsqu'il n'y a pas de relation linéaire entre les variables (ce qui n'exclut pas l'existence d'une relation autre que linéaire). Par ailleurs, le coefficient est de signe positif si la relation est positive (directe, croissante) et de signe négatif si la relation est négative (inverse, décroissante).

Ce coefficient varie entre -1 et $+1$; l'intensité de la relation linéaire sera donc d'autant plus forte que la valeur du coefficient est proche de $+1$ ou de -1 , et d'autant plus faible qu'elle est proche de 0 .

- ∞ Une valeur proche de +1 montre une forte liaison entre les deux caractères. La relation linéaire est ici croissante (c'est-à-dire que les variables varient dans le même sens);
- ∞ Une valeur proche de -1 montre également une forte liaison mais la relation linéaire entre les deux caractères est décroissante (les variables varient dans le sens contraire);
- ∞ Une valeur proche de 0 montre une absence de relation linéaire entre les deux caractères.

6.6.3.4 Les Techniques d'Exploration Multivariée :

6.6.3.4.1 L'Analyse en Composantes Principales (ACP) :

L'ACP est une méthode descriptive qui permet de réduire le nombre des variables afin de projeter le nuage de points dans un sous-espace bidimensionnel engendré par des couples d'axes fonctionnels ou facteurs.

Deux types d'analyses sont disponibles, selon les données normalisées ou bien centrées.

- Dans le premier cas, l'analyse est effectuée par la matrice de corrélation,
- Alors, que le deuxième cas, l'analyse est effectuée par la matrice de covariance.

Cependant, la méthode de base se compose d'une matrice symétrique diagonale : de corrélation ou de covariance. La particularité de ce modèle est le graphisme qui fournit un aide visuel pour le classement des variables et des cas (observations). Ce modèle a une caractéristique unique comme actif, ainsi que les variables et les observations peuvent être spécifiées. Les variables actives dans l'ANN sont utilisées dans les calculs des composantes principales.

L'ACP produit des résultats sous deux formes : les tables de calculs et les graphiques, les tables de calculs sont utilisées pour interpréter les résultats et les graphiques associés aident au classement des variables et des observations visuellement, elle produit également un large éventail de résultats.

L'objectif principal de l'ACP est de récupérer un espace vectoriel de dimension inférieure sur laquelle l'origine des points (variables et observations) peut être prévu, de sorte que la structure sous-jacente des données pourrait être détecté.

6.6.3.4.2 L'Analyse Factorielle (AF) :

L'analyse factorielle est un terme générique pour les techniques statistiques concernées par la réduction d'un ensemble de variables observables dans un petit nombre de facteurs latents et la détection de la structure dans les relations entre les variables, c'est-à classer les variables. Cette structure est exprimée dans le modèle de variances et covariances entre les variables et les similitudes entre les observations. L'hypothèse sous-jacente de l'analyse factorielle est qu'il existe un certain nombre de facteurs latents non observés qui représentent

les corrélations au sein d'un ensemble d'observations multi-variées. L'analyse factorielle fonctionne par extraction des valeurs et vecteurs propres d'une matrice carrée $[R]$ qui est $m \times m$, obtenue en multipliant une matrice de données normalisée $[X]$ par sa transposée $[X]'$.

$$[R] = [X]'[X]$$

Les éléments de R constituée par des coefficients de corrélation qui sont les sommes de carrés premières et des produits croisés de m variables :

$$r_{jk} = \sum_{i=1}^n X_{ij}X_{ik}$$

1 Où j et k sont les deux colonnes de la matrice de donnée. Faire tourner la solution de facteur est essentiel pour obtenir une structure de facteur plus simple qui est à interpréter. La rotation maximise la variance des facteurs sur les nouveaux axes. La méthode la plus classique de calcul de la rotation est de réorienter ou de nettoyer les chargements obtenus dans une analyse en composantes principales et apporter une structure simple qui est la rotation *varimax* (Kaiser, 1958). La rotation *Varimax* est une rotation orthogonale de facteurs qui redistribue la variance expliquée dans le modèle de saturations factorielles. La variance totale expliquée est la même avant et après la rotation.

Conclusion :

Un modèle de réseau neuronal est modèle connexionniste qui simule le traitement de l'information ayant lieu dans le système nerveux. L'ANN est utilisée dans le domaine d'hydrogéologie et hydrologie et dans le domaine de la gestion de l'eau, est utilisé pour :

- *la prévision des paramètres de la qualité de l'eau,*
- *la prévision de la demande de l'eau, la modélisation pluie-débit*
- *la prévision des flux,*
- *la relation entre la pluie et le débit,*
- *la gestion des aquifères côtiers.*

Le module Data Mining (Automated Neural Networks) du logiciel STATISTICA, version 8.0 a été utilisée dans ce travail pour caractériser les variables d'efficacité et d'établir des relations par simulation entre la variable de Sortie (dépendante) et les variables Entrées (indépendantes).

Matrice de corrélation présente un coefficient de corrélation qui est un indice statistique qui exprime l'intensité et le sens (positif ou négatif) de la relation linéaire entre deux variables quantitatives. C'est une mesure de la liaison linéaire. Il permet de mesurer l'intensité de la liaison entre deux caractères quantitatifs.

L'ACP produit des résultats sous deux formes : les tables de calculs et les graphiques, les tables de calculs sont utilisées pour interpréter les résultats et les graphiques associés aident au classement des variables et des observations visuellement, elle produit également un large éventail de résultats.

Synthèse des analyses

Le modèle DPSIR pour la gestion d'un périmètre irrigué dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)

Introduction :

La collecte des données réelles des secteurs de périmètre d'irrigation du Saf-Saf pour atteindre nos objectifs de travail sont pas disponible complètement pour valider et appliquer le modèle dans ce périmètre (le périmètre pourtour que cinq municipalités (Emdjed Edchich, Salah Bouchaour, El Harrouch, Ramdane Djamel et Skikda).

C'est pour cela la description et la validation du nouveau modèle conceptuel de la gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant de Saf-Saf s'explique par une synthèse combiné des résultats obtenus par (Mr : Sakaa ; 2013) sous le cadre de doctorat qui se faite pour arriver aux même objectifs de notre travail.

La méthodologie qu'on va suivre pour attraper nos objectifs de travail est par la description des outils d'analyse telle que les réseaux de neurones artificiels (ANN), les opinions d'experts, les statistiques descriptives des indicateurs, les analyses multivariées...

7.1 L'Analyse par les RNA et la Comparaison avec les Avis des Experts :

Le Réseaux des Neurones Artificiels (RNA ou ANN) a été utilisé pour caractériser et classer par ordre de priorité les variables indépendantes des différentes catégories du modèle DPSIR. La linéarité et la normalité des données ne sont pas pré-requises pour l'utilisation du modèle RNA. Par conséquent, il n'est pas nécessaire de transformer des données.

Les avis des experts sont ont été entrepris à des fins de comparaison pour examiner le niveau de compréhension et de connaissance du groupe d'expert sélectionné sur les conditions de base actuelles du secteur de l'eau. L'obtention des avis se fait par le biais d'un questionnaire. Les connaissances sur le classement des variables dans les cinq catégories du modèle DPSIR ont été recueillies auprès de 20 experts de la wilaya de Skikda et Constantine.

Le groupe comprenait les ingénieurs chefs services d'ADE, de l'Environnement, de la DHW, de l'hydraulique agricole du DSA, le chef service environnement de la base pétrolière, les autorités industrielles et les ingénieurs de l'ANRH.

Pour les résultats obtenus on prend en considération pour interpréter et comparer les indicateurs qui ont été en relation avec le secteur agricole.

7.1.1 Les variables de la force motrice (Driving force) :

Les données de la variable dépendante mobilisation de la ressource en eau (MRE) et celles des variables indépendantes de la force motrice (D) ont été appliquées dans la création du modèle neuronal RNA. Les variables indépendantes de la catégorie D sont : la population (Pop), les revenus par employant (REmp), le tourisme (Tourism), l'occupation du sol

(OccupS), le taux de raccordement à l'eau potable (TxEP), le taux de raccordement aux réseaux des eaux usées (TxEU), la dotation journalière de l'eau potable (DotEP), l'évacuation des eau pluviales (ÉvEPluv), le prix de l'eau (PrixE), la taxation sur l'eau (TaxE), la consommation de l'eau d'agriculture (ConEAg), l'intégration des femmes (IntégFem), et les pertes d'eau (PerteE). Les variables indépendantes représentant la force motrice D ont été considérées comme variables Entrées, alors que la Sortie est la variable dépendante mobilisation de la ressource en eau (MRE). Le réseau MLP (Multilayer Perceptron) peut être représenté par la formule suivante :

$$\{WRM\} = ANN \left[\text{Pop, REmp, Tourism, OccupS, TxEP, TxEU, DotEP, EvEPluv, PrixE, TaxE, ConEAg, IntégFem, PerteE.} \right]$$

Les variables indépendantes de la force motrice qui nous intéresse à interpréter et comparer sont : l'évacuation des eaux pluviales (ÉvEPluv), le prix de l'eau (PrixE), la taxation sur l'eau (TaxE), la consommation de l'eau d'agriculture (ConEAg), et les pertes d'eau (PerteE).

Les types des réseaux neuronaux utilisés sont les suivantes : le Perceptron Multicouche MLP avec deux algorithmes de rétro-propagation (Broyden Fletcher GoldfarbShano : BFGS Quasi Newton et le Gradient Conjugué SGC) et le RBF (l'ANN à fonctions radiales de base).

Au cours de l'analyse, plusieurs réseaux ont été testés. Le meilleur ANN trouvé est le MLP à trois (3) couches et à quinze (15) nœuds cachés et un minimum de SOSE (Sum Of Square Error) de 0.003342 par rapport aux autres types d'ANN (tableau n° : 7.1).

Tab n°7.1 : La SOSE pour les divers ANN des variables D.

ANN	Architecture	SOSE
RBF	13-16-1	0,014655
MLP (CG 77)	13-15-1	0,004750
MLP (BFGS 139)	13-15-1	0,003342

Source : Sakaa ;(2013).

Le modèle a une très bonne performance dans la phase d'apprentissage avec un écart-type de 2,772, et la SOSE des trois phases (l'apprentissage, la validation et le test) est petite et indique que les données des variables appartenant à la même population (Tableau n°7.2).

Tab n° 7.2 : Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (MRE).

	Training	Verification	Testing
Moyenne	1,528125	3,665714	1,264286

Écart-type	1.945824	<u>2,772381</u>	1,898963
SOSE	0,000033	<u>0,003342</u>	0,009313
C. Corrélation	0,999595	<u>0,977895</u>	0,941942

Source : (Sakaa ; 2013).

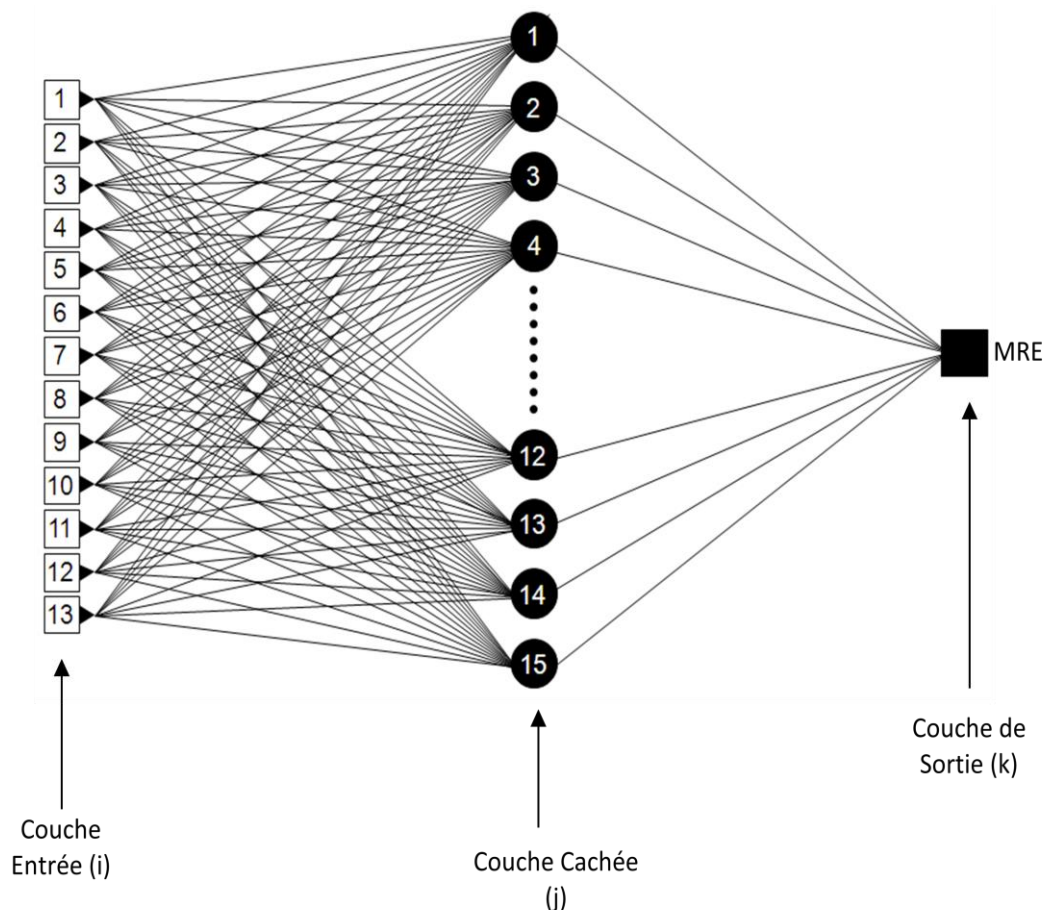


Fig n°7.1: Le réseau MLP à trois couches pour les variables de la catégorie D.

- 2: Les Revenues par Employant dinars.an-1
- 3: L'Occupation du Sol (%)
- 8: Évacuation des Eaux Pluviales en (%)
- 9: Le Prix de l'Eau Dinars.m⁻³
- 10: La Taxation sur l'Eau (%)
- 11: La Consommation de l'Eau d'Agriculture hm³.an-1
- 13: Les Pertes d'Eau (%)

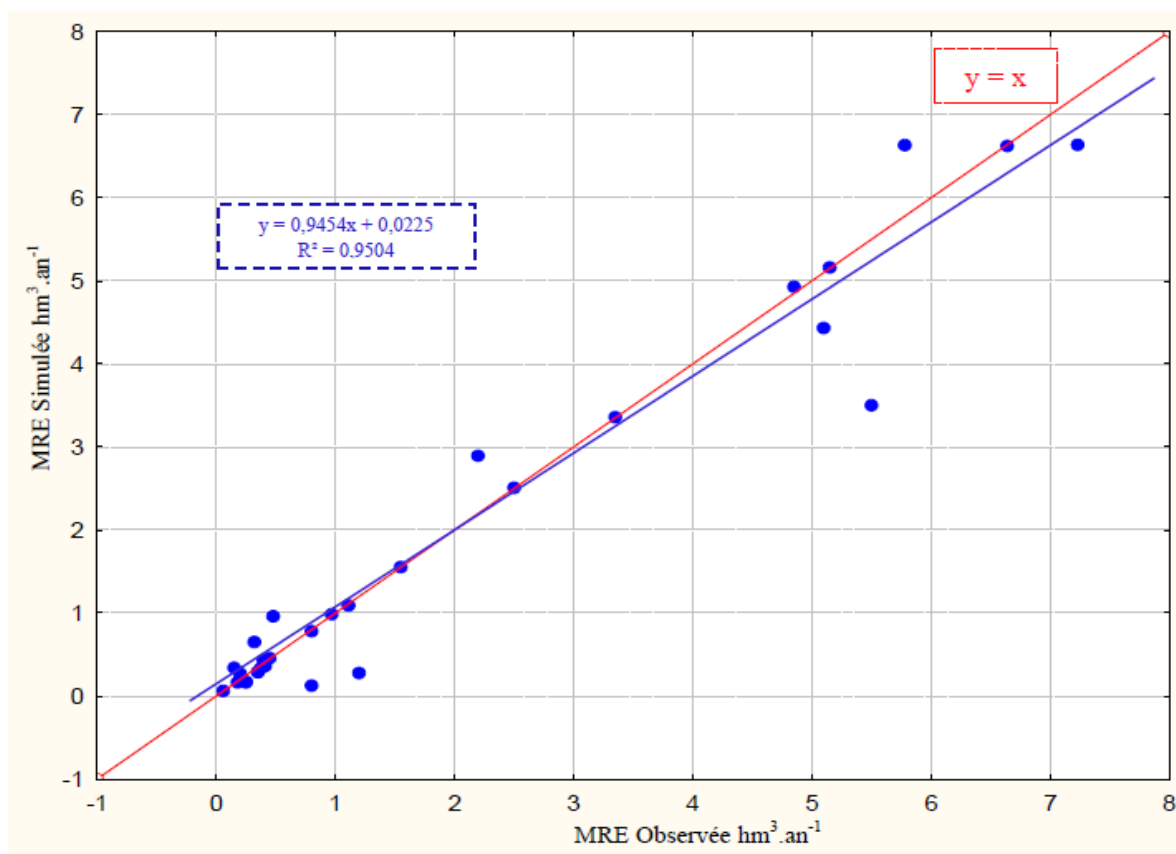


Fig n°7.2 : La MRE observée en fonction de la MRE simulée.

L'analyse de la sensibilité de l'ANN pour les variables indépendantes de la force motrice dans les deux phases de training et de vérification (Tableau n°7.2) indique que la consommation en eau d'agriculture (ConEAg) est la variable force la plus effective dans la catégorie force motrice « D » suivie par l'occupation du sol (OccupS).

Tab n°7.3 :L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables D.

	Pop	REmp	Tourism	OccupS	TxEP	TxEU	EvEPluv	DotEP	PrixE	TaxE	ConEAg	IntégFem	PerteE
Rang	7	2	13	1	8	6	5	3	10	12	4	11	9
Ratio	34,88	905,19	1,31	1034,73	30,46	67,81	165,33	578,14	17,11	3,08	256,93	5,27	18,53
Rang	<u>9</u>	<u>4</u>	<u>13</u>	<u>2</u>	<u>8</u>	<u>6</u>	<u>3</u>	<u>5</u>	<u>7</u>	<u>11</u>	<u>1</u>	<u>12</u>	<u>10</u>
Ratio	<u>1,78</u>	<u>5,32</u>	<u>0,99</u>	<u>10,36</u>	<u>1,95</u>	<u>2,55</u>	<u>8,23</u>	<u>4,51</u>	<u>2,22</u>	<u>1,03</u>	<u>33,50</u>	<u>1,02</u>	<u>1,16</u>

Source : (Sakaa ; 2013).

Tab n° 7.4: Classement des variables Entrées de la force motrice D via les avis des experts.

	Pop	REmp	Tourism	OccupS	TxEP	TxEU	EvEPluv	DotEP	PrixE	TaxE	ConEAg	IntégFem	PerteE
Rang	<u>2</u>	<u>10</u>	<u>12</u>	<u>8</u>	<u>1</u>	<u>5</u>	<u>9</u>	<u>6</u>	<u>7</u>	<u>11</u>	<u>3</u>	<u>13</u>	<u>4</u>

Source : (Sakaa ; 2013).

Les résultats obtenus par le modèle ANN et les avis des experts (Tableau n°7.4) sont semblables seulement dans le septième et le neuvième rang qui sont le prix de l'eau et les taxes sur l'eau, alors qu'ils diffèrent dans le classement des variables restantes.

7.1.2 Les variables de Pression :

Les données de la variable sortie le total des solides dissous (TDS) et celles des variables indépendantes de Pression ont été appliquées dans la création du modèle neuronal.

Les variables indépendantes de Pression sont : Les Déchets Solides Sauvages (DécSauv), La Génération des Eaux Usées Domestiques (EUDom), Les pesticides (Pesticid), Les Engrais Chimiques (EngrCh), Les Engrais Organiques (EngrOrg), Les Stations du Carburant (StCarb), Les Eaux Usées Industrielles (EUInd) et Le Dioxyde de Carbone (CO₂).

Les variables indépendantes représentant la Pression ont été considérées comme variables Entrées, alors que la Sortie est la variable dépendante TDS (le total des solides dissous). Le réseau MLP (Multilayer Perceptron) peut être représenté par la formule suivante : {TDS} = ANN [DécSauv, EUDom, Pesticid, EngrCh, EngrOrg, StCarb, EUInd, CO₂].

Les variables indépendantes de Pression qui nous intéressent à interpréter et comparer sont : Les pesticides (Pesticid), Les Engrais Chimiques (EngrCh), Les Engrais Organiques (EngrOrg).

Les types des réseaux neuronaux utilisés sont les suivantes : le Perceptron Multicouche MLP avec deux algorithmes de rétro-propagation le BFGS Quasi-Newton et le Gradient Conjugué SGC et le RBF. Au cours de l'analyse, plusieurs réseaux ont été testés.

Le meilleur réseau neuronal trouvé est le MLP à trois (3) couches et à neuf (09) nœuds cachés et un minimum de SOSE (Sum Of Square Error) de 0,02814 par rapport aux autres types des RNA.

Tab n° 7.5 : La SOSE pour les divers ANN des variables P.

ANN	Architecture	SOSE
RBF	8-10-1	0.0385
MLP (CG 40)	8-12-1	0.0326
MLP (BFGS 105)	8-9-1	0,02814

Source : (Sakaa ; 2013).

Le modèle a une très bonne performance dans la phase d'apprentissage avec un écart-type de 192,04, et la SOSE des trois phases (l'apprentissage, la validation et le test) est petite et indique que les données des variables appartenant à la même population (Tableau n°7.6).

En plus, le coefficient de corrélation est supérieur à 95% pour la phase d'apprentissage, de validation et de test, ce qui montre un excellent accord entre le total des solides dissous (TDS) observé et simulé.

Tab n°7.6 : Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (TDS).

	Training	Vérification	Testing
Moyenne	1144,65	1170,70	1008,36
Écart-type	358,24	192,04	406,21
SOSE	0,0037	0,02814	0,00735
Corrélation	0,9600	0,9871	0,9545

Source : (Sakaa ; 2013).

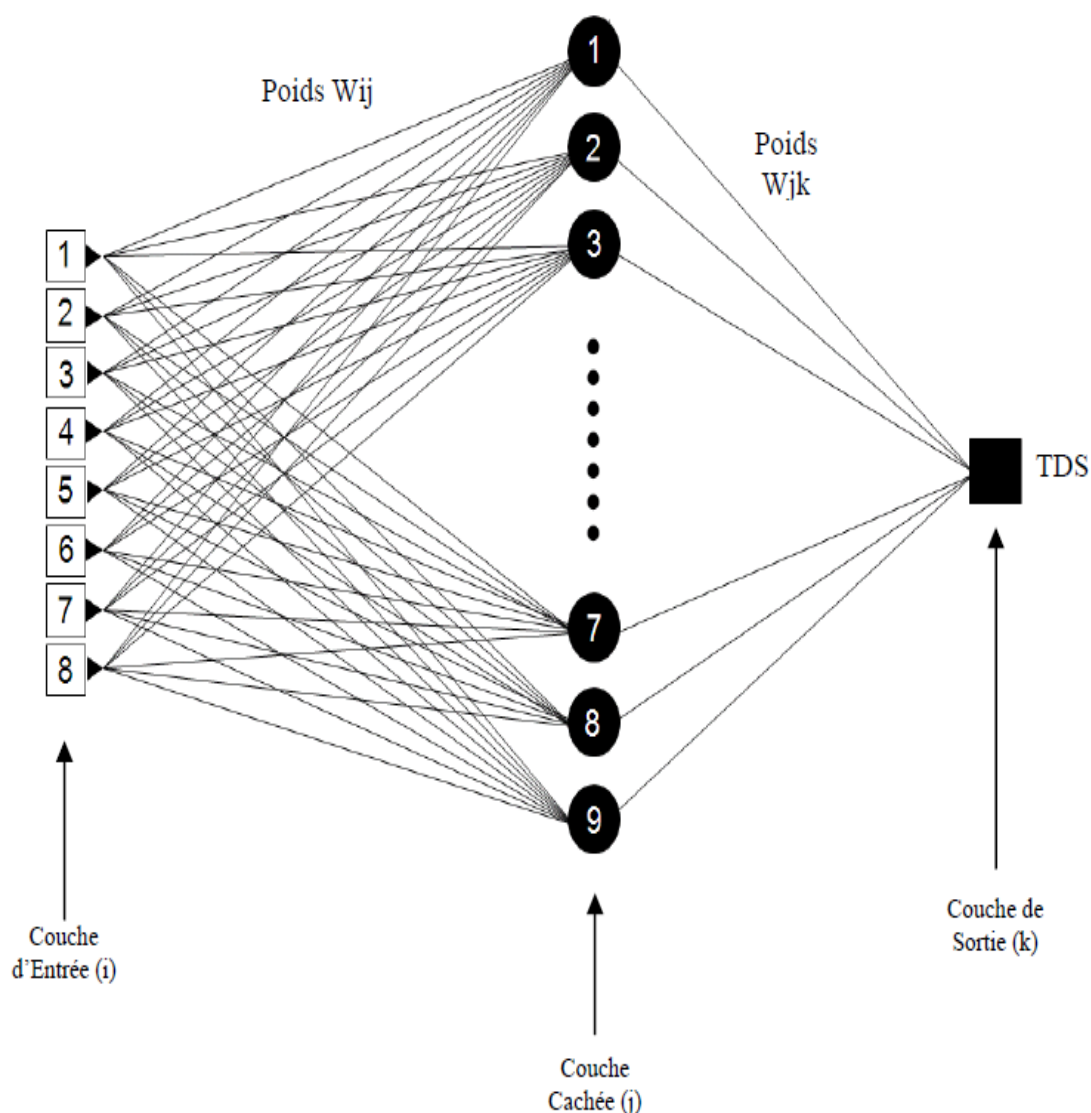


Fig n°7.3: Le réseau MLP à trois couches pour les variables de Pression.

- 3: Les pesticides (tonne.an-1)
- 4: Les Engrais Chimiques (tonne.an-1)
- 5: Les Engrais Organiques (tonne.an-1)

Tab n° 7.7 : L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables P.

	DécSauv	EUDom	Pesticid	EngrCh	EngrOrg	StCarb	EUInd	CO ₂
Rang	1	3	7	4	6	8	2	5
Ratio	10,511	5,320	2,866	5,078	3,867	1,088	6,512	4,294
Rang	3	1	6	4	7	8	2	5
Ratio	1,897	2,213	1,059	1,771	1,017	0,181	1,996	1,067

Source : (Sakaa ; 2013).

L'analyse de la sensibilité de l'ANN pour les variables indépendantes de Pression dans les deux phases de training et de vérification (Tableau n°7.7) indique que la génération des engrais chimiques (EngrCh), les pesticides (Pesticid) sont classées 4^{ème}, 6^{ème}, successivement comme les variables sources de pollution pressantes sur la qualité de l'eau dans la catégorie de Pression suivie par les engrais organiques (EngrOrg).

Tab n°7.8 : Classement des variables Entrées de Pression via les avis des experts.

	DécSauv	EUDom	Pesticid	EngrCh	EngrOrg	StCarb	EUInd	CO2
Rang	3	2	7	5	8	6	1	4

Source : (Sakaa ; 2013).

Les résultats obtenus par le modèle ANN et les avis des experts (Tableau n°7.8) sont semblables seulement dans le quatrième, le huitième, le deuxième et le cinquième rang, alors qu'ils sont très peu différents dans le classement des variables restantes.

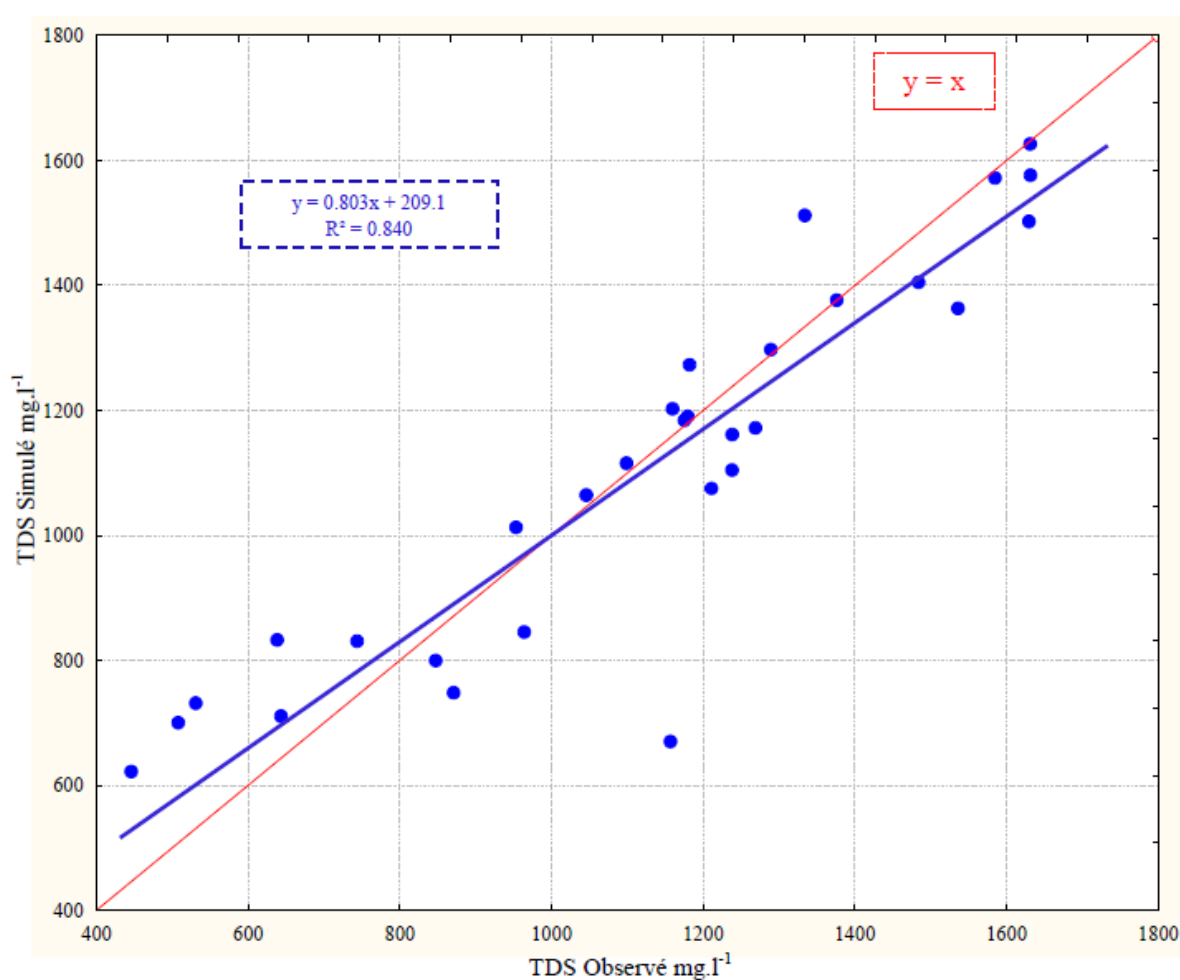


Fig n°7.4 : Le TDS observé en fonction du TDS simulé.

7.1.3 Les variables de l'État de la Qualité de l'Eau (State) :

La variable dépendante le total des solides dissous (TDS) et les variables indépendantes de l'état de la qualité de l'eau de surface (State) ont été utilisées dans la création d'un modèle de réseau de neurone. Les variables indépendantes de l'état de la qualité de l'eau de surface (catégorie S) sont : les Nitrates (NO_3^-), les Chlorures (Cl^-), le Sodium (Na^+), le Calcium (Ca^{2+}), le Magnésium (Mg^{2+}), le Potassium (K^+), les Sulfates (SO_4^{2-}), les Bicarbonates (HCO_3^-), la Demande Biochimique en Oxygène (DBO_5), la Demande Chimique en Oxygène (DCO), la Conductivité Électrique (CE), la Température (T°) et le potentiel en Hydrogène (pH).

Les variables indépendantes représentant l'état de la qualité de l'eau de surface (S) ont été considérées comme variables Entrées, alors que la Sortie est la variable dépendante TDS (le total des solides dissous).

Le réseau MLP (Multilayer Perceptron) peut être représenté par la formule suivante :
 $\{\text{TDS}\} = \text{ANN} [\text{NO}_3^-, \text{Cl}^-, \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{K}^+, \text{SO}_4^{2-}, \text{HCO}_3^-, \text{DBO}_5, \text{DCO}, \text{CE}, T^\circ, \text{pH}]$.

Tab n° 7.9 : La SOSE pour les divers ANN des variables S.

ANN	Architecture	SOSE
RBF	13-8-1	0,758
MLP (CG 78)	13-14-1	0,430
MLP (BFGS 85)	13-10-1	0,3972

Source : (Sakaa ; 2013).

Les types des réseaux neuronaux utilisés sont les suivantes : le Perceptron Multicouche MLP avec deux algorithmes de rétro-propagation le BFGS Quasi-Newton et le Gradient Conjugué SGC et le RBF. Au cours de l'analyse, plusieurs réseaux ont été testés. Le meilleur réseau neuronal trouvé est le MLP à trois (3) couches avec dix (10) nœuds cachés et un minimum de SOSE (Sum Of Square Error) de 0,3972 par rapport aux autres types des RNA (Tableau n°7.9).

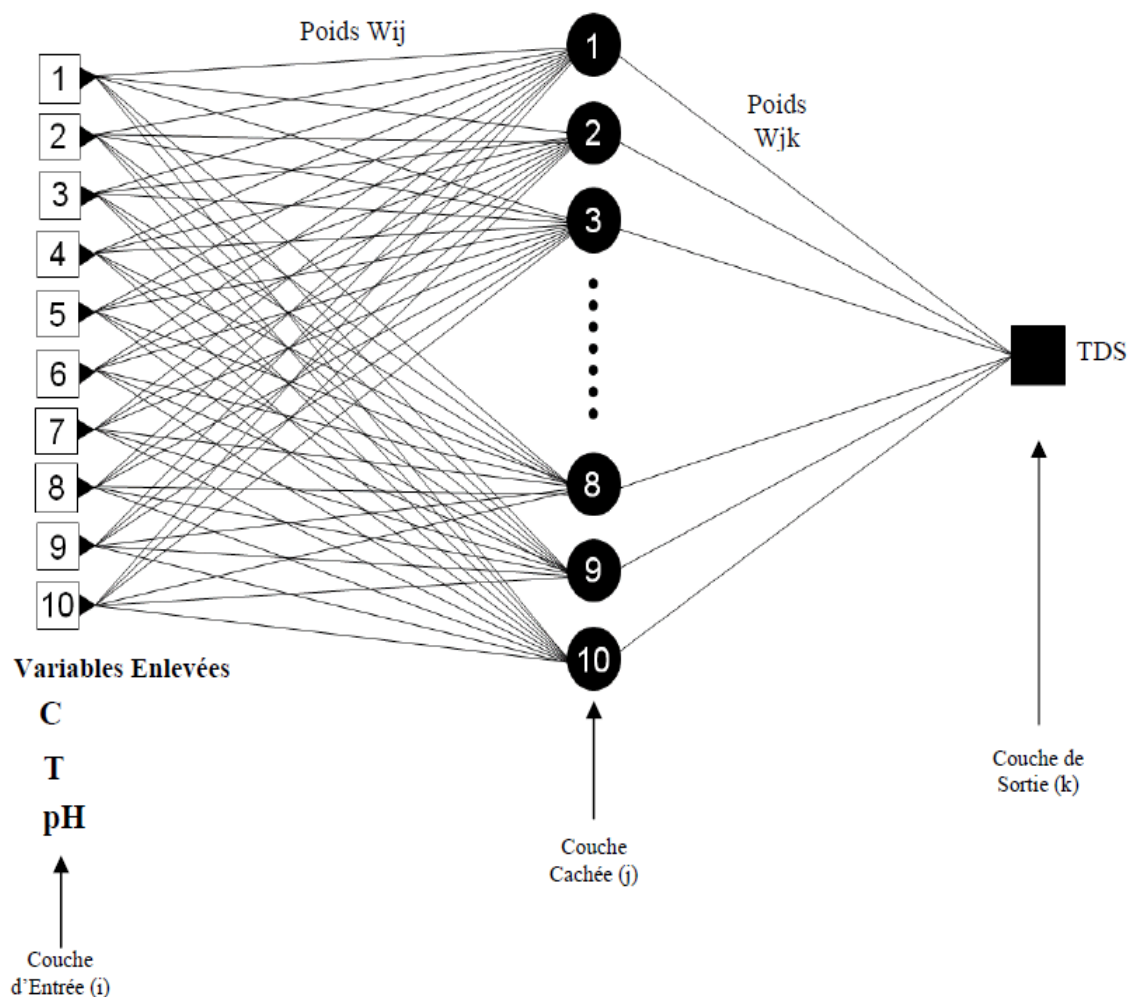
Tab n°7.10: Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (TDS) pour la catégorie S.

	Training	Vérification	Testing
Moyenne	984,26	1059,65	1305,90
Écart-type	410,23	396,42	241,26
SOSE	0,295	0,3972	0,1647
Corrélation	0,996	0,971	0,962

Source : (Sakaa ; 2013).

Le modèle a une très bonne performance dans la phase d'apprentissage avec un écart-type de 396,42 et la SOSE des trois phases (l'apprentissage, la validation et le test) est petite et

indique que les données des variables appartenant à la même population (Tableau n°7.10). En plus, le coefficient de corrélation est supérieur à 96% pour la phase d'apprentissage, de validation et de test, ce qui montre un excellent accord entre le total des solides dissous (TDS) observé et simulé.



Fig^o7.5 : Le réseau MLP à trois couches pour les variables de la qualité de l'eau (S).

Légende:

TDS: le Total des Solides Dissous (mg.l-1)

1: Les Nitrates (NO_3^-) en mg.l-1

2: Les Chlorures (Cl^-) en mg.l-1

3: Le Sodium (Na^+) en mg.l-1

4: Le Calcium (Ca^{2+}) en mg.l-1

5: Le Magnésium (Mg^{2+}) en mg.l-1

6: Le Potassium (K^+) en mg.l-1

7: Les Sulfates (SO_4^{2-}) en mg.l-1

8: Les Bicarbonates (HCO_3^-) en mg.l-1

9: Demande Biochimique en Oxygène (DBO_5) en mg.l-1

10: Demande Chimique en Oxygène (DCO) en mg.l-1

Tab n° 7.11:L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables S.

	NO_3^-	Cl^-	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	SO_4^{2-}	HCO_3^-	DBO_5	DCO
Ratio	2,19	4,26	3,67	1,703	1,718	1,135	1,895	1,138	1,99	1,54
Rang	3	1	2	7	6	10	5	9	4	8
Ratio	1,092	1,298	0,997	0,941	1,006	0,978	0,882	0,856	0,995	0,712
Rang	2	1	5	7	3	6	8	9	4	10

Source : (Sakaa ; 2013).

L'analyse de la sensibilité de l'ANN aux paramètres de la qualité de l'eau de surface dans la phase de vérification (Tableau n°7.11) indique que les Chlorures (Cl^-) et les Nitrates NO_3^- sont les deux principaux paramètres qui influencent sur la qualité des eaux de surface, et puis ils sont suivis par le Magnésium (Mg^{2+}), la DBO_5 , le Sodium (Na^+), le Potassium (K^+), le Calcium (Ca^{2+}), les Sulfates (SO_4^{2-}), les Bicarbonates (HCO_3^-) et la DCO. Le modèle ANN a enlevé trois (03) variables d'Entrée en raison de leur faible sensibilité, ces variables sont : la Conductivité Électrique (CE), la Température (T°) et le potentiel en Hydrogène (pH).

Tab n°7.12 : Classement des variables Entrées de la catégorie S via les avis des experts.

	NO_3^-	Cl^-	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	SO_4^{2-}	HCO_3^-	DBO_5	DCO
Rang	1	2	5	4	8	6	9	10	3	7

Source : (Sakaa ; 2013).

Les résultats obtenus par le modèle ANN et les avis des experts (Tableau n°7.12) sont semblables presque dans tous les paramètres, à part les cas : du Calcium, du Magnésium et la demande chimique en oxygène.

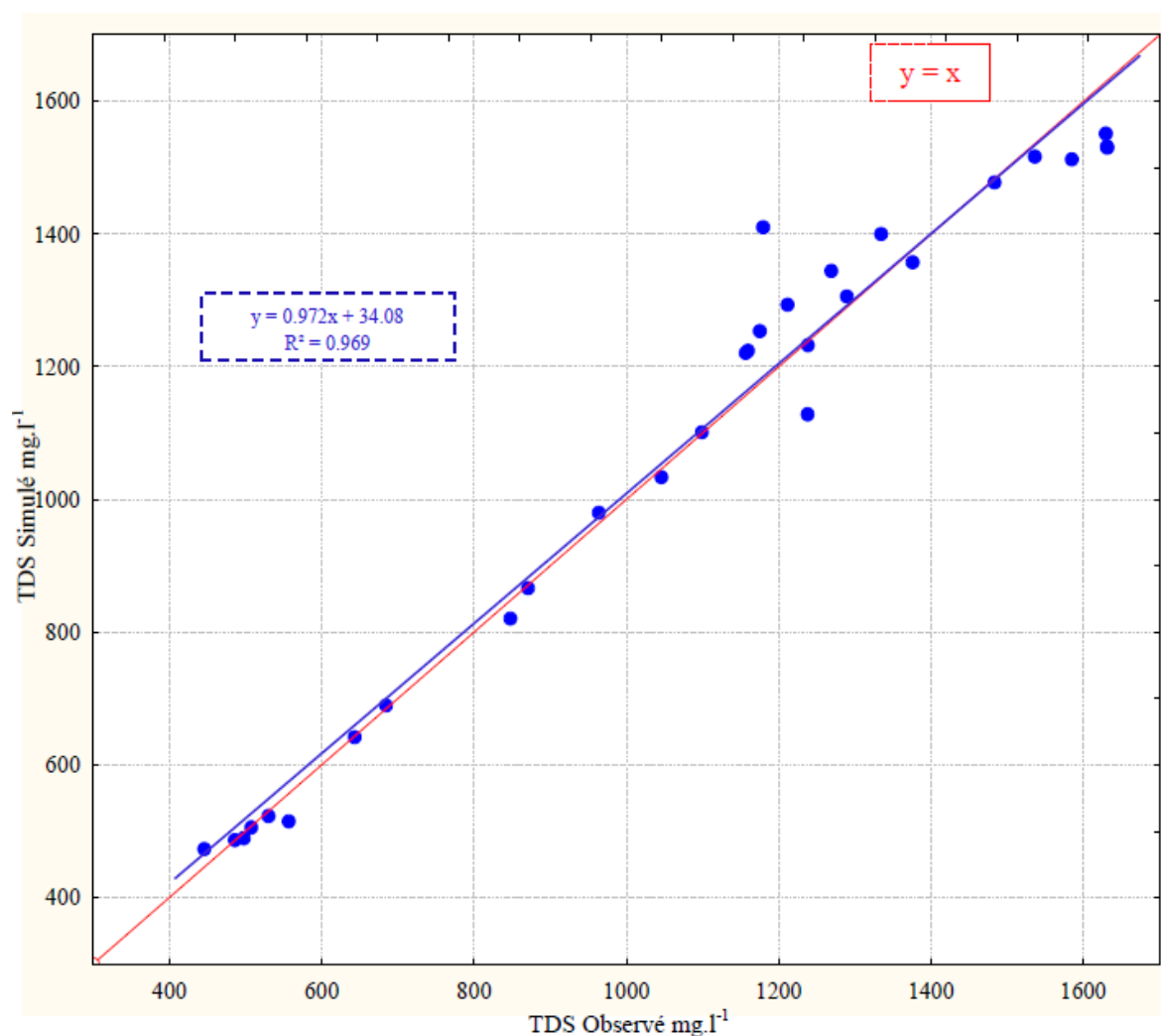


Fig n°7.6:Le TDS observé en fonction du TDS simulé.

7.1.4 Les variables d'Impact :

Les données de la variable dépendante mobilisation de la ressource en eau (MRE) et celles des variables indépendantes d'impact ont été appliquées dans la création du modèle neuronal. Les variables indépendantes d'Impact sont : les maladies à transmission hydrique (MaladTrHy), la Perte de Productivité Agricole (PertePAg) et la Perte des Zones Humides (PerteZnHu). Les variables indépendantes représentant la catégorie d'Impact ont été considérées comme variables Entrées, alors que la Sortie est la variable dépendante mobilisation de la ressource en eau (MRE). Le réseau MLP (Multilayer Perceptron) peut être représenté par la formule suivante :

$$\{MRE\} = ANN [MaladTrHy, PertePAg, PerteZnHu].$$

Les variables indépendantes d'impact qui nous intéressent à interpréter et comparer sont : la Perte de Productivité Agricole (PertePAg) et la Perte des Zones Humides (PerteZnHu).

Les types des réseaux neuronaux utilisés sont les suivantes : le Perceptron Multicouche MLP avec deux algorithmes de rétro-propagation (BFGS Quasi-Newton et le Gradient Conjugué SGC) et le RBF. Au cours de l'analyse, plusieurs réseaux ont été testés.

Tab n°7.13 : La SOSE pour les divers ANN des variables d'Impact.

ANN	Architecture	SOSE
RBF	3-5-1	0.9226
MLP (CG 90)	3-6-1	0.6133
MLP (BFGS 68)	3-8-1	0,5831

Source : (Sakaa; 2013).

Le meilleur réseau neuronal trouvé est le MLP à trois (3) couches avec huit (08) nœuds cachés et un minimum de SOSE (Sum Of Square Error) de 0,5831 par rapport aux autres types des RNA (Tab n°7.13).

La performance du modèle est bonne dans la phase d'apprentissage avec un écart-type de 365,50 et la SOSE des trois phases (l'apprentissage, la validation et le test) est petite et indique que les données des variables appartenant à la même population (Tableau n°7.14). En plus, le coefficient de corrélation est supérieur à 85% pour la phase d'apprentissage, de validation et de test, ce qui montre un accord assez bon entre le total des solides dissous (TDS) observé et simulé.

Tab n°7.14: Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (MRE) pour la catégorie I.

	Training	Vérification	Testing
Moyenne	1111,4	1246,0	1071,0
Écart-type	356,5	289,6	380,0
SOSE	0,4515	0,5831	0,2561
Corrélation	0,852	0,980	0,910

Source : (Sakaa; 2013).

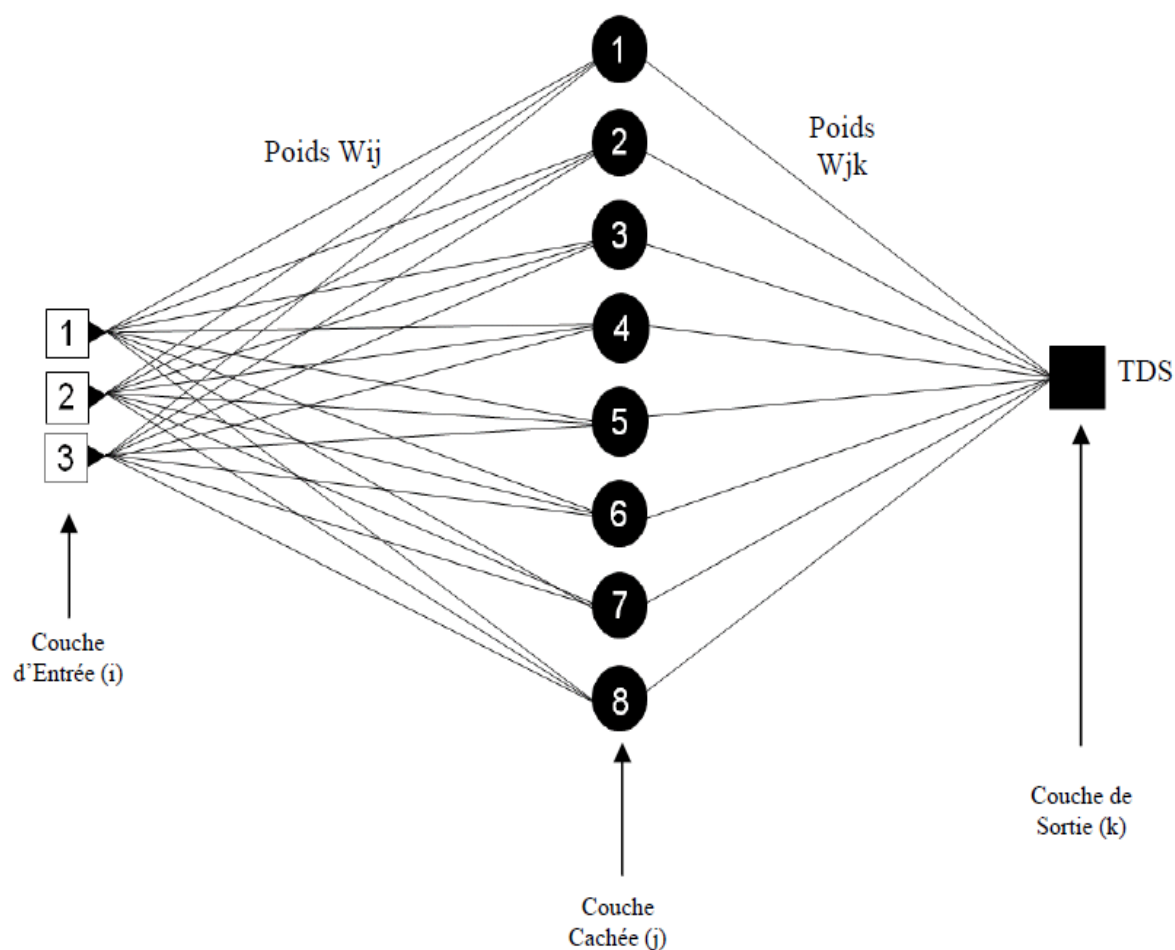


Fig n° 7.7 : Le réseau MLP à trois couches pour les variables d'Impact (I).

Légende:

- 2: La Perte de Productivité Agricole (PertePAg).
- 3: La Perte des Zones Humides (PerteZnHu).

L'analyse de la sensibilité du modèle neuronal aux variables d'Impact dans la phase de vérification (validation) indique que la perte de productivité agricole (PertePAg) est un variable d'impact influencé par le changement de l'état qualitatif et quantitatif des ressources en eau suivie par la perte des zones humides (PerteZnHu).

Tab n° 7.15 : L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables I.

	MaladTrHy	PertePAg	PerteZnHu
Ratio	1,4218	1,4814	0,9956
Rang	2	1	3
Ratio	0,9581	0,9127	0,7953
Rang	1	2	3

Source : (Sakaa ; 2013).

Les résultats obtenus par le modèle ANN et les avis des experts (Tableau n° 7.16) sont semblables.

Tab n°7.16: Classement des variables Entrées de la catégorie I via les avis des experts.

	MaladTrHy	PertePAg	PerteZnHu
Rang	1	2	3

Source : (Sakaa ; 2013).

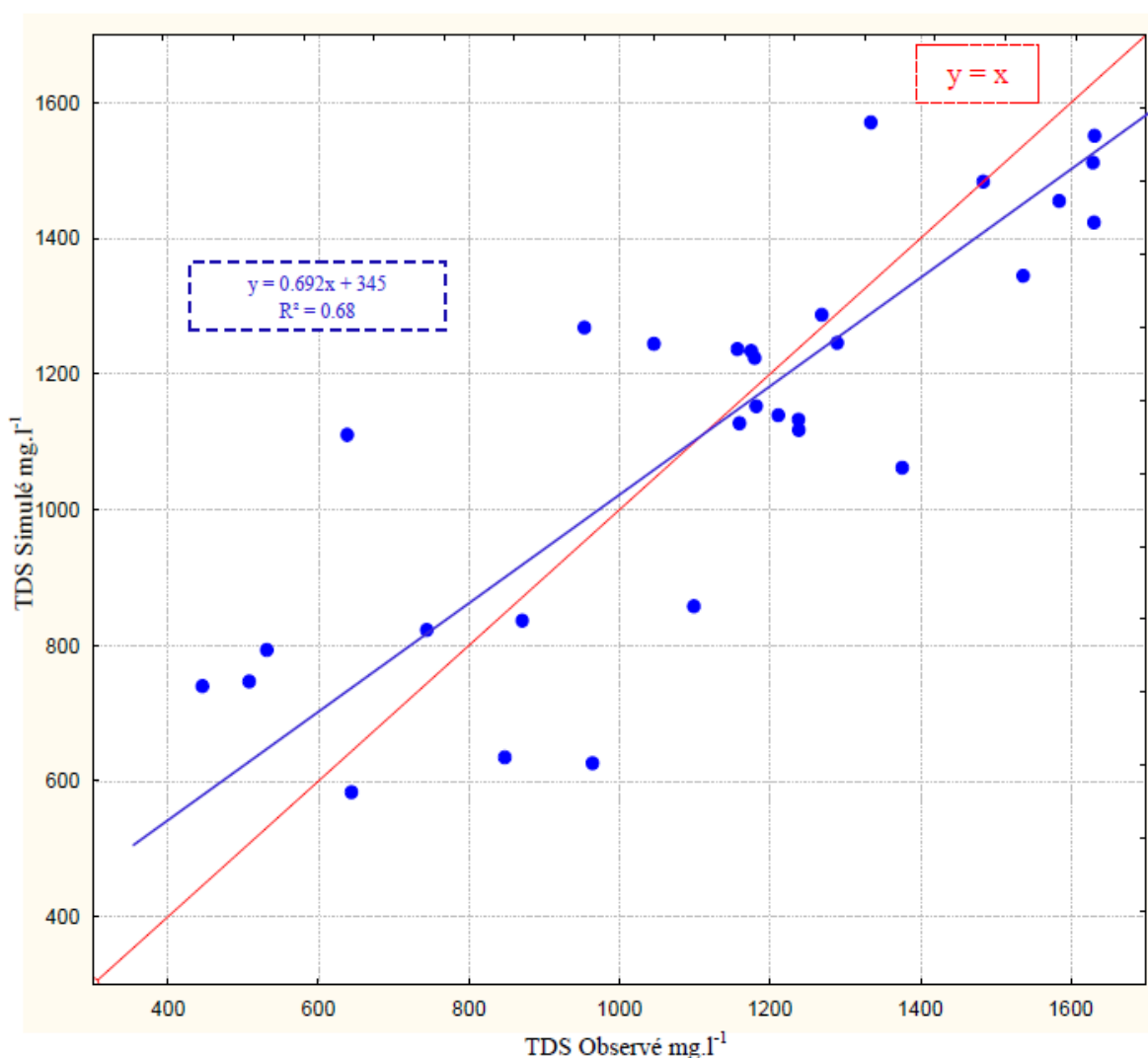


Fig n° 7.8: Le TDS observé en fonction du TDS simulé.

7.1.5 Les variables de Réponse :

Les données de la variable dépendante mobilisation de la ressource en eau (MRE) et celles des variables indépendantes de Réponse ont été appliquées dans la création du modèle neuronal RNA. Les variables indépendantes de la catégorie R sont : le stockage des eaux pluviales (StoEPluv), l'importation de l'eau (ImportE), l'efficacité dans l'eau d'irrigation

(EfE Irrig), l'efficacité des systèmes d'information (EfSyInf), la sensibilisation sur l'eau (SensibE), le dessalement de l'eau de Mer (DEM) et l'efficacité de l'alimentation en eau potable (EffAIEP). Les variables indépendantes représentant la catégorie de Réponse ont été considérées comme variables Entrées, alors que la Sortie est la variable dépendante mobilisation de la ressource en eau. Le réseau MLP peut être représenté par la formule suivante :

$$\{MRE\} = ANN [StoEPluv, ImportE, EfE Irrig, EfSyInf, SensibE, DEM, EffAIEP].$$

Les variables indépendantes d'impact qui nous intéressent à interpréter et comparer pour le secteur agricole sont : le stockage des eaux pluviales (StoEPluv), l'importation de l'eau (ImportE), l'efficacité dans l'eau d'irrigation (EfE Irrig), l'efficacité des systèmes d'information (EfSyInf), la sensibilisation sur l'eau (SensibE).

Les types des réseaux neuronaux utilisés sont les suivantes : le Perceptron Multicouche MLP avec deux algorithmes de rétro-propagation (BFGS Quasi-Newton et le Gradient Conjugué SGC) et le RBF. Au cours de l'analyse, plusieurs réseaux ont été testés. Le meilleur ANN trouvé est le MLP à trois (3) couches et à seize (16) nœuds cachés et un minimum de SOSE (Sum Of Square Error) de 0.014325 par rapport aux autres types d'ANN (Tableau n°7.17).

Tab n°7.17 : La SOSE pour les divers ANN des variables de Réponse.

ANN	Architecture	SOSE
RBF	7-5-1	0,047840
MLP (CG 110)	7-14-1	0,015892
MLP (BFGS 107)	7-16-1	0,014325

Source : (Sakaa ; 2013).

Le modèle a une très bonne performance dans la phase d'apprentissage avec un écart-type de 2,0237, et la SOSE des trois phases (l'apprentissage, la validation et le test) est petite et indique que les données des variables appartenant à la même population (tableau n°7.18). **Tab n°7.18**: Les Paramètres statistiques de Régression de la Sortie (MRE).

	Training	Vérification	Testing
Moyenne	1,665625	3,695714	1,494286
Écart-type	2,023736	3,487257	2,116490
SOSE	0,000318	0,014325	0,004663
Corrélation	0,997379	0,960188	0,970863

Source : (Sakaa ; 2013).

En outre, le coefficient de corrélation est supérieur à 96% pour la phase d'apprentissage, de validation et de test, ce qui montre un excellent accord entre la Mobilisation de la Ressource en Eau (MRE) observée et simulée.

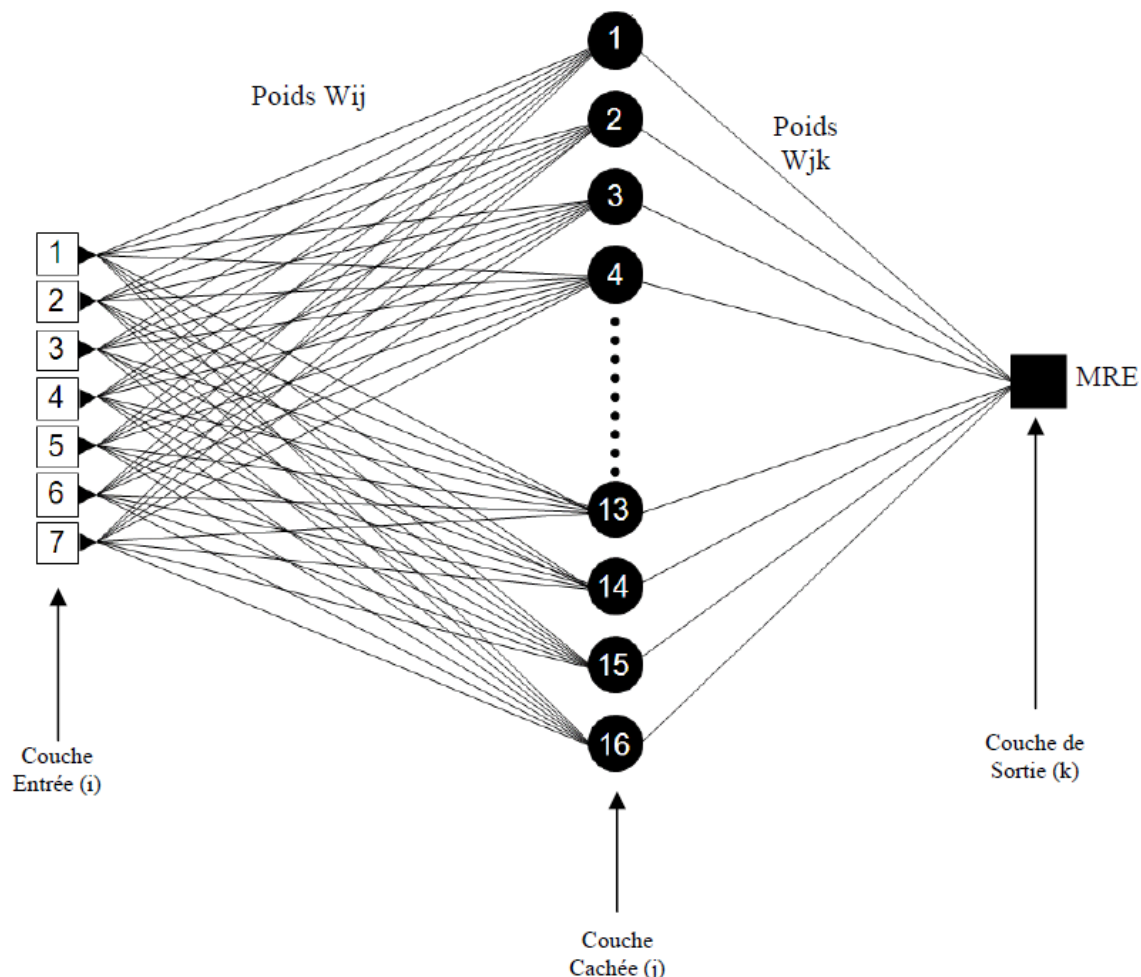


Fig n°7.9:Le réseau MLP à trois couches pour les variables de la catégorie R.

Légende:

- 1: Le Stockage des Eaux Pluviales (StoEPluv)
- 2: L'Importation de l'Eau (ImportE)
- 3: L'Efficacité dans l'Eau d'Irrigation (EfEIrrig)
- 4: L'Efficacité des Systèmes d'Information (EfSyInf)
- 5: La Sensibilisation sur l'Eau (SensibE)

Tab n° 7.19:L'Analyse de la Sensibilité de l'ANN des variables R.

	StoEPluv	ImportE	EfEIrrig	EffAlEP	EfSyInf	SensibE	DEM
Rang	4	1	5	2	3	7	6
Ratio	5,492940	123,2325	4,049400	12,13247	10,41647	2,454929	3,726960
Rang	6	1	2	4	5	3	7
Ratio	1,002058	9,983079	1,355602	1,108712	1,073650	1,285875	1,001495

Source : (Sakaa ; 2013).

L'analyse de la sensibilité de l'ANN pour les variables indépendantes de réponse dans les deux phases de training et de vérification (Tableau n°7.19) indique que l'importation de l'eau (ImportE) classé premièrement est l'intervention la plus influente dans la catégorie de Réponse sur la MRE suivie par l'efficacité dans l'eau d'irrigation (EfIrrig), en quatrième ordre le stockage des eaux pluviales (StoEPluv), l'efficacité dans le système d'information (EfSyInf), en sixième disposition la sensibilisation sur l'eau (SensibE),

Tab n°7.20 : Classement des variables Entrées de la catégorie R via les avis des experts.

	StoEPluv	ImportE	EfIrrig	EffAIEP	EfSyInf	SensibE	DEM
Rang	4	1	2	3	5	6	7

Source : (Sakaa ; 2013).

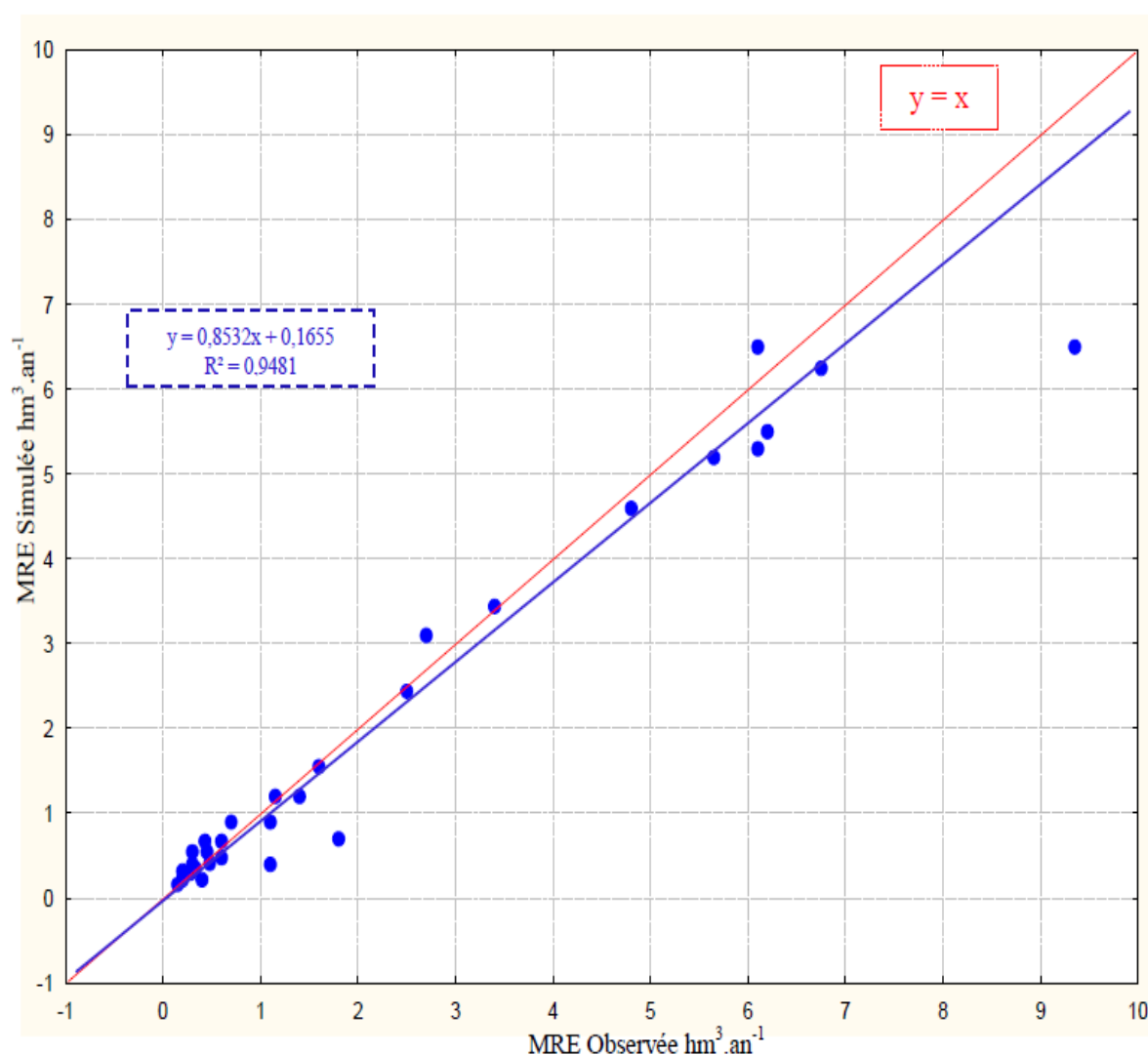


Fig n°7.10: La MRE observée en fonction de la MRE simulée.

7.2 Les Matrices de Corrélation :

L'analyse de la matrice de corrélation a été faite pour étudier la direction et la liaison entre deux variables dans la même catégorie, les coefficients indiquant l'influence que les variables ont les unes sur les autres. Il est nécessaire de transformer les variables qui se caractérisent par une distribution non normale (Figure n°8.11). Par exemple, la variable de l'occupation du sol montrée dans la figure n°8.11 est transformée en $\log [\text{OccupS} (\%)]$ présentant une distribution normale (Figure n°8.12). L'analyse de la matrice de corrélation est effectuée pour la catégorie des forces motrices, de pression, de l'état de la qualité de l'eau et les variables de la réponse.

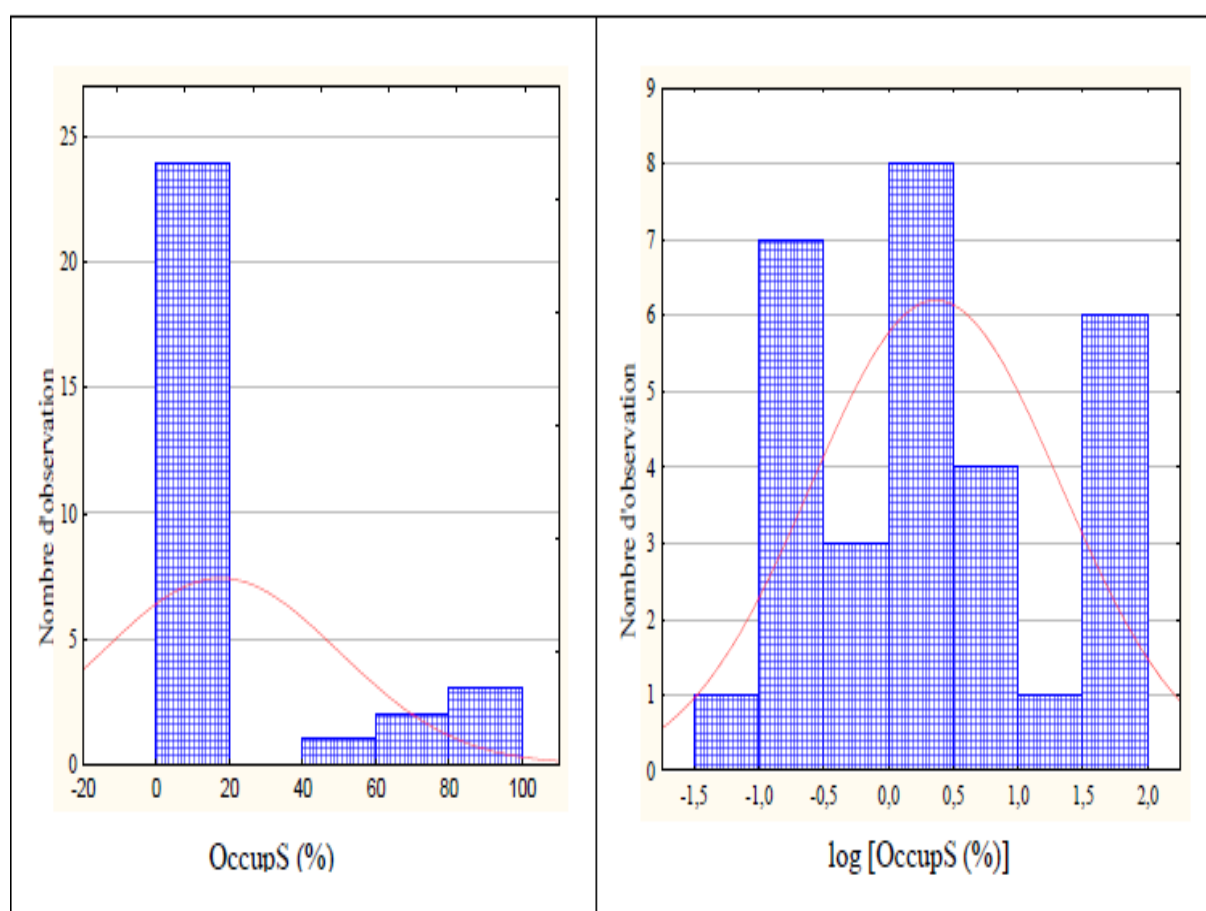


Fig n° 7.11:Histogramme de l'Occupation du Sol **Fig n°7.12 :** Histogramme log (Occupation du Sol)

7.2.1 Les variables forces motrices D :

Les variables indépendantes de la force motrice analysées sont : l'occupation du sol, l'évacuation des eaux pluviales, le prix de l'eau, la taxation sur l'eau, la consommation de l'eau d'agriculture, les pertes d'eau et la variable dépendante la mobilisation de la ressource en eau MRE.

Le tableau 7.21 montre que la variable log[population] a une corrélation linéaire significative avec : log[occupation du sol], le taux de raccordement au réseau de l'eau, l'évacuation des eaux pluviales ; le log[intégration des femmes] et la mobilisation de la ressource en eau MRE.

Les revenus par employant est corrélé avec : log[occupation du sol], le taux de raccordement au réseau de l'eau potable, l'évacuation des eaux pluviales et la dotation journalière en eau potable.

La variable log[tourisme] est corrélé avec : log[occupation du sol] et la dotation journalière en eau potable.

Le log[occupation du sol] a une relation linéaire avec : le taux de raccordement au réseau de l'eau potable, le taux de raccordement au réseau des eaux usées, l'évacuation des eaux pluviales, et la dotation journalière en eau potable et le log[intégration des femmes].

La variable du taux de raccordement au réseau de l'eau potable est corrélé positivement avec : le taux de raccordement au réseau des eaux usées, la dotation journalière en eau potable et le log [intégration des femmes].

La variable du taux de raccordement au réseau des eaux usées a une relation linéaire croissante avec : la dotation journalière en eau potable et le log [intégration des femmes]. L'évacuation des eaux pluviales est corrélée positivement avec la dotation journalière en eau potable.

Le prix de l'eau a une relation croissante avec la dotation journalière en eau potable et la taxation sur l'eau.

L'augmentation de la population, de la dotation journalière de l'eau potable, de la consommation en eau d'agriculture et le taux de raccordement au réseau de l'eau potable sont des facteurs très importants qui influent sur la mobilisation de la ressource en eau.

Tab n°7.21 : La matrice de corrélation pour les variables forces motrices.

	log Pop	REmp	log Tourism	log Occup S	TxEp	TxEU	EvEPI uv	DotEP	PrixE	TaxE	log ConEAg	logIntég Fem	Perte	MRE
log Pop	1,000													
REmp	0,224	1,000												
log Tourism	0,412	0,312	1,000											
log OccupS	0,682	0,699	0,682	1,000										
TxEp	0,697	0,646	0,348	0,785	1,000									
TxEU	0,708	0,445	0,404	0,679	0,732	1,000								
EvEPluv	0,645	0,681	0,595	0,921	0,643	0,620	1,000							
DotEP	0,521	0,701	0,712	0,817	0,724	0,673	0,857	1,000						
PrixE	0,245	0,555	0,420	0,595	0,458	0,477	0,633	0,699	1,000					
TaxE	0,312	0,422	0,212	0,453	0,474	0,445	0,584	0,569	0,794	1,000				
log ConEAg	0,086	-0,286	-0,520	-0,441	-0,140	-0,233	-0,515	-0,310	-0,566	-0,288	1,000			
Log IntégFem	0,764	0,500	0,448	0,777	0,698	0,763	0,619	0,679	0,393	0,358	-0,086	1,000		
PerteE	-0,088	-0,050	-0,185	-0,061	-0,003	0,117	-0,019	-0,200	0,067	-0,025	0,054	-0,097	1,000	
MRE	0,542	0,269	0,528	0,710	0,419	0,459	0,524	0,239	0,196	0,681	0,681	0,574	-0,120	1,000

7.2.2 Les variables de Pression :

Les variables indépendantes de pression analysées sont : les déchets solides sauvages, la génération des eaux usées domestiques, les pesticides, les engrais chimiques, les engrais organiques, les stations du carburant, les eaux usées industrielles et le dioxyde de carbone. En plus de la variable indépendante TDS (le total des solides dissous).

Le tableau n°7.22. La variable pesticide est corrélée positivement avec les engrais chimiques et organiques.

Tab n°7.22 : La matrice de corrélation pour les variables de Pression.

	log DécSauv	log EUDom	Pesticid	EngrCh	EngrOrg	StCarb	log EUInd	CO2	TDS
log DécSauv	1,000								
log EUDom	0,959	1,000							
Pesticid	0,295	0,224	1,000						
EngrCh	0,301	0,219	0,920	1,000					
EngrOrg	0,329	0,232	0,758	0,772	1,000				
StCarb	0,395	0,456	0,199	0,137	-0,032	1,000			
log EUInd	0,116	0,112	-0,067	-0,072	-0,017	0,268	1,000		
CO2	0,226	0,263	0,097	0,136	0,059	0,691	0,721	1,000	
TDS	0,049	0,130	-0,058	-0,117	0,061	0,361	0,681	0,665	1,000

Source: (Sakaa; 2013).

7.2.3 Les variables de l'état de la qualité de l'eau (State) :

Les variables indépendantes de l'état de la qualité de l'eau analysées sont : les Nitrates (NO_3^-), les Chlorures (Cl^-), le Sodium (Na^+), le Calcium (Ca^{2+}), le Magnésium (Mg^{2+}), le Potassium (K^+), les Sulfates (SO_4^{2-}), les Bicarbonates (HCO_3^-), la Demande Biochimique en Oxygène (DBO_5), la Demande Chimique en Oxygène (DCO) et la variable dépendante TDS.

Le tableau 7.23 présente que le TDS a une relation linéaire croissante avec le log[Sodium], le calcium, le magnésium, les chlorures, les sulfates, les bicarbonates et la demande chimique en oxygène. Le log[Sodium] est corrélé positivement avec le calcium, le potassium et les chlorures. Le calcium est corrélé avec les variables appartenant de

minéralisation, qui sont le magnésium, les sulfates et les bicarbonates (corrélation positive). Le magnésium est corrélé positivement avec le potassium, les nitrates, les sulfates et les bicarbonates. Le potassium est associé qu'avec les chlorures. Alors que les nitrates est associés avec les indicateurs de pollution anthropique qui sont les chlorures, la demande biochimique en oxygène et la demande chimique en oxygène. Cette dernière est corrélée positivement avec les sulfates et les bicarbonates. Et enfin, la demande biochimique en oxygène est associé avec la demande chique en oxygène.

Tab n° 7.23: La matrice de corrélation pour les variables de la qualité de l'eau.

	\log Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	K^+	NO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	DBO_5	DCO	TDS
LogNa⁺	1,000										
Ca⁺	<u>0,865</u>	1,000									
Mg⁺	0,641	<u>0,940</u>	1,000								
K⁺	0,695	0,612	<u>0,753</u>	1,000							
NO₃⁻	0,605	0,644	<u>0,895</u>	0,630	1,000						
Cl⁻	<u>0,927</u>	0,539	0,639	<u>0,764</u>	<u>0,853</u>	1,000					
SO₄²⁻	0,639	0,792	<u>0,805</u>	0,647	0,638	<u>0,725</u>	1,000				
HCO₃⁻	0,660	<u>0,869</u>	<u>0,834</u>	0,568	0,589	<u>0,776</u>	0,626	1,000			
DBO₅	0,561	0,602	0,595	0,403	<u>0,802</u>	0,544	0,679	0,596	1,000		
DCO	0,638	0,587	0,649	0,478	<u>0,867</u>	0,659	<u>0,724</u>	<u>0,726</u>	<u>0,959</u>	1,000	
TDS	<u>0,898</u>	<u>0,980</u>	<u>0,970</u>	0,648	0,592	<u>0,961</u>	<u>0,828</u>	<u>0,882</u>	0,623	<u>0,803</u>	1,000

Source: (Sakaa; 2013).

7.2.4 Les variables d'Impact :

Les variables indépendantes d'impact analysées sont : les maladies à transmission hydrique (MaladTrHy), la Perte de Productivité Agricole (PertePAg), la Perte des Zones Humides (PerteZnHu) et la variable dépendante TDS.

Tab n° 7.24 : La matrice de corrélation pour les variables d'Impact.

	log PertePAg	logPerteZnHu	MaladTrHy	TDS
log PertePAg	1,000			
logPerteZnHu	0,379	1,000		
MaladTrHy	0,554	0,243	1,000	
TDS	0,333	<u>0,695</u>	<u>0,737</u>	1,000

Source: (Sakaa; 2013).

Le tableau 7.24 montre que le total des sels dissous (TDS) a une relation linéaire positive avec le log [de la perte dans la productivité agricole].

7.2.5 Les variables de Réponse :

Les variables indépendantes de Réponse interprétées sont : le stockage des eaux pluviales (StoEPluv), l'importation de l'eau (ImportE), l'efficacité dans l'eau d'irrigation (EfEIrri), l'efficacité des systèmes d'information (EfSyInf), la sensibilisation sur l'eau (SensibE), et la variable dépendante MRE.

Tab n°7.25: La matrice de corrélation pour les variables de Réponse.

	log DEM	log StoEPluv	ImportE	EfEIrri	SensibE	EfSyInf	EffAIEP	MRE
log DEM	1,000							
log	0,045	1,000						
StoEPluv								
ImportE	0,200	<u>0,682</u>	1,000					
EfEIrri	0,041	<u>0,728</u>	-0,009	1,000				
SensibE	-0,142	-0,141	<u>0,685</u>	-0,586	1,000			
EfSyInf	-0,286	0,001	0,249	-0,065	0,191	1,000		
EffAIEP	0,107	0,055	0,918	-0,123	0,496	0,272	1,000	
MRE	<u>0,851</u>	<u>0,745</u>	0,200	0,041	-0,142	<u>0,686</u>	0,107	1,000

Source: (Sakaa; 2013).

Le tableau 7.25 montre que la variable dépendante MRE (mobilisation de la ressource en eau) est corrélée positivement avec le log [du stockage des eaux pluviales] et l'efficacité dans le système d'information. La variable log [du stockage des eaux pluviales] a une relation linéaire positive avec l'importation de l'eau et l'efficacité dans l'eau d'irrigation. La variable de l'importation de l'eau est corrélée avec la sensibilisation sur l'eau.

7.3 L'Analyse en Composantes Principales (ACP) :

L'objectif d'application de l'analyse en composantes principales (ACP) est de réduire le nombre des variables en un petit nombre de dimension (facteurs), de classer les variables et de regrouper les observations (municipalités) ayant des caractéristiques similaires. En outre, les variables enlevées par les réseaux de neurones ont été représentées dans ces facteurs en tant que variables supplémentaires.

L'ACP est effectué pour les variables des cinq catégories du modèle DPSIR (Force motrice D, Pression P, l'état de la qualité de l'eau de surface S, Impact I et de Réponse R).

7.3.1 Les variables forces motrices D :

Les variables indépendantes de la force motrice commentent sont : l'occupation du sol, le taux de raccordement à l'eau potable, l'évacuation des eaux pluviales, le prix de l'eau, la taxation sur l'eau, la consommation de l'eau d'agriculture, les pertes d'eau et la variable dépendante la mobilisation de la ressource en eau MRE.

Tab n° 7.26 : Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie D).

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Pop	0,749	0,413	-0,131
REmp	0,713	-0,062	0,052
Tourism	0,481	-0,261	-0,474
OccupS	<u>0,835</u>	-0,124	-0,277
TxEp	0,811	0,193	0,256
TxEU	<u>0,755</u>	0,015	0,222
EvEPluv	<u>0,917</u>	-0,180	0,074
DotEP	0,888	-0,022	0,007
PrixE	<u>0,757</u>	-0,487	0,161
TaxE	0,637	-0,407	0,210
ConEAg	-0,051	<u>0,876</u>	0,155
IntégFem	<u>0,910</u>	0,254	-0,057

PerteE	-0,114	-0,080	<u>0,836</u>
MRE	0,649	0,634	-0,047

Source : (Sakaa ; 2013).

Le tableau (n°7.26) présente les variances des facteurs et de leurs corrélations avec les variables. Le premier facteur correspond à la plus grande valeur propre (7,113) et représente environ 50,81% de la variance cumulée. C’est le plus corrélé avec les variables: le revenu par employant, l’occupation du sol, l’évacuation des eaux pluviales, le prix de l’eau et de (corrélations positives).

Le deuxième facteur correspondant à la deuxième valeur propre (1,974) qui représente 14,101% de la variance cumulée. Il est en corrélation avec la consommation en eau d’agriculture (corrélation positive).

Le troisième facteur correspondant à la valeur propre 1,240 représentant 8,863% de la variance cumulée. Il est fortement corrélé avec la variable perte de l’eau (corrélation positive).

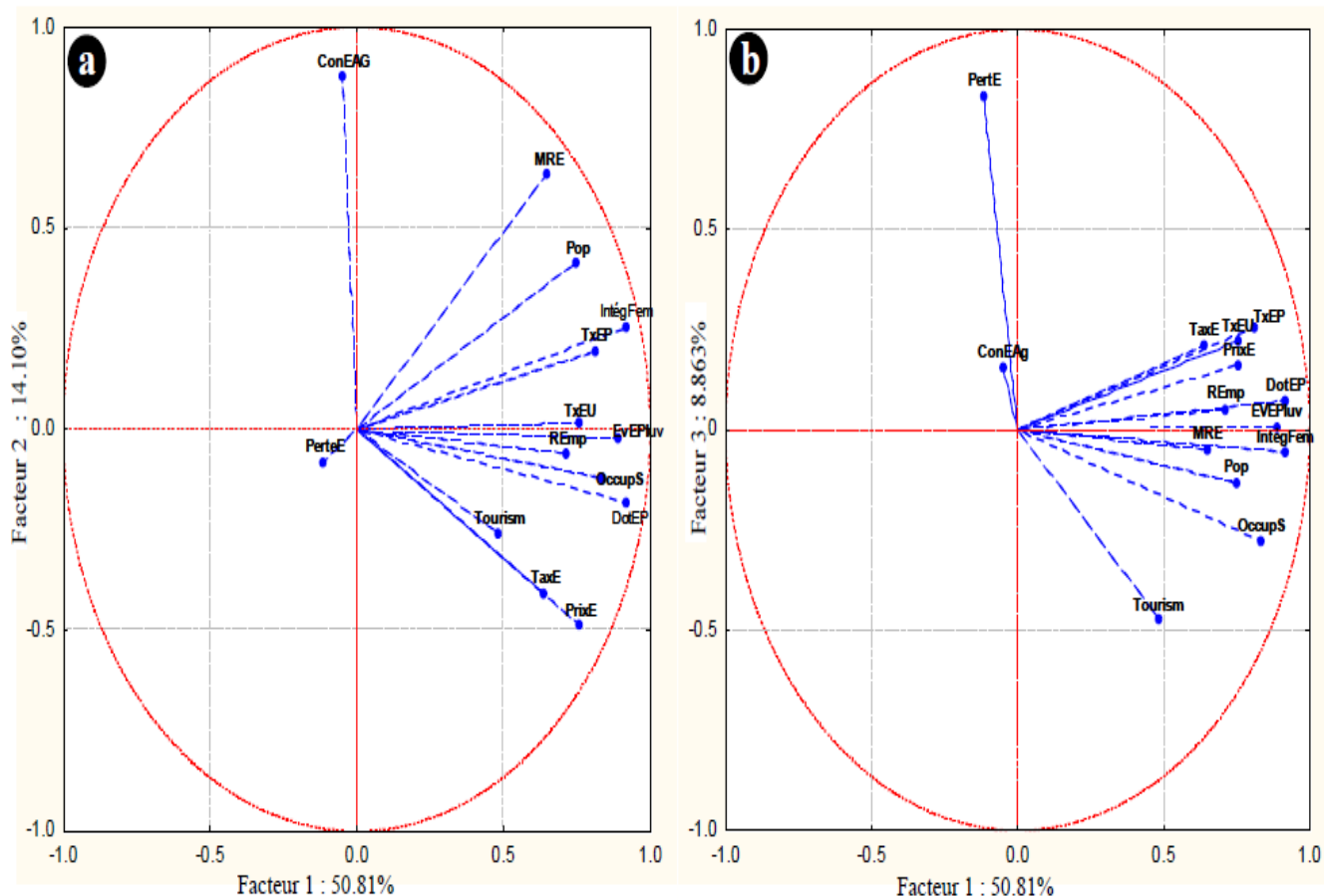


Fig n°7.13a,b: La projection des variables D sur les plans factoriels, a (1x2) et b (1x3).

La figure 7.13a, b représente les coordonnées de ces trois facteurs. Le graphique montre un cercle unité avec des variables qui ont été utilisées dans ce calcul factoriel. Le cercle peut

fournir une indication visuelle d'une façon que chaque variable est représentée par cet ensemble de facteurs. Sur la base des valeurs des coordonnées factorielles des variables dans l'analyse, le premier facteur peut être marqué par les variables: l'évacuation des eaux pluviales. Le second facteur peut être marqué par la consommation en eau d'agriculture et le troisième facteur peut être nommé comme perte de l'eau.

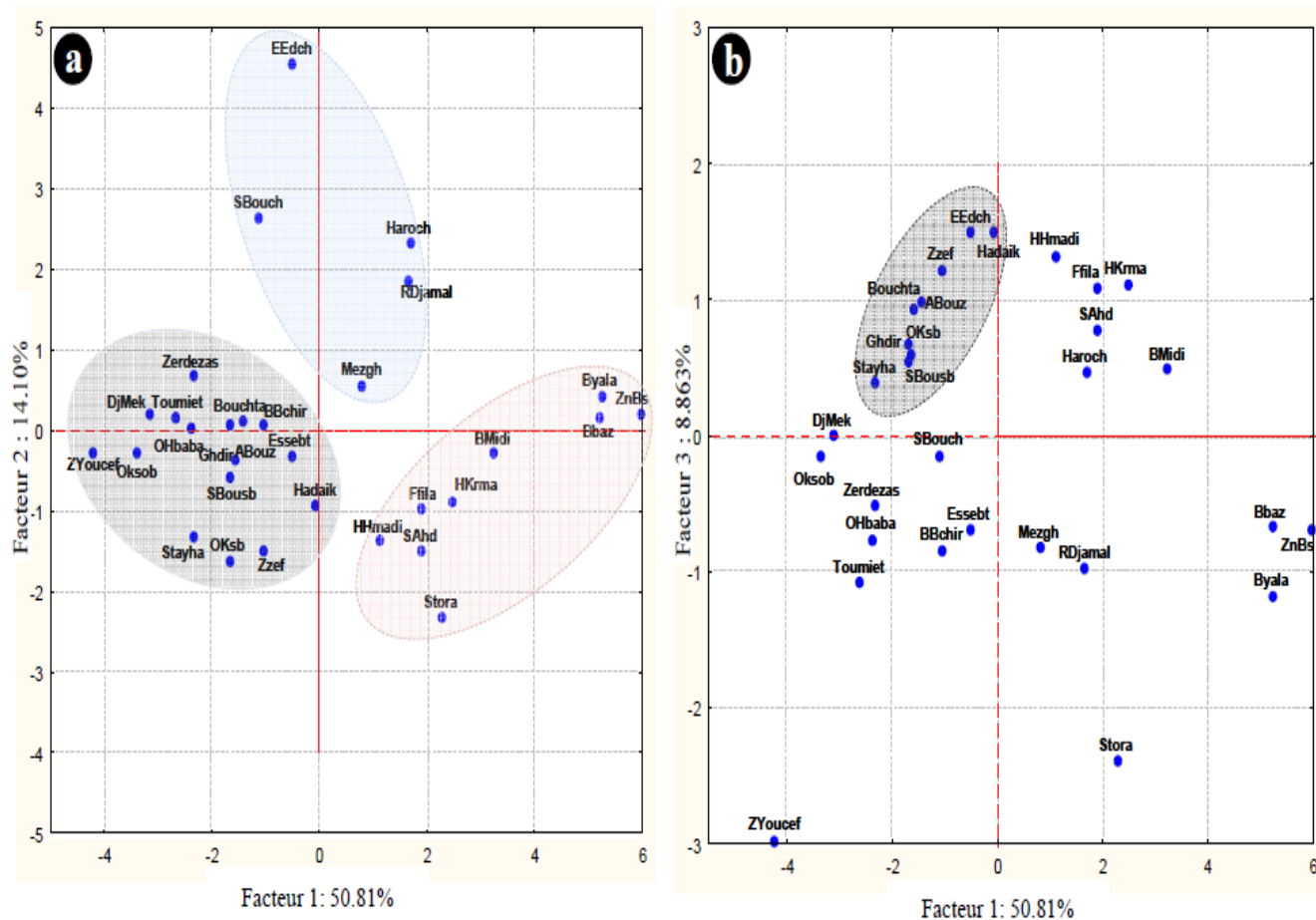


Fig n°7.14a, b: La projection des municipalités sur les plans factoriels, a (1x2) et b (1x3).

La figure 7.14a, b présente la projection des municipalités sur les plans factoriels (1x2) et (1x3). Les municipalités de : Emdjéz Edchich, Salah Bouchaour, Mezghich, Ramdane Djamel et El Harrouch sont analogues en termes de consommation en eau d'agriculture.

7.3.2 Les variables de Pression :

Les variables indépendantes de pression analysées par l'ACP qui nous captivent sont : les pesticides, les engrais chimiques, les engrais organiques. En plus de la variable indépendante TDS (le total des solides dissous).

Tab n°7.27: Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie P).

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
DécSauv	0,501	0,696	0,482
EUDom	0,345	0,740	0,522
Pesticid	<u>0,883</u>	-0,315	-0,175
EngrCh	<u>0,889</u>	-0,331	-0,146
EngrOrg	<u>0,782</u>	-0,410	-0,153
StCarb	0,364	0,592	-0,084
EUInd	-0,268	0,285	-0,692
CO2	0,254	0,515	-0,544
TDS	0,039	0,595	-0,615

Source : (Sakaa ; 2013).

Le tableau 7.27 présente les variances des facteurs et de leurs corrélations avec les variables. Le premier facteur correspond à la plus grande valeur propre (2,823) et représente environ 31,37% de la variance cumulée. C'est le plus corrélé avec les pesticides, les engrais chimiques et organiques (corrélations positives).

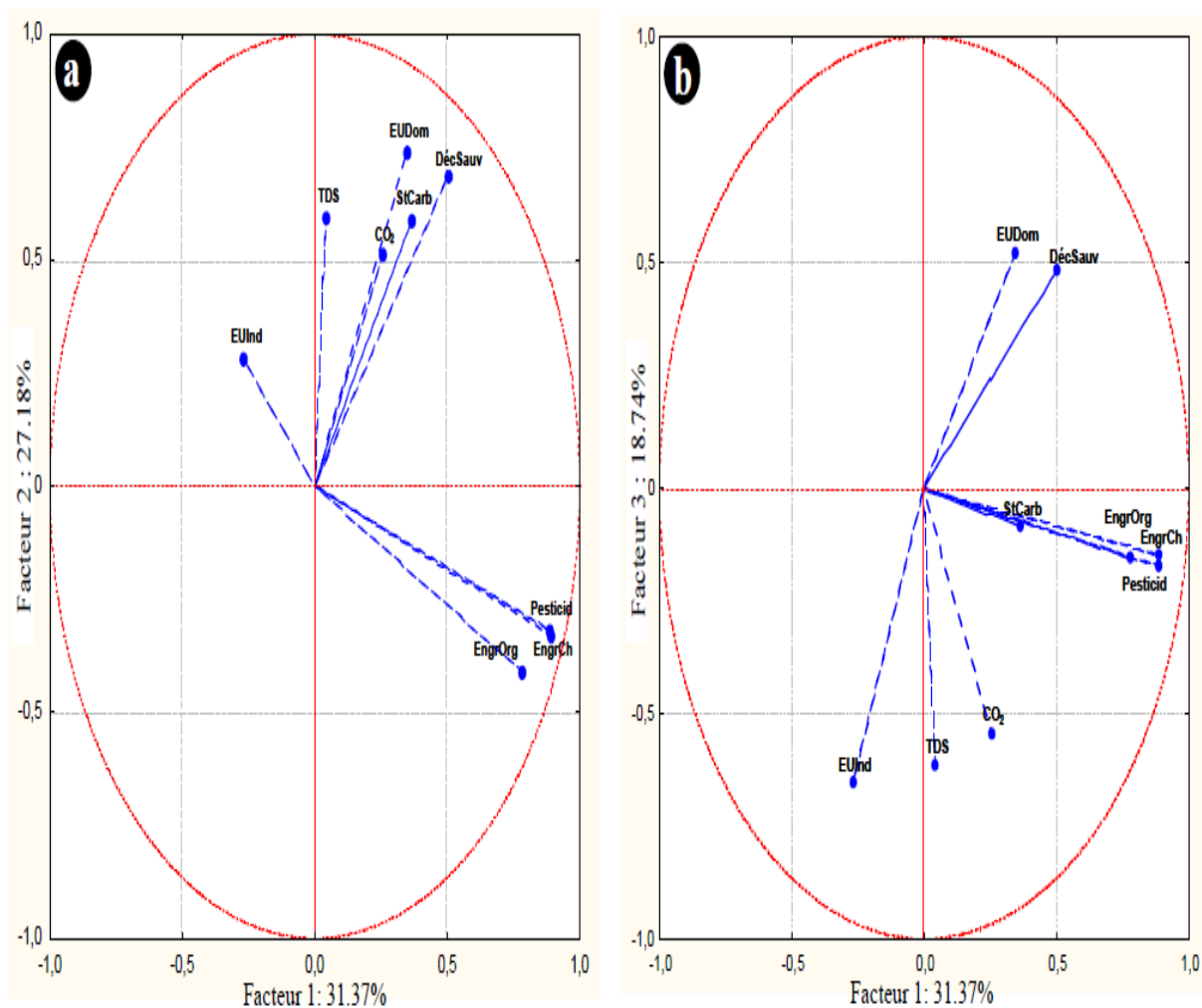


Fig n°7.15a,b: La projection des variables P sur les plans factoriels, a (1x2) et b (1x3).

La figure 8.15a, b représente les coordonnées des trois facteurs. Le graphique montre un cercle unité avec des variables qui ont été utilisées dans ce calcul factoriel. Le cercle peut fournir une indication visuelle d'une façon que chaque variable est représentée par cet ensemble de facteurs. Sur la base des valeurs des coordonnées factorielles des variables dans l'analyse, le premier facteur peut être marqué par des indicateurs de pollution d'origine agricole (les pesticides, les engrais chimiques et les engrais organiques).

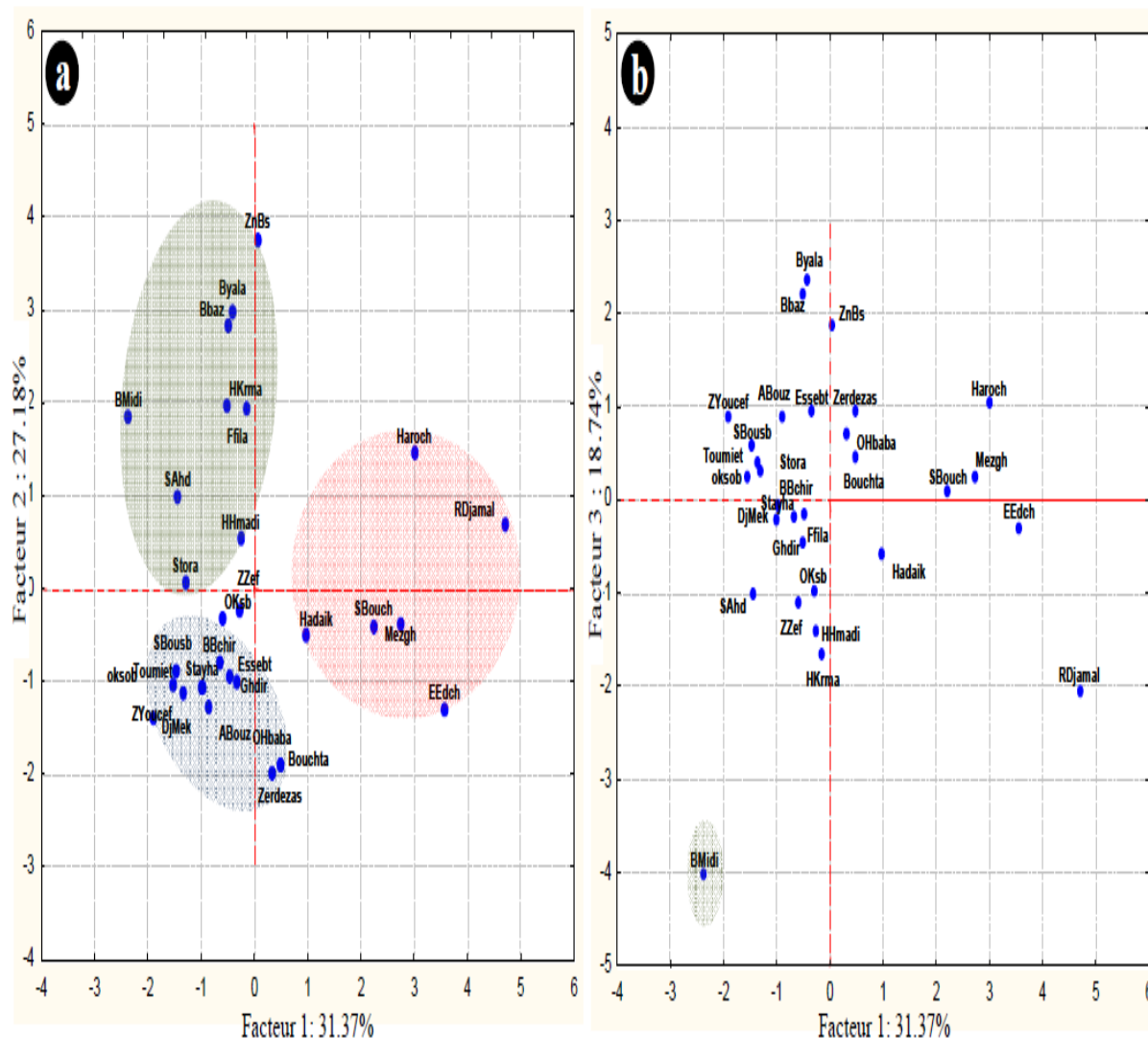


Fig n°7.16a, b : La projection des municipalités sur les plans factoriels, a (1x2) et b (1x3)

La figure 7.16a, b présente la projection des municipalités sur les plan factoriels (1x2) et (1x3), elle montre que les agglomérations classifiées comme groupe des municipalités à vocation agricole caractérisées par des indicateurs de pollution agricole telles que : Edchich, Salah Bouchaour, Mezghiche, Ramdane Djamel et Harrouch, Hadaeïk.

7.3.3 Les variables de l'état de la qualité de l'eau de surface (State) :

Les variables indépendantes de l'état de la qualité de l'eau de surface analysées par l'ACP sont : les Nitrates (NO_3^-), les Chlorures (Cl^-), le Sodium (Na^+), le Calcium (Ca^{2+}), le Magnésium (Mg^{2+}), le Potassium (K^+), les Sulfates (SO_4^{2-}), les Bicarbonates (HCO_3^-), la Demande Biochimique en Oxygène (DBO_5), la Demande Chimique en Oxygène (DCO) et la variable dépendante TDS. Les variables enlevées par les réseaux de neurones qui sont : la

Conductivité Électrique (CE), la Température (T°) et le potentiel en Hydrogène (pH) sont considérées comme variables supplémentaires.

Sur la base des valeurs propres de la matrice de corrélation pour les variables actives de l'état de la qualité de l'eau, et à l'aide du critère test des éboulis (Scree test), effectué visuellement à partir du graphique des valeurs propres successives. Alors, toutes les valeurs propres qui forment à peu près une ligne droite lorsqu'on commence par la fin peuvent être considérées comme correspondant à des dimensions des données qui ne comportent que du bruit (ou erreur de mesure) et on peut les exclure. Par conséquent, un seul facteur a été choisi pour l'analyse d'une variance totale de 81,12% de la variance cumulée.

Tabn°7.28 : Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie S).

	Factor 1	Factor 2
Na⁺	-0,92120	0,215381
Ca²⁺	-0,96920	0,088332
Mg²⁺	-0,96603	0,104725
K⁺	-0,74738	0,470772
NO₃⁻	-0,95084	-0,119418
Cl⁻	-0,92702	0,313115
SO₄²⁻	-0,83660	-0,006178
HCO₃⁻	-0,89752	-0,192245
DBO₅	-0,561189	-0,80046
DCO	-0,86822	-0,451632
TDS	-0,98979	0,106375
*CE	-1,07786	0,062315
*T	0,88910	0,357324
*pH	0,21477	0,092202

Source : (Sakaa ; 2013)* variable supplémentaire.

Le tableau 7.28 présente les variances des facteurs et de leurs corrélations avec les variables de la catégorie S. Le seul facteur qui correspond à une valeur propre (8,923) et représente environ 81,117% de la variance cumulée. Il est corrélé négativement avec toutes variables actives (NO₃⁻, Cl⁻, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, SO₄²⁻, HCO₃⁻, DBO₅, DCO et le TDS) et positivement avec la variable supplémentaire (la température T).

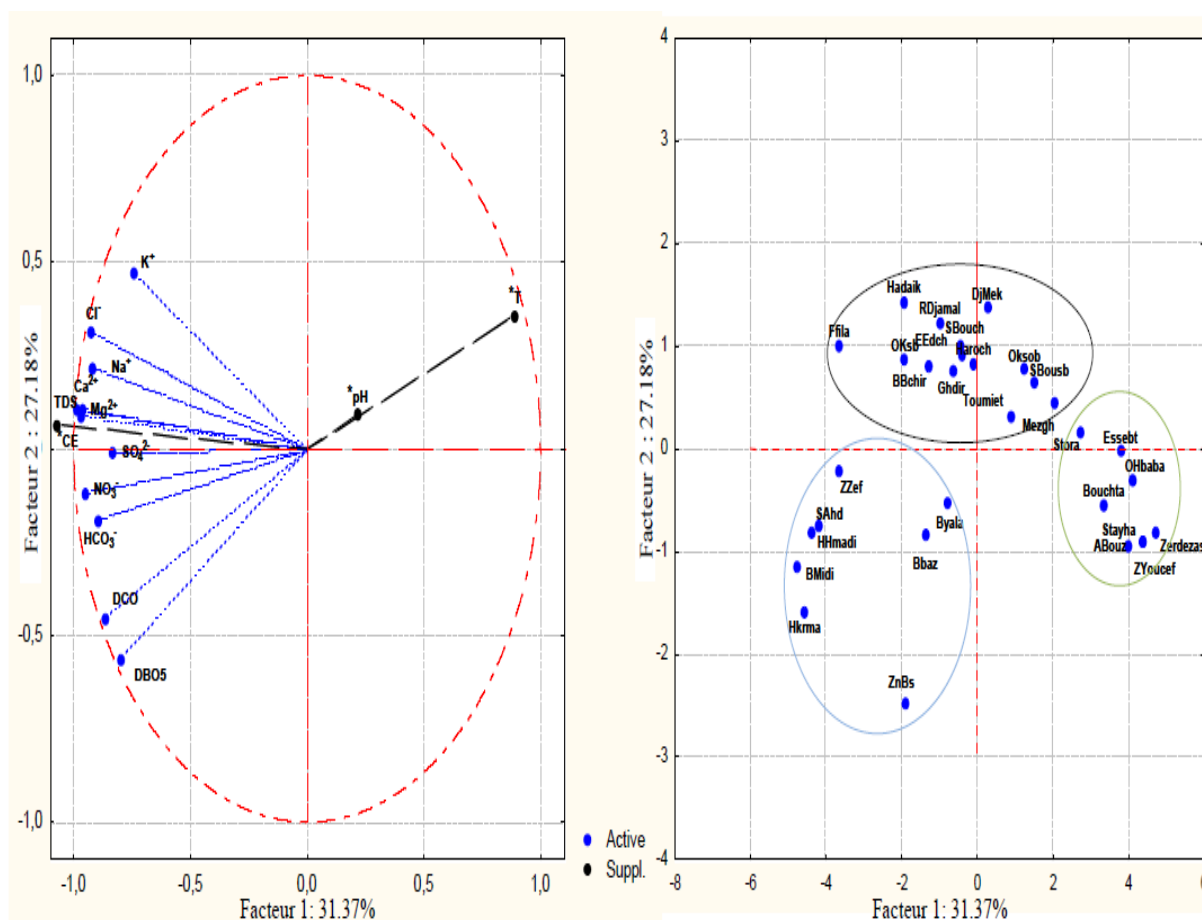


Fig n° 7.17 : La projection des variables S. **Fig n°7.18:**La projection des municipalités sur le planfactoriel 1x2

La superposition de la figure 7.17 et celle 7.18. Les municipalités de la partie centrale du bassin (Emdjez Edchich, Salah Bouchaour, Fil fila, Mezghich, Ramdane Djamel, Harrouch, Hadaik, El Ghedir, Toumiettes, Djebel Mekcene Beni Bchir) sont semblables en termes de variable active : le potassium, les chlorures, le sodium, le calcium, le magnésium et le TDS (paramètres de la minéralisation). Le dernier groupe des municipalités situées à l’amont du bassin qui se caractérise par une faible minéralisation des eaux qui sont moins polluées.

7.3.4 Les variables d’Impact :

Les variables indépendantes d’impact analysées par l’ACP sont, la Perte de Productivité Agricole (PertePAg), la Perte des Zones Humides (PerteZnHu) et la variable dépendante TDS.

Tab n°7.29: Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie I).

	Factor 1	Factor 2
PertePAg	-0,717	0,500

PerteZnHu	-0,707	-0,570
MaladTrHy	-0,700	0,553
TDS	-0,774	-0,439

Source: (Sakaa ; 2103).

Le tableau (n°7.29) présente les variances des facteurs et de leurs corrélations avec les variables d'impact I. Le premier facteur qui correspond à une valeur propre (2,098) et représente environ 52,46% de la variance cumulée. Il est corrélé négativement avec toutes variables d'impact (la perte de la productivité agricole, la perte des zones humides) et le TDS.

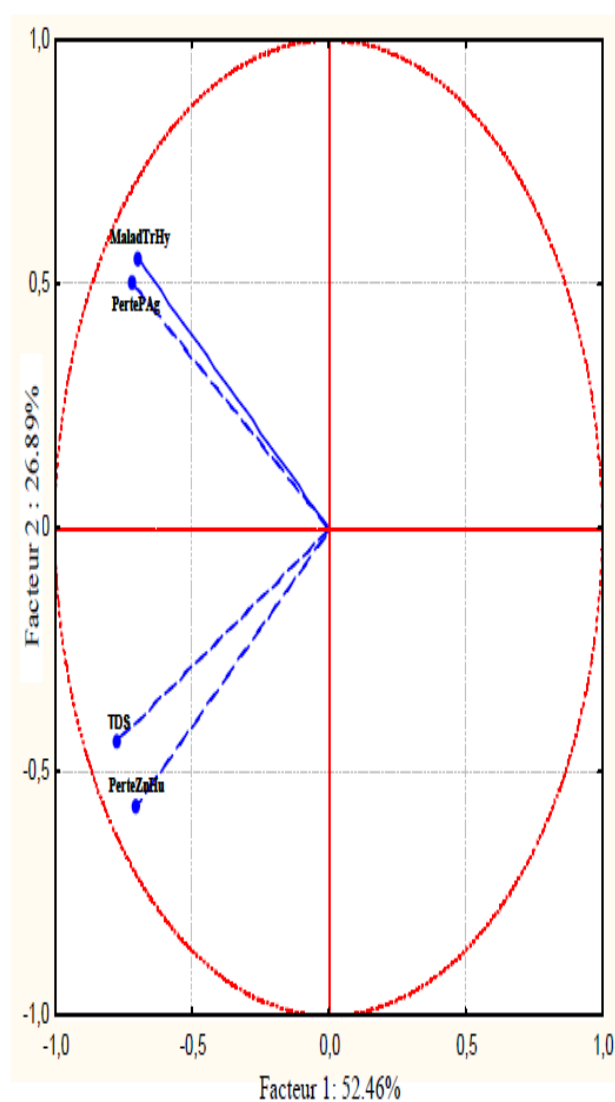


Fig n°7.19 : La projection des variables I sur le plan factoriel 1x2.

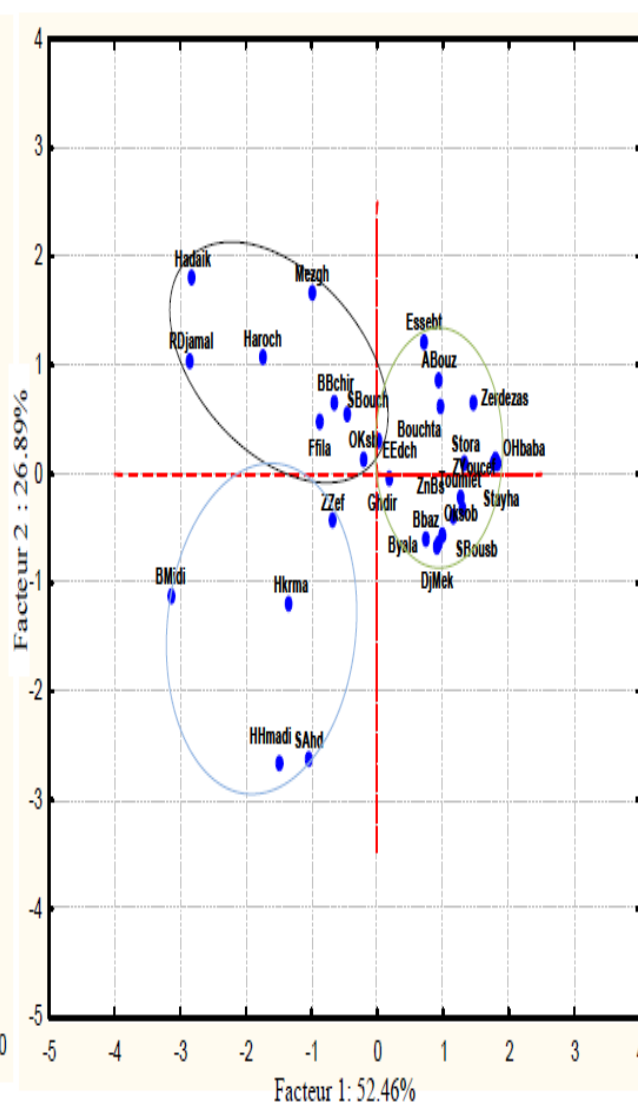


Fig n°7.20 : La projection des municipalités sur le plan factoriel 1x2.

La superposition de la figure 7.19 et celle 7.20 explique que les municipalités à vocation agricole de la partie centrale du bassin (EEdchich, Salah Bouchaour, Fil-fila, Mezghich, Ramdane Djamel, Harrouch, Hadaik, Béni Bchir et Oued Ksob) sont semblables en termes de perte de la productivité agricole. Le dernier groupe englobe les petites municipalités et agglomérations situées à l'amont du bassin qui se caractérisent par une faible minéralisation des eaux et l'absence totale des zones humides.

7.3.5 Les variables de Réponse :

Les variables indépendantes de Réponse analysées par l'ACP sont : le stockage des eaux pluviales (StoEPluv), l'importation de l'eau (ImportE), l'efficacité dans l'eau d'irrigation (EfEIrrig), l'efficacité des systèmes d'information (EfSyInf), la sensibilisation sur l'eau (SensibE), et la variable dépendante MRE.

Toutes les valeurs propres qui forment à peu près une ligne droite lorsqu'on commence par la fin peuvent être considérées comme correspondant à des dimensions des données qui ne comportent que du bruit (ou erreur de mesure) et on peut les exclure. Par conséquent, trois facteurs ont été choisis pour l'analyse d'une variance totale de 73,30% de la variance cumulée.

Tab n°7.30: Les Corrélations Facteurs-variables (Catégorie R).

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
DEM	-0,301	0,519	0,222
StoEPluv	0,102	-0,179	-0,812
ImportE	-0,782	0,560	-0,107
EfEIrrig	0,515	0,655	-0,278
SensibE	-0,763	-0,422	0,0434
EfSyInf	-0,371	-0,152	-0,778
EffAIEP	-0,686	-0,354	0,203
MRE	-0,829	0,418	-0,113

Source : (Sakaa ; 2013).

Le tableau 7.30 présente les variances des facteurs et de leurs corrélations avec les variables. Le premier facteur correspond à la plus grande valeur propre (2,855) et représente environ 35,70% de la variance cumulée. C'est le plus corrélé avec l'importation de l'eau, la sensibilisation sur l'eau et la mobilisation de la ressource en eau (corrélations négatives). Le deuxième facteur correspondant à la deuxième valeur propre (1,55) qui représente 19,35% de la variance cumulée, mais n'est corrélé avec aucune variable. Le troisième facteur correspondant à la valeur propre 1,46 représentant 18,26% de la variance cumulée. Il est

négativement corrélé avec le stockage des eaux pluviales et l'efficacité dans le système d'information.

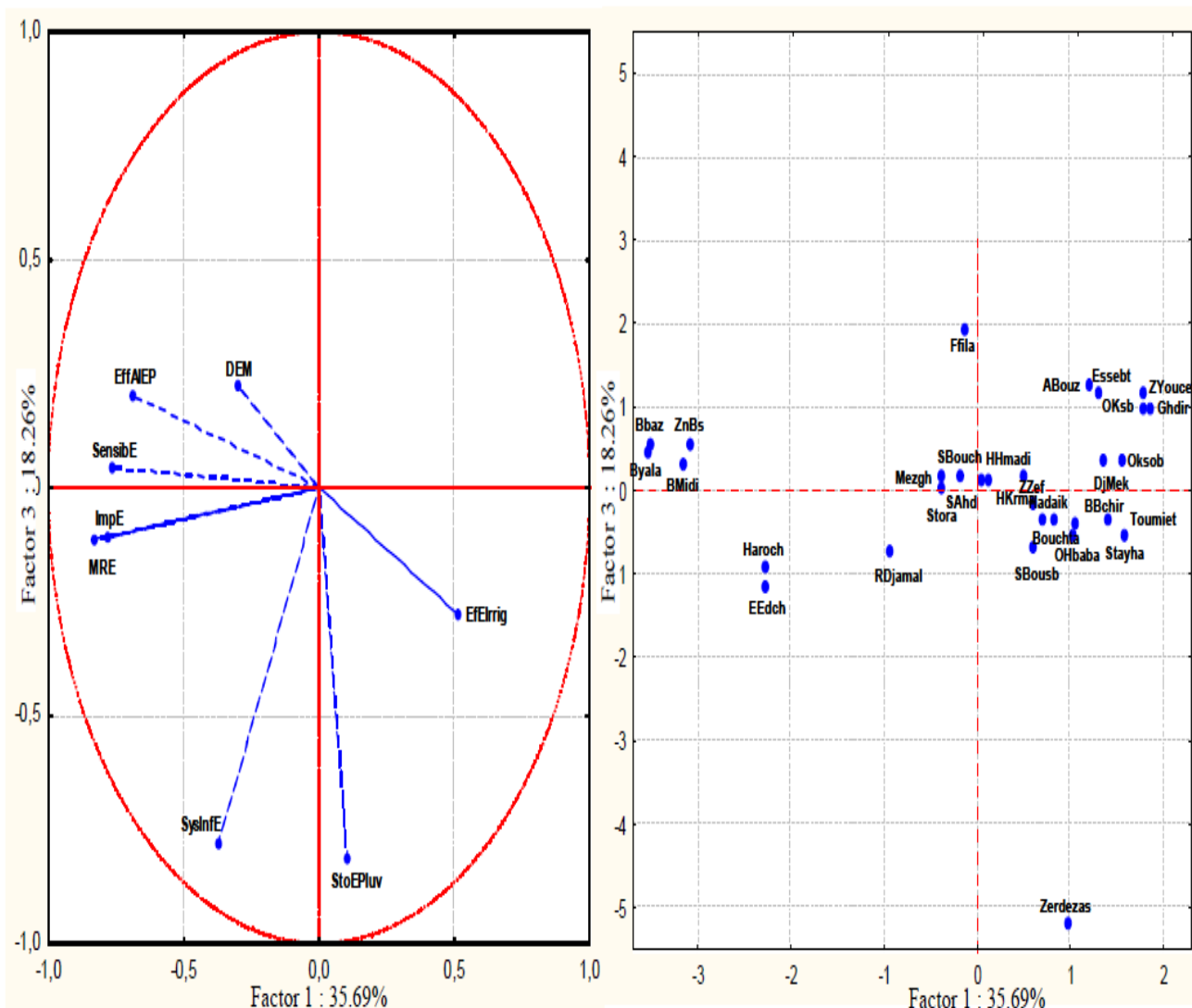


Fig n°7.21:La projection des variables R pf 1x3 **Fig n°7.22:**La projection des municipalités sur le plan factoriel 1x3.

La superposition de la projection des variables et des municipalités dans un plan de facteurs (1x3) montre que les municipalités d' El Harrouch, Emdjez Edchich et Ramdane Djamel sont semblables en termes de mobilisation de la ressource en eau, de l'importation de l'eau, de la sensibilisation sur l'eau. Zerdézas se distingue par le stockage des eaux pluviales et l'efficacité dans le système d'information.

7.4 L'Analyse des Facteurs (AF) :

Le nombre de facteurs significatifs résultant par l'analyse en composante principale ACP pour les cinq catégories du modèle DPSIR, ont été utilisées dans l'analyse des facteurs.

La stratégie de la rotation varimax normalisée a été adoptée pour trouver une rotation qui maximise la variance sur les nouveaux axes (facteurs) ; en d'autres termes, il cherche à obtenir une structure des poids pour chaque facteur qui soit aussi différente que possible, permettant une interprétation aussi facile que possible. L'analyse factorielle a été réalisée pour les catégories des forces motrices D, de pression P, de l'état de la qualité de l'eau (S), d'impact I et réponses P.

7.4.1 Les variables forces motrices D :

Les variables de la force motrice classifiées par l'analyse des facteurs sont : la population, les revenus par employant, le tourisme, l'occupation du sol, le taux de raccordement à l'eau potable, le taux de raccordement aux réseaux des eaux usées, la dotation journalière de l'eau potable, l'évacuation des eaux pluviales, le prix de l'eau, la taxation sur l'eau, la consommation de l'eau d'agriculture, l'intégration des femmes, les pertes d'eau et la variable dépendante la mobilisation de la ressource en eau MRE.

Mais ce qui nous intéresse pour la gestion de l'eau les variables ont relation avec le secteur agricole qui sont : l'occupation du sol l'évacuation des eaux pluviales, le prix de l'eau, la taxation sur l'eau, la consommation de l'eau d'agriculture, les pertes d'eau et la variable dépendante la mobilisation de la ressource en eau MRE.

Tab n°7.31: Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie D).

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
Pop	0,449	0,694	,279
Remp	0,692	,242	0,133
Tourism	0,402	-0,050	0,599
OccupS	<u>0,706</u>	0,228	0,487
TxEp	0,696	0,522	-0,059
TxEU	0,711	0,335	-0,025
EvEPluv	0,221	0,221	0,173
DotEP	0,786	0,351	0,217
PrixE	<u>0,903</u>	-0,121	0,075
TaxE	<u>0,778</u>	-0,097	-0,008
ConEAg	-0,363	<u>0,778</u>	-0,236
IntégFem	0,670	0,612	0,263
PerteE	-0,096	-0,096	-0,828
MRE	0,294	0,845	0,154

Variance explicative	6,0415	2,880	1,616
% Variance totale	0,417	0,205	0,115

Source : (Sakaa ; 2013).

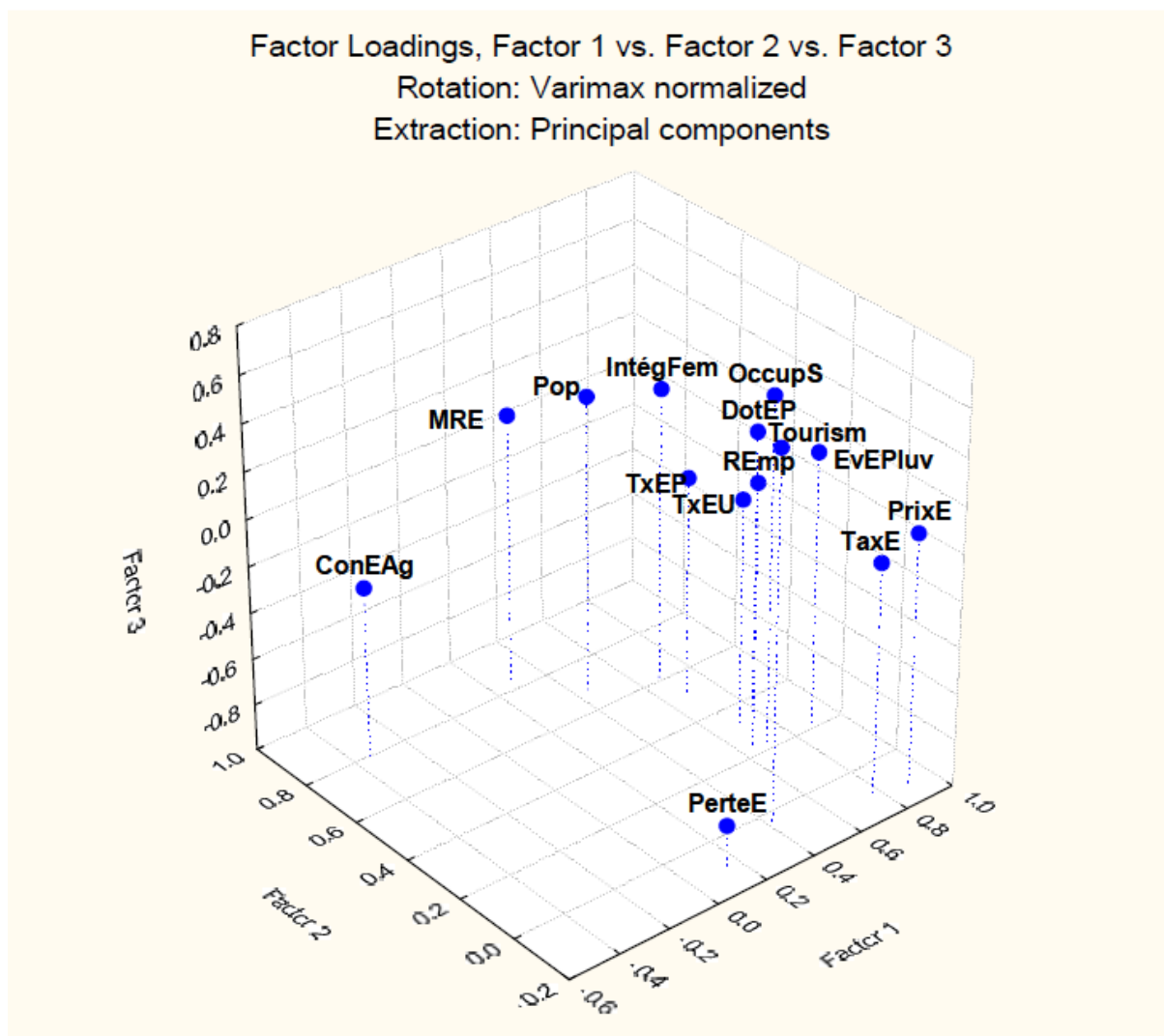


Fig n°7.23 :Projection des poids factoriels des variables D (Varimax normalisé).

Le tableau 7.31 et la figure 7.23 présente la solution des trois facteurs avec rotation et les poids de leurs variables classées. Nos variables observées en premier facteur sont : l’occupation du sol, l’évacuation des eaux pluviales le prix de l’eau et les taxes sur l’eau. Ce facteur représente 50,81% de la variance totale, il contient des inter-corrélations des variables observées Ce facteur explique les déterminants des infrastructures hydrauliques et le niveau de vie de la population. Le deuxième facteur représente 14,10% de la variance totale et possède une seule variable qui est la consommation en eau d’agriculture. Ce facteur latent représente l’utilisation des terres agricoles en tant que pilote pour améliorer le secteur agricole. Le troisième facteur a 8,86% de la variance totale et comprend la variable de la perte

d'eau dans le réseau de l'eau qui se réfère en tant que facteur déterminant dans la consommation.

En comparaison avec les résultats de l'ACP pour les variables forces motrices, l'analyse factorielle a introduit un nouveau déterminant important de captage de l'eau qui est la consommation d'eau a diminué l'agriculture. Les autres variables sont semblables, mais ils ont des saturations différentes.

7.4.2 Les variables de Pression :

Les variables indépendantes de pression estimer dans l'analyse des facteurs sont : Les pesticides, les engrais chimiques, les engrais organiques. En plus de la variable indépendante TDS (le total des solides dissous).

Tab n°7.32: Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie P).

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
DécSauv	0,084	0,972	0,007
EUDom	-0,084	0,960	-0,001
Pesticid	<u>0,952</u>	0,063	0,011
EngrCh	<u>0,956</u>	0,069	-0,021
EngrOrg	<u>0,892</u>	-0,039	-0,064
StCarb	0,116	0,550	0,417
EUInd	-0,216	-0,246	0,687
CO2	0,143	0,205	0,750
TDS	-0,066	0,134	0,844
Variance explicative	2,717	2,313	1,926
% Variance totale	0,301	0,257	0,214

Source : (Sakaa ; 2013).

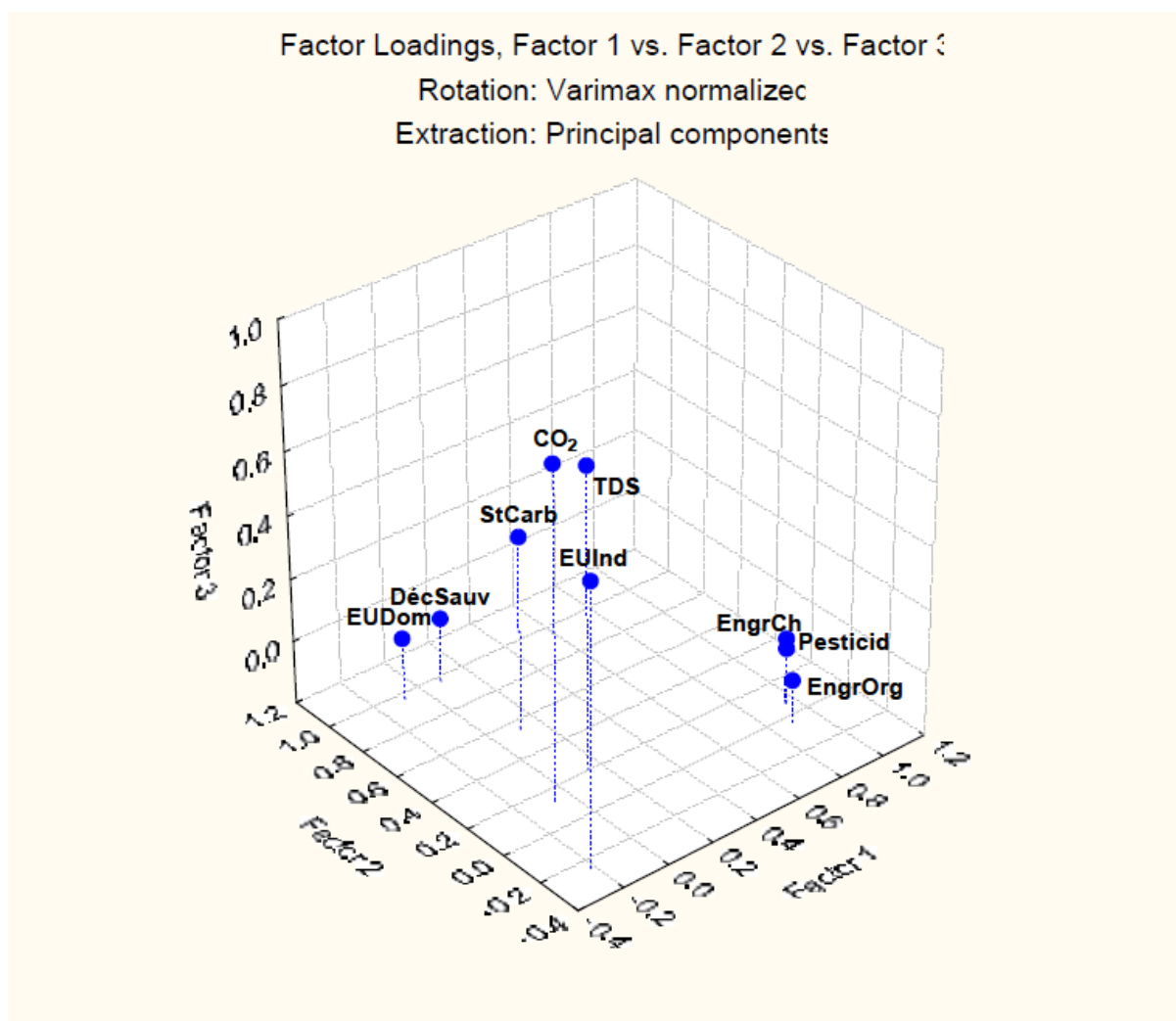


Fig n°7.24:Projection des poids factoriels des variables P (Varimax normalisé).

Le tableau 7.32 et la figure 7.24 montre que les variables due à l'agriculture se situe en premier facteur avec 31,37% de la variance totale qui sont la variable des pesticides, des engrais chimique et organique. Ce facteur représente la pollution en milieu rural en raison de l'utilisation excessive des engrais dans l'agriculture.

7.4.3 Les variables de l'état de la qualité de l'eau de surface (State) :

Les variables indépendantes de l'état de la qualité de l'eau de surface utilisées dans l'analyse des facteurs sont : les Nitrates (NO_3^-), les Chlorures (Cl^-), le Sodium (Na^+), le Calcium (Ca^{2+}), le Magnésium (Mg^{2+}), le Potassium (K^+), les Sulfates (SO_4^{2-}), les Bicarbonates (HCO_3^-), la Demande Biochimique en Oxygène (DBO_5), la Demande Chimique en Oxygène (DCO) et la variable dépendante TDS.

Tab n°7.33 : Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie S).

	Factor 1
Na+	-0,921
Ca ²⁺	-0,969
Mg ²⁺	-0,966
K+	-0,747
NO ₃ ⁻	-0,950
Cl ⁻	-0,927
SO ₄ ²⁻	-0,836
HCO ₃ ⁻	-0,897
DBO ₅	-0,800
DCO	-0,868
TDS	-0,989
Variance explicative	8,923
% Variance totale	0,811

Source : (Sakaa ; 2013).

Le tableau 7.33 montre que toutes les variables observées sont réduites dans seul facteur latent. Ce facteur représente 81,11% de la variance totale et inclue les variables suivant : Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, NO₃⁻, HCO₃⁻, DBO₅, DCO et le TDS.

Les résultats de l'Analyse Factorielle et de l'ACP pour les variables de l'état de la qualité de l'eau sont semblables, mais ils ont des saturations différentes.

7.4.4 Les variables d'Impact :

Les variables indépendantes d'impact à développer par l'analyse des facteurs sont : la Perte de Productivité Agricole (PertePAg), la Perte des Zones Humides (PerteZnHu) et la variable dépendante TDS.

Tab n°7.34: Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie I).

	Factor 1	Factor 2
PertePAg	0,169777	0,857880
PerteZnHu	0,904988	0,079904
MaladTrHy	0,116456	0,881336
TDS	0,862853	0,220734

Variance explicative	1,605904	1,567820
% Variance totale	0,401476	0,391955

Source : (Sakaa ; 2013).

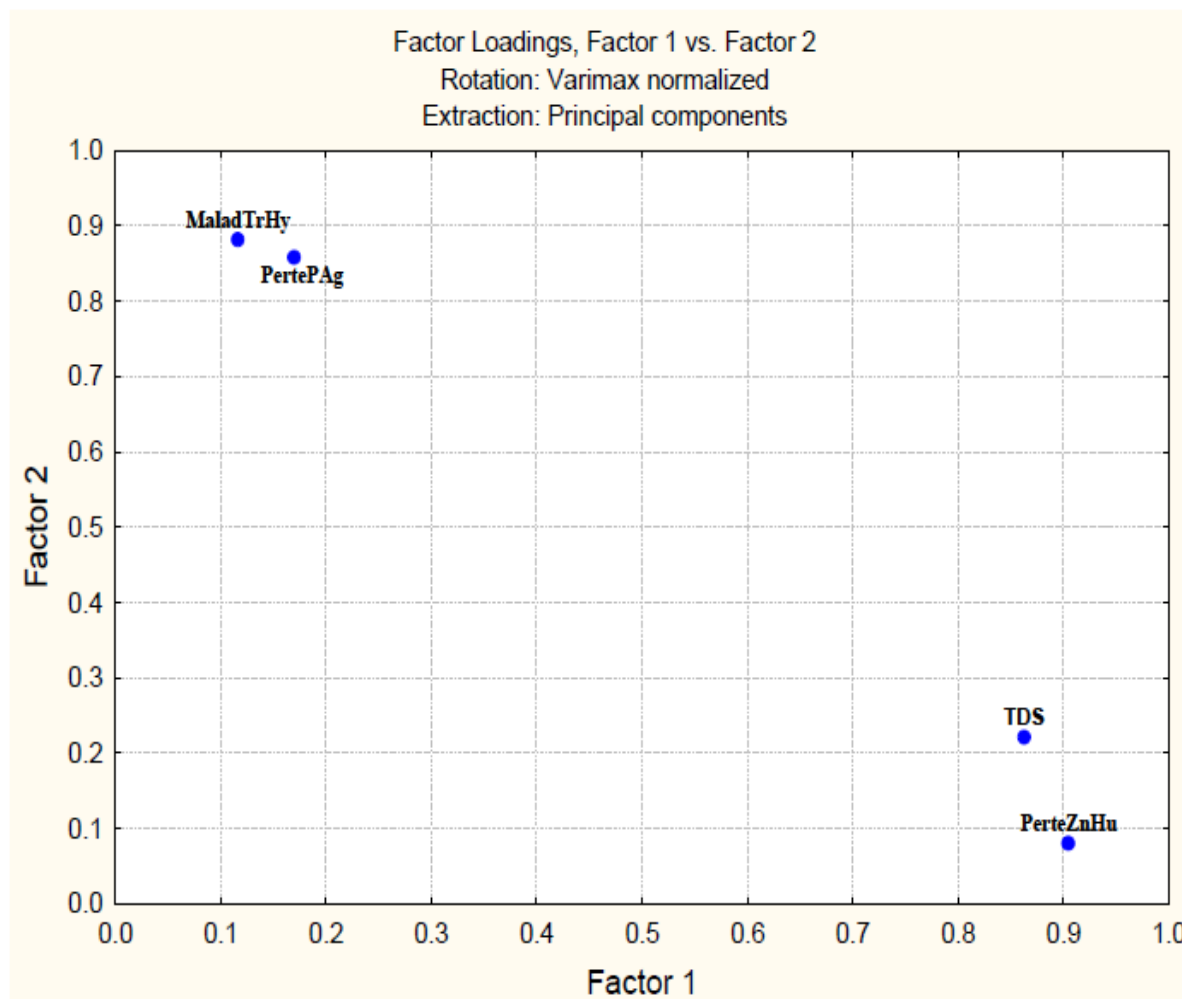


Fig n°7.25: Projection des poids factoriels des variables I (Varimax normalisé).

Le tableau 7.34 et la figure 7.25 présente la solution de deux facteurs avec rotation et les poids de leurs variables classées. Le premier facteur représente 52,45% de la variance totale. Il contient des inter-corrélations des variables observées qui sont : la perte des zones humides et le TDS, ce facteur reflète la détérioration de la qualité des eaux de surface (i.e. l'impact écologique). Le second facteur a 26,88% de la variance totale et contient deux variables, l'un c'est la perte de productivité agricole, ce facteur peut représenter les conséquences de la détérioration de la qualité des eaux sur la santé humaine.

Les résultats de l'analyse factorielle pour les variables écologiques et impact sur la santé publique sont différents aux résultats de l'ACP.

7.4.5 Les variables de Réponse :

Les variables indépendantes de Réponse a analysées et discuter par l'AF sont : le stockage des eaux pluviales (StoEPluv), l'importation de l'eau (ImportE), l'efficacité dans l'eau d'irrigation (EfEIrrig), l'efficacité des systèmes d'information (EfSyInf), la sensibilisation sur l'eau (SensibE), et la variable dépendante MRE.

Tab n°7.35 : Les Poids Factoriels (Varimax normalisé) (Catégorie R).

	Factor 1	Factor 2	Factor 3
DEM	-0,080416	0,572294	-0,274582
StoEPluv	-0,148442	-0,166049	<u>0,808255</u>
ImportE	0,151215	<u>0,949792</u>	0,106794
EfEIrrig	<u>0,867611</u>	0,125358	0,065531
SensibE	<u>0,829850</u>	0,224466	0,152414
EfSyInf	0,175005	0,180914	<u>0,838909</u>
EffAIEP	0,769219	0,213310	-0,027580
MRE	0,278087	<u>0,881248</u>	0,147717
Variance explicative	2,192425	2,178125	1,493951
% Variance totale	0,274053	0,272266	0,186744

Source : (Sakaa ; 2013).

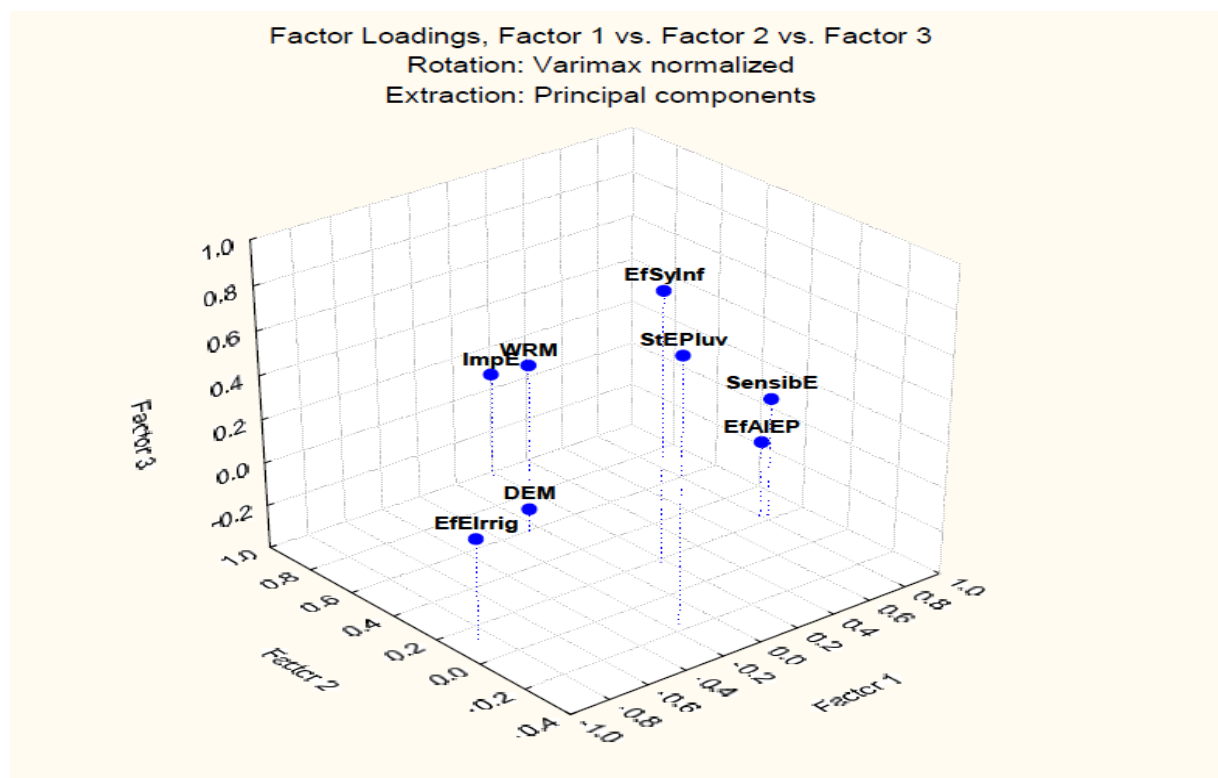


Fig n°7.26:Projection des poids factoriels des variables R (Varimax normalisé).

Le tableau 7.35 et la figure 7.25 présente la solution à trois facteurs avec rotation et les poids de leurs variables classées.

Le premier facteur représente 35,69% de la variance totale et contient des variables observées et leur différent poids. Il est principalement lié à l'efficacité dans l'eau d'irrigation (corrélation négative). Le deuxième facteur représente 19,35% de la variance totale et contient deux intercorrélations des variables qui sont l'importation de l'eau et la mobilisation de la ressource en eau. Ce facteur latent reflète la nécessité des ressources en eau supplémentaires pour combler l'offre et la demande en eau. Le troisième facteur a 18,26% de la variance totale, il est associé avec l'efficacité dans le système d'information et le stockage des eaux pluviales. Ce facteur reflète les infrastructures hydrauliques.

En comparaison avec les résultats de l'ACP pour les variables de Réponse l'analyse factorielle a introduit deux variables dans le second facteur avec des poids supérieures à 0,7 (l'ImportE et MRE). En outre, les signes des variables significatives dans le deuxième et le troisième facteur ont été changés, ce qui indique un changement dans la projection de ces variables sur le plan factoriel (1x2) et (1x3).

Remarques et Conclusions

Les remarques et les conclusions tirées de l'analyse des données en utilisant les RNA, les techniques exploratoires multivariées (ACP et AF), les avis et les jugements des experts peuvent être résumées comme suit:

- Les résultats obtenus dans l'analyse ANN indiquent que le Perceptron Multicouche MLP avec l'algorithme de rétro-propagation BFGS (Broyden Fletcher GoldfarbShano) est avéré être la meilleure structure ANN pour modéliser et simuler la relation entre la mobilisation de la ressource en eau et les indicateurs indépendantes de la catégorie D et celle R d'une part, et la relation entre le TDS et les indicateurs indépendantes de la catégorie P, S et I d'autre part. En outre, les réseaux MLP permettent de caractériser et de hiérarchiser les variables efficaces dans chaque catégorie.*
- Les modèles RNA peuvent être utilisés pour des jeux de données indépendants en sciences de l'eau et de l'environnement.*
- Il existe des différences significatives entre les résultats de l'analyse par l'ANN et les avis des experts en matière de classement et de hiérarchisation des catégories : Forces motrices D, de Pression, de l'état de la qualité de l'eau de surface et de réponse. Ces résultats sont cohérents pour la catégorie d'Impact. Par conséquent, la production de l'étude aide les décideurs et les gestionnaires de l'eau pour obtenir une meilleure compréhension sur les réels problèmes touchant le secteur de l'eau dans l'agriculture.*
- Le modèle ANN caractérise les indicateurs efficaces selon leurs priorités (poids), la consommation en eau d'agriculture (ConEAg) est la variable force la plus effective dans la catégorie force motrice, pollution d'origine agricole (les pesticides, les engrais chimiques et les engrais organiques) est la variable source de pollution des eaux dans la catégorie de Pression, les Chlorures (Cl^-) et les Nitrates (NO_3^-) sont les deux principaux paramètres qui influencent sur la qualité des eaux de surface, la perte de productivité agricole (PertePAg) est une variable d'impact influencées par le changement de l'état qualitatif et quantitatif de la ressource en eau, et l'importation de l'eau (ImportE) est la première intervention dans la catégorie de Réponse*
- L'analyse exploratoire multivariée (ACP et AF) permet de classer d'une manière générale les municipalités en trois groupes distincts qui sont : le premier groupe des municipalités situées dans la partie aval du bassin, le second groupe englobe les municipalités la partie centrale du bassin et le dernier groupe des municipalités de la partie amont du bassin.*

Conclusion générale et recommandation

*Le modèle DPSIR pour la gestion d'un
périmètre irrigué dans le bassin versant
du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)*

Conclusion Générale & Recommandations

Dans ce travail, un modèle conceptuel intégré de la gestion des eaux a été élaboré sur la base de la relation de cause-effet. Le nouveau modèle décrit les éléments et les sciences relatives à l'eau les plus importants et indiquent que le développement et la gestion des ressources en eau doivent être dans les limites écologiques. Le nouveau modèle conceptuel intégré de la gestion des eaux a été appliquée au cycle de vie de la gestion des ressources en eau dans le bassin versant de Saf-Saf.

Principales Caractéristiques de l'Analyse

Les variables efficaces ont été caractérisées et classifiées en utilisant l'analyse multicritères par l'ANN et les avis des experts, l'analyse multivariée.

Les variables retenues ont été organisées et groupées en utilisant les techniques multivariées qui sont l'analyse en composantes principales et l'analyse factorielle. Les principales conclusions de ces techniques d'analyse sont les suivants:

- La consommation en eau d'agriculture est la variable force motrice la plus effective dans la catégorie « D » suivie par l'occupation du sol.*
- La génération des engrais chimiques est la variable source de pollution classer la troisième sur la qualité de l'eau dans la catégorie de Pression suivie par les pesticides suivie par les engrais organiques.*
- Les Chlorures et les Nitrates sont les deux principaux paramètres qui influencent sur la qualité des eaux de surface suivis par le Magnésium, la DBO₅, le Sodium, le Potassium, le Calcium, les Sulfates, les Bicarbonates et la DCO. Le modèle ANN a enlevé trois (03) variables d'Entrée en raison de leur faible sensibilité, ces variables sont : la Conductivité Électrique, la Température et le pH.*
- la perte de productivité agricole (PertePAG) est une variable d'impact influencée par le changement de l'état qualitatif et quantitatif de la ressource en eau suivie par la perte des zones humides.*
- L'importation de l'eau est l'intervention la plus influente dans la catégorie de Réponse sur la MRE suivie par l'efficacité dans l'eau d'irrigation, la sensibilisation sur l'eau, en quatrième rang l'efficacité dans le système d'information, suivie par le stockage des eaux pluviales.*

***Le but de ce travail** est de contribuer à l'avancement de la gestion des ressources en eau à travers le développement de nouveaux modèles de gestion intégrée conceptuel basé sur une approche systématique et multidisciplinaire.*

Le nouveau modèle conceptuel de gestion intégrée des ressources en eau peut être appliqué dans la région méditerranéenne. Ce travail a abordé la grande image de la GIRE, y compris les concepts de durabilité. En outre, il a été basé sur des approches intégrées en vue d'optimiser la gestion des ressources en eau, tout en soutenant les limites écologiques et la capacité de la mobilisation des ressources en eau.

Aussi défini pour la première fois, les critères multi paramètres efficaces pour l'analyse et la surveillance du secteur de l'eau et des zones géographiques sous stress d'eau sur une base scientifique objective. Il conclut également les interventions potentielles nécessaires pour assurer la disponibilité de l'eau et l'équilibre offre-demande.

Le nouveau modèle a adressé un objectif clé sur les niveaux de la région méditerranéenne en général et en particulier le bassin versant de Saf-Saf pour parvenir à une utilisation et une gestion durable des ressources naturelles en eau et la protection efficace de l'environnement.

Compte tenu de la différence entre les résultats obtenus par l'ANN et l'avis des experts sur l'importance et la priorité des variables liées à l'eau de l'agriculture dans les différentes catégories, le produit du travail aide les décideurs de l'eau et des planificateurs d'acquérir une meilleure connaissance et compréhension des conditions de base réelles qui assurent le succès d'entreprendre des mesures d'intervention de gestion.

Cette étude intervient alors que la première tentative de renforcer l'approche intégrée à travers l'étude du cycle de vie de la gestion des ressources en eau. Il a rapproché les trois composantes du développement durable qui sont : sociale, économique et environnementale.

En outre, il a pris en considération les avis des experts. Par conséquent, le nouveau modèle conceptuel de la gestion intégrée de l'eau peut être la base d'un plan national de l'eau durable. En plus, les variables sélectionnées et classifiées sont très utiles pour l'analyse et la surveillance du secteur de l'eau.

La caractérisation et la classification des forces motrices efficaces aident les gestionnaires de l'eau de concevoir des mesures de gestion de la demande en eau dans le but de combler l'écart entre le présent et l'avenir concernant l'offre et la demande. Cela appuie l'interaction entre les indicateurs socioéconomiques et la gestion des ressources en eau telles que les eaux souterraines et de surface deviennent une partie de la société. Mettant en relief les indicateurs d'accès à l'eau, le revenu par habitant et le prix de l'eau va renforcer le concept de l'équité sociale. L'importance des variables de l'utilisation des terres nécessite l'adaptation de l'aménagement du territoire prévoit de faire partie de la planification et de la

gestion globale des eaux. L'indicateur perte de l'eau démontre la nécessité de gérer les connexions illégales, de détecter les fuites et la réhabilitation des réseaux d'eau.

La définition et la caractérisation des indicateurs de pression sur de la qualité des eaux de surface peut aider les gestionnaires de l'eau de concevoir les mesures de la lutte appropriée contre la pollution de l'eau avec l'objectif de protéger l'aquifère côtier. Cela renforce l'approche préventive et d'intégrer la durabilité environnementale dans la gestion des ressources en eau. La caractérisation des paramètres de la qualité de l'eau permet de choisir les techniques appropriées pour le traitement des eaux de surface.

La description des interventions importantes de la politique de l'eau aident les décideurs à améliorer la formulation des politiques dans le contexte des ressources en eau. L'accent devrait être donné à l'importation de l'eau et l'efficacité dans l'eau d'irrigation.

Recommandations pour l'amélioration de la gestion du secteur de l'eau :

- La Gestion des ressources en eau devrait être basée sur des approches intégrées de prévention, et de l'écosystème.
- Le modèle conceptuel existant de gestion des ressources en eau en Algérie devrait être élaboré pour tenir compte les composantes de l'environnement.
- Le plan national de l'eau devrait être reformulé pour tenir compte des problèmes prioritaires de l'eau et les zones géographiques sous stress d'eau.
- La planification et la gestion des ressources en eau doivent être adaptées au changement climatique.
- Toutes les politiques, plans et programmes eau devraient subir une Evaluation Environnementale Stratégique (EES), qui est un outil important vital pour soutenir l'approche intégrée de la gestion des ressources en eau et pour assurer la durabilité de l'eau.
- Toutes les politiques, plans et programmes eau devraient subir une Evaluation Environnementale Stratégique (EES), qui est un outil important vital pour soutenir l'approche intégrée de la gestion des ressources en eau et pour assurer la durabilité de l'eau.
- L'utilisation de l'eau sur l'écosystème et les exigences de la demande doivent être pris en compte lors du calcul de la demande globale de l'eau.

Référence et bibliographie

*Le modèle DPSIR pour la gestion d'un
périmètre irrigué dans le bassin versant
du Saf-Saf (Nord-Est Algérien)*

- Alfarra A.**, et al, (2012). Modeling water supply and demand for effective water management allocation in the Jordan valley. *Journal of Agricultural Science and Applications (JASA)*. Vol. 1, No. 1, Mar. 2012 PP. 1-7.
- AFNOR**, 1994. Agence Française de Normalisation. Recueil de normes françaises 1994, Qualité de l'eau. Paris: AFNOR, 1994 Norme NFT 90-012
- APHA, AWWA, WEF** 1998. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation; Standard methods for the examination of water and waste water. 20e édition.
- Ayers RS et Westcot DW**. 1976. La qualité de l'eau en agriculture. Bull. FAO N° 29 Rome 81p.
- Baghdadi H**. 1994. L'irrigation agricole dans la wilaya de Constantine. Situation actuelle et perspective de développement Colloque Journées sur l'eau. 3-4 mai 1994. Constantine.
- Benblidia**, 2011 L'efficacité d'utilisation de l'eau et approche économique. Etude nationale. Algérie. Version finale. Plan bleu. Centre d'activités Régionales. PNUE/PAM.
- Bouaroudj Sarra**, (2012) Evaluation de la qualité des eaux d'irrigation, Gestion des déchets évaluation et solution environnementales mémoire de magister ; Université Constantine 75p.
- Bowen RE, Riley C** (2003) Socio-economic indicators and integrated coastal management. *Ocean & Coastal Management* 56, 299-312.
- Conac F**. 1978. Irrigation et développement agricole. L'exemple des pays méditerranéens et danubiens https://web.supagro.inra.fr/pmb/opac_css/index.php?
- Couture I**. 2006. (a) Analyse d'eau pour fin d'irrigation MAPAQ Montérégie-Est AGRIVISION 2003-2004. 8p
- Couture I**. 2006. (b) Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation Colloque sur l'irrigation l'eau, source de qualité et de rendement 10 février 2006, Hôtel Mortagne, Boucherville
- De Regt B**. 1990. L'irrigation et la culture du riz au Suriname. *Revue. Le Courrier* n°24 Nov.-décembre pp 94-95.
- Djeha H et Kara K**. 1992. Contribution à l'étude de la pollution des cours d'eau de Constantine par les cyanures suite aux rejets industriels des unités de construction mécanique de Ain-Smara et d'El-Khroub. Effets du cyanure de potassium sur la croissance et le développement du *Pisum sativum*. Mémoire d'Ing. Ecologie. Univ. Constantine. 121 p.
- FAO** 1975. Food Alimentation Organisation Les besoins en eau des cultures. Bull. FAO n° 24. Rome.

- FAO** 1976. Food Alimentation Organisation La qualité de l'eau en agriculture. Bull. d'irrigation et drainage n°29. Rome.
- Hannachi N.** 2009. Faibles ressources hydriques agricoles à Constantine <http://www.latribune-online.com/index.php?news=15372>.
- Hoff H., Swartz C., Tielborger K. & Yates D.,** (2007). Water management under extreme water scarcity: scenario analyses for the Jordan river basin, using WEAP21. CIHEAM, 2007. p. 321-331 (Options Méditerranéennes : Série B. Etudes et Recherches; n° 56 Vol. II).
- Horning H M.,** 1973. Rôle de l'aménagement rationnel de l'eau d'irrigation au niveau des exploitations. Séminaire régional FAO/PNUD Damas. 7-13 décembre 1971. pp 10-21.
- IAHS** (2003) International Association of Hydrological Sciences. International Hydrology Today, UK.
- IIDD** (1995) Promouvoir le Développement Durable auprès des décideurs. Rapport annuel.
- Jalala S** (2005) Characterizing the multi-criteria parameters of integrated water management model in the semi-arid Mediterranean region: application to Gaza Strip as a case study. PhD thesis, Université des Sciences et Technologies de Lille, 225 p.
- JORA** 1983. Journal Officiel de la République Algérienne Loi 87-17 du 16 Juillet 1983 portant code des eaux, p 1270. JORA n°30 du 19-07-83 Chapitre II. Eau d'irrigation
- JORA**, 2006. Journal Officiel de la République Algérienne. Arrêté interministériel du 22 janvier 2006 fixant les proportions d'éléments contenus dans les eaux minérales naturelles et les eaux de source.
- Khalfaoui F., Tandjir L., Zouini. D & Bentouilli. M.Y.,** (2010). Issues and Challenges for an integrated and sustainable management of water resources in the water shed of Saf-Saf (North East of Algeria)". International Network Environmental Management Conflicts, Santa Catarina – Brasil, 1(1), Décembre 2010, pp. 198-204.
- Khalfaoui. F** (2014) Qualité et gestion intégrée des ressources en eau dans le bassin versant du Saf-Saf (Nord- Est algérien) thèse de doctorat Université Annaba 299p.
- Liu J,** Savenije HHG, Xu J (2003) Forecast of water demand in Weinan City in China using WDF-ANN model. Phys Chem Earth 28:219–224. Doi :10.1016/S1474- 7065(03)00026-3.
- Maou A.,** (2001). Estimation des crues de référence pour les plans de prévention du risque inondation. Cas du bassin versant du Saf-Saf, N.E algérien. Mémoire de magister, Université d'Annaba. 118p
- Minns AW, Hall MJ** (1996) Artificial neural networks as rainfall–runoff models. Hydrol Sci J 41(3):399–417. doi:10.1080/02626669609491511.

- Rodier J., et al.** (2009). L'analyse de l'eau, eaux naturelles, eaux résiduaires et eau de mer. 9^{ème} édition. Dunod. Paris.
- Sakaa B.**, (2013). Développement durable, vers un modèle de GIRE dans le bassin versant de Saf-Saf. Thèse de doctorat en sciences. Thèse doctorat ;Université d'Annaba. 156p.
- Sakaa B., Chaffai H., Aoun Sebait B. & Hani A.** (2013). The modeling of response indicators of integrated water resources management with artificial neural networks in the Saf-Saf river basin. *Rev.Sci.Technol., Synthèse n°26*.p 75 – 85.
- Sakaa B., Chaffai H. & Hani A.**, (2012). The use of Artificial Neural Networks in the modeling of socioeconomic category of Integrated Water Resources Management (Case study: Saf-Saf River Basin, North East of Algeria). *Arabian Journal of Geosciences* Université Annaba. <http://dx.doi.org/10.1007/s12517-012-0654-y>.
- Triquet C. & Couture M.**, (1978). Gestion des eaux intérieures au Québec : Activités fédérales dans le domaine des eaux au Québec. *Canadian Water Resources Journal*, 3:4, 1837, DOI:10.4296/cwrj0304018.
- Tandjir L.**, (2009). Maillage des réseaux d'Adduction d'Eau Potable : l'expérience algérienne. *Magazine World Water Arab*. Juillet (2009).
- Tandjir L.**, (1997). Utilisation agricole des eaux usées non conventionnelles dans la Wilaya de Skikda». *EDIL Inf - EAU. Bulletin International de l'Eau et de l'Environnement*. N° 16, p 4 et 5. ISSN 1111- 4916. 78.
- Tandjir L.**, (2008). The Hydro systems of the area of Skikda (Algeria). Publication Chatila. Beirut. Juillet 2008.
- Van der Werf HMG, Petit J** (2002) Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level: a comparison and analysis of 12 indicator-based methods. *Agric. Ecosyst. Environ.* 93, 131–145.
- Van der Werf HMG, Sylvain Payraudeau** (2005) Environmental impacts of farm scenarios according to five assessment methods. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 107, pp 1–19.
- Van der Werf H, Zimmer C** (1998) An indicator of pesticide environmental impact based on a fuzzy expert system, *Chemosphere*, 36:2225 – 49.
- Van Passel S, Nevens F, Mathijs E, Van Huylenbroeck G** (2007) Analysis: measuring farm sustainability and explaining differences in sustainable efficiency. *Ecol. Econ.* 62 (1), 149–161.