

Higher National School of Hydraulic

The Library

Digital Repository of ENSH



المدرسة الوطنية العليا للري

المكتبة

المستودع الرقمي للمدرسة العليا للري



The title (العنوان):

Prévision de l'envasement des barrages par la méthode des réseaux de Neurones (cas du bassin hydrographique Algérois Hodna Soummam.

The paper document Shelf mark (الشفرة) : 7-0003-11

APA Citation (توثيق APA):

Salhi, Chahrazed (2011). Prévision de l'envasement des barrages par la méthode des réseaux de Neurones (cas du bassin hydrographique Algérois Hodna Soummam[Thèse de magister, ENSH].

The digital repository of the Higher National School for Hydraulics "Digital Repository of ENSH" is a platform for valuing the scientific production of the school's teachers and researchers.

Digital Repository of ENSH aims to limit scientific production, whether published or unpublished (theses, pedagogical publications, periodical articles, books...) and broadcasting it online.

Digital Repository of ENSH is built on the open DSpace software platform and is managed by the Library of the National Higher School for Hydraulics. <http://dspace.ensh.dz/jspui/>

المستودع الرقمي للمدرسة الوطنية العليا للري هو منصة خاصة بتقييم الإنتاج العلمي لأساتذة و باحثي المدرسة.

يهدف المستودع الرقمي للمدرسة إلى حصر الإنتاج العلمي سواء كان منشورا أو غير منشور (أطروحات، مطبوعات بيداغوجية، مقالات الدوريات، كتب....) و بثه على الخط.

المستودع الرقمي للمدرسة مبني على المنصة المفتوحة DSpace و يتم إدارته من طرف مديرية المكتبة للمدرسة العليا للري.

كل الحقوق محفوظة للمدرسة الوطنية العليا للري.

**ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE L'HYDRAULIQUE**

**Abdellah ARBAOUI**

N° d'ordre .....

Série.....

**MEMOIRE DE MAGISTER**

**Option : Génie de l'eau**

**Thème**

**PREVISION DE L'ENVASEMENT DES BARRAGES PAR LA METHODE  
DES RESEAUX DE NEURONES : CAS DU BASSIN HYDROGRAPHIQUE  
ALGEROIS HODNA SOUMMAM**

Présenté par :

Chahrazed SALHI

Soutenu le 27 / 01 / 2011 devant le jury composé de :

<b>Président</b>	:	M. Mihoubi Mustapha Kamel	Maître de conférence. ENSH. Blida
<b>Directrice</b>	:	Mme Touaibia Bénina	Professeur. ENSH. Blida
<b>Examineurs</b>	:	M. Dechemi Nourredine	Professeur ENP. El Harrach
	:	Mme Souag Djouda	Maître de conférence USHB Bab Ezzouar
	:	M. Benlaoukli Bachir	Maître de conférence ENSH. Blida

**Année universitaire 2010/2011**

# Dédicaces

*A la mémoire de mon père qui m'a toujours aidé et soutenu  
A ma mère qui, avec ses sacrifices, ce travail a pu voir le jour*

*A mes frères Yacine, Amine et Tahar*

*A ma sœur Amina*

*A toute ma famille*

*A tout mes amis et collègues*

*A toutes les personnes qui m'ont aidé*

*Chahra*

## Remerciements

*Un remerciement particulier à ma promotrice, Madame Benina Touaibia, qui a accepté de diriger mon mémoire.*

*Je suis également très reconnaissante tout d'abord à Monsieur Nouredine Dechemi, enseignant à l'Ecole Nationale Polytechnique (E.N.P), pour sa contribution et ses conseils, Monsieur Bruno Henquin, Expert en télédétection, Monsieur Sid Aiet Kaci, Expert géologue, pour leur soutien et fourniture de données.*

*Mes vifs remerciements également à Monsieur Mohamed Lekhal, responsable à l'ONID, à qui je suis très reconnaissante pour son aide scientifique, son soutien moral et son encouragement.*

*Je tiens à remercier sincèrement Monsieur El Khadir Touaibia, responsable à l'ONID pour son aide et sa compréhension.*

*Un remerciement très sincère et particulier à Monsieur Nabil Meziani et Madame Nassima Méziani qui m'ont fournis des données et des documents très utiles pour rédiger mon travail.*

*Je remercie tout mes collègues et mes amis pour leurs collaborations, exceptionnellement Salima Meziani, Hind Raked, wassila Slimanou, Kamal Kichou et Ali Boudi, sans oublier Kenza Ladi, Nacira Yagouni et Naima Bouzid pour leur soutien moral.*

*Un merci particulier aussi à Monsieur Ayoub Zeroual, pour la qualité de sa collaboration, son aide constante et son soutien moral et à Monsieur Khaled Belouz, post graduant à l'Institut National d'Agronomie (I.N.A) pour sa collaboration.*

*Je témoigne ma gratitude à tout le personnel de l'Agence Nationale Hydraulique (A.N.R.H) de Blida et d'Alger et de l'Agence Nationale des Barrages et Transferts (A.N.B.T) pour m'avoir fournis les données nécessaires.*

*Un remerciement à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin*

SALHI.C

## Résumé

Ce travail se veut d'introduire le concept des réseaux de neurones pour estimer l'érosion spécifique dans des bassins versants en insuffisance voir en absence de données hydrométriques pour prédire l'envasement des barrages. La méthodologie adoptée consiste à estimer et à prédire le transport solide en vue d'une meilleure prise en charge du patrimoine sol – eau.

Deux méthodes statistiques ont été utilisées, l'une paramétrique, régression simple et ACP, l'autre non paramétrique : méthode des réseaux de neurones. Cette dernière a été utilisée afin de prédire l'érosion spécifique sur l'ensemble du bassin hydrographique Algérois-Hodna-Soumam en s'appuyant non seulement sur les données hydrométriques et pluviométriques des stations existantes mais aussi sur les caractéristiques hydromorphométriques et la couverture végétale des bassins versants au droit des sites de barrages et de retenues collinaires implantées dans la zone d'étude.

**Mots clés :** érosion spécifique, transport solide, envasement, barrages, Réseaux des Neurones, caractéristiques hydromorphométriques.

---

## Abstract

This work introduces a concept of neural network to estimate suspended sediment in catchments with a hydrometric data are absents for forecasting a silting of dams. The adopted methodology consists to estimate and to predict a suspended sediment fort the best dealt with of the inheritance water –Ground.

Two methods are used, the first one is parametric, linear regression and PCA, the second one is not parametric: a method of neural network, this last one is used to predict the specify erosion on the watershed of Algerois Hodna Soummam, supporting not only the hydrometric and pluviometric data, but also on the hydromorphometric characteristic and vegetable cover of catchments in the site of dams and small dams of the study space.

**Key- words :** érosion, suspended sédiment, siltation, dams, neurol network, hydromorphometric characteristic.

---

## ملخص

يهدف هذا العمل إلى إدخال مفهوم تقنية تعتمد على الذكاء الاصطناعي لتقدير انجراف التربة في أحواض المياه مع عدم كفاية أو عدم وجود بيانات الهيدرومترية لتنبؤ اطماء (تغرين) السدود. المنهجية المتبعة تعتمد على تقدير وتوقع نقل الرواسب، لإدارة أفضل للتراث التربة -- الماء. من أجل الوصول إلى الهدف المنشود، استخدمت طريقتين إحصائيتين، واحدة ذات عوامل وأخرى دون عوامل. هذه الأخيرة قد استخدمت لتنبؤ انجراف التربة في جميع أنحاء الحوض المائي الجزائر- الحضنة- الصومام اعتمادا ليس فقط على البيانات من محطات الهيدرومترية والأمطار موجودة ولكن أيضا على الخصائص الشكلية، المظهرية المائية و الغطاء النباتي للأحواض المائية لمواقع السدود الواقعة في منطقة الدراسة.

---

# Table des matières

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Etude bibliographique</b> .....	<b>5</b>
II.1 Méthode des réseaux de neurones .....	11
1. Historique.....	11
2. Définition d'un neurone .....	12
3. Définition du neurone formel.....	13
4. Modélisation d'un neurone formel (artificiel) .....	14
5. Caractéristiques des réseaux de neurones formels (artificiels) .....	15
6. Fonctionnement du neurone.....	16
7. Le neurone mathématique.....	16
8. Type de réseaux de neurones .....	17
9. Apprentissage des réseaux de neurones .....	18
10. Les règles d'apprentissage .....	21
11. Réseaux de neurones multicouches (Perceptron multicouches) .....	21
12. Résultats de simulation par les réseaux de neurones .....	23
II.2 Analyse en Composante Principale.....	25
1. Cadre d'application .....	25
2. Tableau des données .....	25
3. Nuage des individus .....	26
4. Nuage des variables .....	26
<b>Chapitre III : Présentation de la zone d'étude</b> .....	<b>29</b>
III.1 Caractéristiques physiques.....	29
1. Situation géographique .....	29
2. Caractéristiques de forme .....	31
3. Réseau hydrographique.....	32
3. Caractéristiques pédologiques .....	35
III.2 Caractéristiques hydroclimatiques .....	36
1. Pluviométrie .....	36
2. Température .....	37
4. Evapotranspiration .....	37
III.3 Données disponibles .....	37
1. Données pluviométriques.....	37
2. Données hydrométriques .....	39
3. Débits solides recueillis .....	41
III.4 ouvrages existants .....	42
1. Barrages .....	42
2. Description des barrages .....	45
3. Petits barrages, prises et dérivations .....	47
4. Retenues collinaires .....	50
<b>Chapitre IV : Collecte et critique des données</b> .....	<b>52</b>
IV.1 Choix des ouvrages.....	52
1. Choix des barrages, petits barrages et prises .....	52
2. Choix des retenues collinaires .....	52
IV.2 Caractéristiques hydromorphométriques .....	55

IV.3 Caractéristiques climatiques et hydrologiques .....	59
1. Précipitation .....	59
2. Hydrométrie .....	59
4. Analyse et traitement des données .....	63
IV.4 Couvert végétal .....	70
Conclusion .....	74
<b>Chapitre V : Modélisation de l'érosion spécifique par la méthode des réseaux de neurones.....</b>	<b>76</b>
V.1 Méthodes paramétriques .....	76
V.1.1 Application de la régression multiple .....	76
V.1.2 Application de la méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP) .....	77
V.2 Méthode non paramétrique .....	81
V.2.1 Application de la méthode des Réseaux de neurones (RNA) .....	81
V.3 Critères de validation .....	82
V.3.2 Erreur sur le bilan.....	83
V3. 3 L'erreur quadratique moyenne.....	83
V.4 Résultats et Interprétation .....	83
Conclusion .....	85
<b>Conclusion Générale.....</b>	<b>87</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>89</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>111</b>

## Liste des figures

<b>Figure II.1</b> : Schéma d'un neurone biologique	12
<b>Figure II.2</b> : Schéma du neurone formel	13
<b>Figure II.3</b> : Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel	14
<b>Figure II.4</b> : Fonctions de transferts les plus courantes	15
<b>Figure II.5</b> : Schéma du fonctionnement du neurone	16
<b>Figure II.6</b> : Schéma du fonctionnement du neurone mathématique	16
<b>Figure II.7</b> : Fonction Heaviside	17
<b>Figure II.8</b> : Réseaux non bouclés à couches	18
<b>Figure II.9</b> : Réseaux Bouclés	18
<b>Figure II.10</b> : Séparation linéaire entre la classe A et B	19
<b>Figure II.11</b> : Cercle de corrélation	27
<b>Figure III.1</b> : Situation générale du bassin hydrographique AHS	29
<b>Figure III.2</b> : Wilaya dans le bassin AHS	30
<b>Figure III.3</b> : Découpage du bassin Hydrographique AHS	31
<b>Figure III. 4</b> : Réseau hydrographique du bassin Algérois Hodna Soummam	32
<b>Figure III.5</b> : Graphique des longueurs des cours d'eau principaux du bassin hydrographique AHS	34
<b>Figure III.6</b> : Répartition du nombre des stations pluviométriques à travers le bassin	38
<b>Figure III.7</b> : Localisation des stations pluviométriques réparties dans le bassin AHS	39
<b>Figure III.8</b> : Répartition des postes hydrométriques à travers le bassin AHS	40
<b>Figure III.9</b> : Localisation des stations hydrométriques dans le bassin AHS	40
<b>Figure III.10</b> : Répartition des postes de mesure de débit sélectionnées à travers le bassin AHS	41
<b>Figure III.11</b> : Localisation des stations de mesure de débit sélectionnées dans le bassin AHS	42
<b>Figure III.12</b> : Localisation des barrages dans le bassin de l'AHS	44
<b>Figure III.13</b> : Localisation des petits barrages	49
<b>Figure IV.1</b> : Localisation des ouvrages retenus	54
<b>Figure IV.2</b> : Localisation des barrages, petits barrage et prises de dérivation avec leur réseau hydrographique	57
<b>Figure IV.3</b> : Orographie des S/bassins des barrages, petits barrages et prises de Dérivation	58
<b>Figure IV.4</b> : Emplacement des stations hydrométriques et pluviométriques des ouvrages	61
<b>Figure IV.5</b> : Ajustement a la loi Normale des composantes $C_1$ et $C_2$	66
<b>Figure IV.6</b> : Couvert végétal des S/bassins des barrages, petits barrages et prises de dérivation	71
<b>Figure IV.7</b> : Couvert végétal des sites des communes	72
<b>Figure V.1</b> : Projection des variables sur les cercles de corrélations $C_1 -C_2$ , $C_1-C_3$	78
<b>Figure V.2</b> : Projection des individus sur le plan $C_1- C_2$	79
<b>Figure V.3</b> : Projection des individus sur le plan $C_1 -C_3$	80
<b>Figure V. 4</b> : Architecture du modèle RNA	82
<b>Figure V.5</b> : Erosion simulée - Erosion observée	84
<b>Figure V.6</b> : Variation de l'érosion simulée et observée	84

## Liste des tableaux

<b>Tableau II.1</b> : Analogie entre le neurone biologique et ne neurone formel	14
<b>Tableau II.2</b> : Matrice des données brutes	25
<b>Tableau III.1</b> : Caractéristiques morphométriques de l'ensemble des bassins de l'AHS	32
<b>Tableau III.2</b> : Longueurs des cours d'eau principaux des bassins versants	33
<b>Tableau III.3</b> : Superficie des sols du bassin AHS par catégorie	36
<b>Tableau III.4</b> : Nombre des stations pluviométriques du bassin	38
<b>Tableau III.5</b> : Nombre des stations hydrométriques du bassin AHS	39
<b>Tableau III.6</b> : Nombre de stations de mesure de débit solide sélectionnées à travers le bassin AHS	41
<b>Tableau III.7</b> : Répartition des grands barrages en exploitation du bassin AHS	43
<b>Tableau III.8</b> : Caractéristiques des grands barrages du bassin AHS	43
<b>Tableau III.9</b> : Caractéristiques des petits barrages	47
<b>Tableau III.10</b> : Caractéristiques des prises et des dérivations	48
<b>Tableau III.11</b> : Nombre de retenues collinaires par wilaya	50
<b>Tableau IV.1</b> : Barrages, petits barrages et prises retenus	52
<b>Tableau IV.2</b> : Retenues collinaires retenues	53
<b>Tableau IV.3</b> : Caractéristiques hydromorphométriques des s/bassins des barrages, petits barrages et prises de dérivation	55
<b>Tableau IV.4</b> : Caractéristiques hydromorphométriques des s/bassins des retenues	56
<b>Tableau IV.5</b> : Caractéristiques des stations pluviométriques	59
<b>Tableau IV.6</b> : Caractéristiques des stations hydrométriques	60
<b>Tableau IV.7</b> : Lame écoulée : barrages, petits barrages et prises	62
<b>Tableau IV.8</b> : Lame écoulée : retenues collinaires	62
<b>Tableau IV.9</b> : Résultats de l'ACP	65
<b>Tableau IV.10</b> : Coefficient de corrélation multiple entre les variables X et les composantes $C_1$ et $C_2$	67
<b>Tableau IV.11</b> : Apport liquide interannuel des barrages, petits barrages et prises de Dérivation	67
<b>Tableau IV.12</b> : Apport solide interannuel des barrages, petits barrages et prises	68
<b>Tableau IV.13</b> : Levés bathymétriques des barrages	68
<b>Tableau IV.14</b> : Erosion spécifique des S/bassins des retenues collinaires	69
<b>Tableau IV.15</b> : Couvert végétal des S/bassins des barrages, petits barrages et prises en %	70
<b>Tableau IV.16</b> : Couvert végétal des S/bassins des retenues en %	73
<b>Tableau IV.17</b> : Résumé de caractéristiques des sites ouvrages retenues	74
<b>Tableau V.1</b> : Matrice des coefficients de corrélation	77
<b>Tableau V.2</b> : Valeurs propres, pourcentage de variance et cumul	77
<b>Tableau V.3</b> : Projection des variables sur les axes principaux	78
<b>Tableau V.4</b> : Paramètres de validation du modèle RNA	85
<b>Tableau V.5</b> : Paramètres statistiques	85

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

# Introduction générale

L'importance de l'eau en tant que support de vie et facteur régulateur du développement d'un pays est universellement reconnue ; Aussi il est nécessaire de la quantifier et de la gérer aussi rigoureusement que possible.

L'Algérie, selon un rapport du Conseil National Economique et Social (CNES) se situe parmi les pays les plus pauvres en matière de potentialités hydriques, soit en dessous du seuil théorique de rareté fixé par la Banque Mondiale à 1000 m<sup>3</sup> par habitant et par an. Estimé à environ 500 m<sup>3</sup> à l'heure actuelle, elle ne sera que de 430 m<sup>3</sup> en 2020 et serait encore plus réduite ramené aux ressources en eaux mobilisables.

L'accroissement de l'exploitation des ressources en eaux, en vue de satisfaire les divers besoins en eau potable, agricole et industrielle, incite à un besoin de connaissances aussi bien, du point de vue théorique que pratique, dans les domaines de l'érosion, du transport des sédiments dans les rivières et de l'envasement des retenues et des barrages

L'érosion hydrique est le facteur primordial à prendre en considération par les décideurs dans le domaine environnemental. Cet intérêt réside dans le fait que les impacts de ce phénomène aléatoire et récurrentielle peuvent toucher plusieurs domaines. L'érosion naturelle et anthropique entraîne l'ablation de matériaux solides des bassins versants, générant ainsi le transport solide dans les fleuves, et entraînant Les dépôts de sédiments dans les lacs et les barrages.

Les taux d'érosion dans le Maghreb sont parmi les plus élevés à l'échelle mondiale : ceci est dû au fait que toutes les conditions sont réunies pour le développement de ce phénomène, en particulier :

- les irrégularités et l'agressivité climatique élevées ;
- la nature géologique constitutive du substratum des bassins versants ; formations marneuses et calcaire-marneuses peu résistantes et sensibles à l'érosion ;
- la nature du réseau de drainage (relief, pente, densité, forme) ;
- la torrencialité des écoulements dans le réseau hydrographique ;
- la faible densité du couvert végétal ;
- la surexploitation des terres et les pratiques agricoles adoptées ;
- la déforestation, le défrichement et le surpâturage.

Les conséquences induites par le phénomène de l'érosion sont diversifiées et portent sur les aspects vitaux du développement économique. Ce sont, en particulier :

- \* l'appauvrissement des terres agricoles et de leur productivité ;
- \* le rehaussement des lits de cours d'eau et l'augmentation des risques d'inondation ;
- \* la menace pour les voies de communications ;

- \* l'envasement des retenues de barrages ainsi que de leurs ouvrages annexes (évacuateurs de crues, galerie de vidange de fond, canaux d'irrigation et de production hydroélectrique) ;
- \* l'eutrophisation des eaux de lacs et de retenues de barrages ;
- \* l'ensablement des infrastructures portuaires.

Le taux d'érosion spécifique en Algérie atteint les valeurs les plus importantes en Afrique du Nord, dépassant largement le seuil tolérable annuel (Touaibia 2005), ce qui provoque l'augmentation du transport solide et l'envasement croissant des barrages. Le problème d'envasement entraîne une perte importante de la capacité des ouvrages hydrauliques. Par conséquent, la mesure et surtout la prédiction de l'envasement des barrages et retenues collinaires présente un intérêt certain pour la gestion durable des ressources hydriques.

L'Algérie dispose actuellement de 113 barrages dont 52 grands barrages d'une capacité évaluée à 5 200 Hm<sup>3</sup>. Ces derniers reçoivent actuellement une quantité de vase estimée à 32 Hm<sup>3</sup>. Ce constat est général dans tout les pays du Maghreb. En Tunisie, les sédiments piégés occupaient, en l'an 2000, un volume de 450 millions de m<sup>3</sup>, soit environ 20% de la capacité initiale des ouvrages.

Pour y remédier, il est nécessaire en premier lieu, d'avoir un outil fiable qui puisse prédire le comportement de l'envasement dans l'espace et dans le temps. Ainsi, la présente étude vise à contribuer à la quantification du dépôt solide dans les barrages et retenues collinaires, basée sur la théorie des réseaux de neurones, cette dernière a prouvé sa fiabilité dans plusieurs domaines aussi bien que celui de l'hydrologie telle que la modélisation pluie- débit, modélisation des courbes de tarages, simulation des écoulements, modélisation du transport solide en suspension, .....etc.

Dans ce travail, la méthode des réseaux de neurones permet à partir des paramètres hydromorphométriques et climatiques des sous bassins des ouvrages (Barrages, retenues) de la zone d'étude (bassin hydrographique de l'Algérois Hodna Soummam), de quantifier et prédire l'érosion spécifique.

Pour aboutir aux objectifs visés, la démarche a été optée comme suit :

Après une introduction, le premier chapitre est consacré à l'étude bibliographique sur les travaux similaires réalisés dans ce domaine ;

Le deuxième chapitre développe la théorie des réseaux de neurones et l'Analyse en composantes Principales.

Le troisième chapitre présente la zone d'étude, il s'agit du bassin hydrographique de l'Algérois Hodna Soummam.

Le quatrième chapitre est consacré à la collecte et critique des données.

Le cinquième et dernier chapitre présente les résultats obtenus par la modélisation de l'érosion spécifique.

Une conclusion générale est présentée à la fin de ce travail.

# CHAPITRE I : ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

## Chapitre I : Etude bibliographique

Tous les barrages au monde sont exposés au phénomène de sédimentation, mais avec des vitesses différentes d'une région à une autre. Ce phénomène a été signalé aux états Unis, en Russie, à Taiwan, en Chine, en Iran, au Soudan et en Afrique du Nord.

Le contrôle de l'envasement des cuvettes des barrages permet d'une part, la surveillance des ouvrages, et la décision des mesures de protection à prendre, d'autre part en intégrant sur une longue période d'accumulation des sédiments, il conduit à une estimation globale des transports solides et des phénomènes d'érosion sur les bassins versants. La prévision des débits solides dans les cours d'eau est importante dans la vie des structures hydrauliques telles que les barrages.

Plusieurs études ont été effectuées dans le monde entier, pour la quantification du transport solide par différentes méthodes, des exemples sont cités dans ce qui suit :

**Chi Ted Yang et al (1998)** ont élaboré une étude intitulée « surface erosion, sediment transport and reservoir sedimentation », cette dernière a présenté une brève description d'une approche systématique et intégrée, fondée sur les équations de transport des sédiments et le taux d'énergie minimale, des exemples de résultats des calculs sont utilisés pour illustrer l'applicabilité des différents composants de cette approche.

En 1997, au cours du 19<sup>ème</sup> Congrès de la Commission International des Grands Barrages (CIGB), le comité de sédimentation a adopté une résolution encourageant tout les pays membre pour développer des méthodes de prévision du taux d'érosion de surface en se basant sur les précipitations et les propriétés du sol et développer des modèles numériques pour la prévision et la simulation du processus de sédimentations des réservoirs. Dans ce papier, les auteurs ont présenté une brève description d'une étude en cours en conformité avec les résolutions procédés à la CIGB. Des résultats préliminaires ont été présentés pour démontrer la faisabilité de l'approche systématique rationnelle pour la détermination du taux d'érosion de surface et le transport solide dans les rivières et la possibilité de développer un modèle de sédimentation d'un réservoir.

**Meddi et al (1998)** se sont penchés vers la contribution à l'étude du transport solide en Algérie du Nord. Dans cette étude, un modèle a été développé liant la dégradation spécifique au débit liquide moyen annuel et la superficie en utilisant les données des barrages Algériens, Tunisiens et Marocains ainsi que les données obtenues au niveau des stations hydrométriques Algériennes. Le modèle a été testé sur 10 stations hydrométriques où les données de la dégradation spécifique sont disponible, les résultats trouvés ont été satisfaisants et les erreurs sur l'estimation de la dégradation spécifique, pour les 10 stations sont inférieures à 10%.

**Touaibia et al (1999)** ont réalisé une étude sur l'approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales dans le bassin de l'Oued Mina. Cette approche a consisté d'une part à quantifier l'érosion à plusieurs échelles spatiales, au sens de la méthode Wischmeier, de la simulation de pluie de 1 et 87 m<sup>2</sup>, de micro bassins expérimentaux, de retenues collinaires et d'un barrage en exploitation, et d'autre part à rechercher un modèle régressif pouvant expliquer la relation débit solide – débit liquide pour les différentes formes d'érosion. Une zone de marnes du bassin de la Mina,

productive en sédiments pour un barrage en aval et représentant le 1/5 de la surface, a constitué la zone expérimentale. Les résultats ont montré que vu la complexité des facteurs mis en jeu, il est impossible d'extrapoler à différentes échelles. Le modèle puissance caractérise la relation débit liquide – débit solide quelques soit l'échelle spatiale considérée.

**Carvalho et al (2003)** ont réalisé une étude sur les changements climatiques prévus sur la planète qui vont augmenter l'évaporation et les précipitations et par conséquent les débits dans les cours d'eau, cette étude montre l'augmentation du processus d'érosion sur les versants et de sédimentation dans un barrage réservoir, ceci s'explique par les changements climatiques et les aménagements notamment anthropiques l'exploitation grandissante du milieu agricole.

En **2003**, **Touaibia et al**, ont mené une étude dite la contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi aride de l'Algérie septentrionale. L'objectif à atteindre était de déceler les zones productrices de sédiments en vu d'un aménagement anti érosif pour la préservation du barrage de Sidi M'hamed Benaouda et du périmètre d'irrigation à l'aval.

Une analyse en Composantes Principales et une régression multiple pas à pas ont permis d'approcher le phénomène par la recherche des relations fonctionnelles pouvant contribuer à l'expliquer et pouvant être transposées. Cette ébauche de cartographie par la méthode du krigeage a abouti a deux zones bien distinctes : l'une au nord du bassin, caractérisée par une érosion importante, dépassant 20 t/ha et l'autre au sud moins érodée.

Une autre étude a été menée par **Bouchelkia et al (2003)**. Ils se sont intéressés à l'étude du transport solide dans les cours d'eau d'un bassin versant situé dans le Nord Ouest du bassin algérien, évaluation de la masse de sédiment en suspension par des approches statistiques en dissociant les événements de crue en phase de montée et phase de descente, et ont discuter sur la représentativité des résultats en appliquant des tests statistiques ; méthode qui pourra servir à l'estimation de la quantité des sédiments entrant dans les barrages et réservoirs.

**Achite et al (2004)** ont présenté un travail sur l'estimation du transport solide dans le bassin-versant de l'Oued Haddad (Nord-Ouest algérien). L'approche méthodologique adoptée consiste à rechercher un modèle régressif pouvant expliquer le débit solide par le débit liquide mesuré au niveau de la station de Sidi Abdelakader El Djillali, en étudiant cette relation à différentes échelles : annuelle, saisonnière, mensuelle et journalière pour trouver la meilleure relation représentative du phénomène. L'ensemble des données disponibles couvre les années 1973/1974 à 1994/1995, soit 22 années. Les résultats montrent que le modèle puissance explique la plus grande partie de la variance (plus de 70 % de la variance). Les modèles obtenus à l'échelle journalière et instantanée (regroupés par mois) ont donné le meilleur coefficient de détermination. Le débit liquide explique, à ces échelles, la variation du débit solide dans le temps. Aussi, compte tenu de la disponibilité des données à l'échelle journalière, le transport solide a été évalué en utilisant le modèle ainsi obtenu à cette échelle. Ce résultat a confirmé ceux trouvés par différents chercheurs en Algérie et au Maroc.

Une autre étude a été réalisée par **Bouanani (2004)** intitulée « hydrologie, transport solide et modélisation, étude de quelques sous bassins de Tafna – NW Algérie ». Cette dernière a été menée sur les analyses hydrologiques et de transport des sédiments fluviaux du bassin de Tafna. Ces analyses ont été successivement réalisées pour développer un ensemble d'élément et d'outil de prise de décision pour une meilleure gestion hydraulique des principaux barrages de la Tafna (Beni Bahdal, Izdihar,

Boughrara et Sikkak). L'analyse quantitative et qualitative détaillée des débits liquides et des débits solides mesurés au niveau des quatre sous bassins représentatifs a permis de dégager des relations entre le transport solide des oueds et leur débit. Le développement des modèles pluie – débit, par l'utilisation de l'analyse corrélatoire et spectrale simple et croisée a été conduit. L'examen détaillé des relations entre les débits liquides et les débits solides instantanés puis saisonniers et celui des concentrations en fonction des débits de crue par l'utilisation des courbes hystérésis a permis d'identifier les principales classes d'évolution qui sont les courbes simples, dans le sens des aiguilles d'une montre puis dans le sens contraire et enfin en forme de huit. Le modèle en courbe simple est le plus fréquent, il traduit une action érosive instantanée et un transport solide des sédiments en suspension rapide, provoqué par des averses courtes et violentes sur des sols généralement secs, fragiles et peu protégés.

**Remini et al (2005)** se sont intéressés à la prévision de l'envasement dans les barrages du Maghreb. Dans cette étude, ces auteurs ont essayé d'obtenir une relation pratique de prévision d'envasement propre à la région du Maghreb en utilisant les données des levés bathymétriques des barrages.

Les potentialités de l'approche des Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) pour modéliser le transport solide sont explorées. Pour cela, plusieurs études similaires en utilisant cette méthode ont été menées à travers le monde entier.

**Ozgun Kisi (2005)** a élaboré une étude similaire, en Turquie, en vue de l'estimation des matières en suspension par des approches neuro floues et à base de réseaux de neurones. Ces modèles ont été établis pour estimer les valeurs de matières en suspension actuelles en fonction des données des écoulements actuelles et des matières en suspension antérieures.

Les approches de type courbe d'étalonnage sédimentaire et régression multi linéaire ont été appliquées aux mêmes données. Des mesures statistiques ont été utilisées pour évaluer les performances des modèles. Les données journalières d'écoulements et de matières en suspension de deux stations, Quebrada Blanca et Rion Valenciano gérées par le service géologique des Etats-Unis (USGS) ont servi de cas d'étude.

Un autre travail a été réalisé sur un bassin versant en USA appelé Juniata par **Murat Alp et al (2005)** pour la simulation du débit solide en suspension par deux algorithmes du réseau de neurones (rétropropagation non récurrent et Levenberg Marquardt) en utilisant les données hydrométéorologiques. Les paramètres utilisés dans cette étude sont : les précipitations, les débits liquides et les débits solides en suspension.

**Raveen K.Rai et al (2007)** se sont intéressés à l'événement de base de la variation temporelle de débit des sédiments d'un bassin versant en utilisant la méthode des réseaux de neurones. L'étude a été appliquée sur deux petits bassins versants à différentes caractéristiques climatiques et physiographiques. Le modèle utilise l'intensité de pluie, le ruissellement direct et le débit des sédiments en un temps antérieur.

En Turquie, une étude a été élaborée par **Mehmet Ardiçlioglu et al (2007)**. Elle a examiné la capacité de deux algorithmes de réseaux de neurones rétropropagation non récurrent et Levenberg Marquardt, à résoudre des problèmes complexes et a appliqué à la prévision des sédiments en suspension. Les données sur les écoulements des sédiments de suspension provenant de deux stations Palu et Cayagzi dans le bassin de Firat en Turquie ont été utilisées comme étude de cas.

Toujours dans le même pays et le même auteur, **Ozgur Kisi (2007)**, s'est intéressé cette fois-ci à l'estimation du débit solide en suspension par les RNA, en utilisant les prétraitements statistiques des données. Ces derniers tels que la corrélation sont utilisés pour identifier le vecteur d'entrée du modèle RNA le plus représentatif de l'estimation des sédiments d'un bassin.

Les données utilisées pour cette étude sont : les débits liquides et les sédiments des stations de Quebrada et Rio valenciano en USA.

En Tunisie, **Ayadi et al (2007)** ont réalisé une étude en vue d'une régionalisation de l'envasement des retenues collinaires dans la dorsale tunisienne, en utilisant la méthode de RNA. Cette étude a porté sur un échantillon de lacs collinaires situé en Tunisie centrale et vise à contribuer à la quantification du dépôt solide dans ces dernières.

La méthodologie adoptée combine une méthode paramétrée et non paramétrée. Dans sa première partie une méthode paramétrée cherche les facteurs explicatifs de l'envasement, parmi différents paramètres hydromorphométriques et climatiques des retenues en cas d'étude, en utilisant les composantes principales et l'analyse factorielle discriminante (AFD). En deuxième partie, la prédiction du taux d'abrasion ( $T_a$ ) est effectuée en utilisant la méthode des réseaux de neurones.

En vue de l'estimation de l'érosion du sol et les éléments nutritifs qui sont le phosphore (DP) dissous et de l'ammonium (N-NH<sub>4</sub>) présents dans les eaux des écoulements dans les terres agricoles, en utilisant la méthode des réseaux de neurones, une étude a été menée par **Minyoung Kin et John E.Gilley (2008)**, elle a été appliquée sur un site en USA (Lincoln Nesbrask). Les vecteurs d'entrée utilisées sont de nombre quatre, les précipitations, l'écoulement et deux autres paramètres chimiques qui sont le PH et la conductivité CE.

Une autre étude en Chine, élaborée par **Yun Mei Zhu et al (2008)**, a été consacrée à la modélisation des sédiments en suspension de la rivière de Longchuanjiang, en utilisant la méthode des réseaux de neurones, les entrées utilisées sont : la précipitation moyenne, la température, l'intensité de pluie et le débit liquide.

En Algérie, **Lefkir (2008)**, dans son étude, a appliqué deux approches sur des échelles de temps horaire et journalier pour la modélisation du transport solide par les modèles neuroflous.

La première approche est un modèle empirique de régression déduit du rapport entre l'écoulement observé et leurs valeurs de la concentration en matières en suspension.

Cette dernière utilise des termes flous tels que « faible », « moyen » et « élevé », pour décomposer le processus débit-MES en plusieurs sous ensembles flous et d'en déduire les quantités de matières solides en fonction du débit observé de la rivière.

Un travail a été réalisé par **Turgal Partal et al (2008)** afin d'estimer et prévoir les sédiments en suspension par la méthode des réseaux de neurones. La première partie est la prévision des sédiments en suspension en utilisant les sédiments antérieurs, la deuxième partie est la prévision des sédiments en suspension en utilisant les données des écoulements.

De nombreuses synthèses sur le processus érosif sont disponibles. Elles montrent que les périodes à risques correspondent à la conjonction d'une forte vulnérabilité des terres cultivées et d'une forte érosivité pluviale, toutes deux soumises à de grandes variabilités spatiale et temporelle. Les paramètres de l'érodibilité dépendent de la nature physico – chimique du sol et des états de surface.

La paramétrisation des processus est encore très empirique et de nombreux progrès théoriques restent à faire :

- Départ des sédiments et détermination des forces de cisaillement, de frottement et régime de transport dans la lame ruisselante ;
- Stabilité et entraînement des sédiments dans les rigoles et ravines.

**CHAPITRE II : PRÉSENTATION DES  
MÉTHODES : RÉSEAUX DE NEURONES  
ARTIFICIELS ET ACP**

## Chapitre II : Présentation des méthodes RNA et ACP

### II.1 Méthode des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels (RNA), constituent une nouvelle méthode d'approximation des systèmes complexes, particulièrement utiles lorsque ces derniers sont difficilement modélisables par les méthodes classiques.

Ils sont composés d'éléments simples (ou neurones) fonctionnant en parallèle. Ces éléments ont été fortement inspirés par le système nerveux biologique. Comme dans la nature, le fonctionnement du réseau (de neurones) est fortement influencé par la connexion des éléments entre eux.

Un réseau de neurones peut être entraîné pour une tâche spécifique (reconnaissance de caractères) en ajustant les valeurs des connexions (ou poids) entre les éléments (neurones).

Grâce à leurs capacités de classification et de généralisation, les réseaux de neurones sont généralement utilisés dans des problèmes de statistique. La représentation de ce système (modèle) est nécessairement simplificatrice, réductrice de la complexité naturelle et donc grossièrement inexacte.

Le modélisateur opère des choix de représentation du système en ne retenant que les aspects qui lui semblent les plus pertinents, pour tendre vers une solution la meilleure possible.

L'étude des réseaux de neurones est une voie prometteuse de l'intelligence artificielle, qui a trouvé des applications dans de nombreux domaines à savoir:

- Industrie : contrôle de qualité, diagnostic de panne, corrélation entre les données fournies par différents capteurs, analyse de signature ou d'écriture manuscrite.
- Finance : prévision et modélisation du marché (cours de monnaies,..), sélection d'investissement, attribution de crédits, estimation boursière.
- Environnement : évaluation des risques, analyse chimiques, prévision et modélisation météorologiques, gestion des ressources.
- Télécommunication et informatique : analyse du signal, élimination de bruit,..etc.
- Automobile : système de guidage automobile.
- Défense : guidage de missile, suivi de cible, reconnaissance de visage,...etc.
  
- Aérospatial : pilotage automobile, simulation du vol, ...etc.
  
- Mathématique : approximation d'une fonction inconnue.

### 1. Historique

Le principe des réseaux de neurones artificiels est né dans les années 40 à partir d'une analogie avec le système nerveux humain.

En 1943, deux chercheurs Mc CULLOCH et PITTS ont inventé le premier « neurone artificiel » qui correspondait à un produit d'un vecteur d'entrée et d'un vecteur poids suivi d'un élément de seuillage.

Ces deux chercheurs ont montré que ces réseaux de neurones formels peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes.

En 1949, D.HEBB, présente dans son ouvrage « the organization of Behavior » une règle d'apprentissage, de nombreux modèles de réseaux de neurones s'inspirent de la règle de HEBB.

En 1958, VON NEWMAN envisageait déjà la possibilité d'un réseau fiable formé de composants non fiables par utilisation de la redondance.

Dans la même période, ROSENBLATT (1958) a développé une méthode analytique rigoureuse d'adaptation de poids au sein d'un modèle multicouches appelé « le perceptron ». Il démontra la convergence d'un algorithme itératif d'adaptation des poids pour la classe élémentaire des perceptrons monocouches.

B.WIDROW et HOFF (1960) développèrent un nouveau modèle neuronal, l'Adaline (Adaptive linéar neurone). Ce modèle avait la même structure que le perceptron mais intègre un algorithme destiné à l'approximation de fonctions, et il sera par la suite le modèle de base des réseaux multicouches.

M.MINSKY et S.PAPERT (1969) publièrent une critique des propriétés du perceptron entraînant une grande incidence sur la recherche dans ce domaine.

Elle va fortement diminuer jusqu'en 1972 où T.KAHONEN présente ses travaux à la reconnaissance des formes.

C'est en 1982 que le physicien J.HOPFIELD puis GROSSBERG en 1987 ont pu résoudre pour la première fois le problème de stabilité dynamique des réseaux.

En 1986, une équipe de chercheurs dirigée par RUMELHART a pu concevoir un nouvel algorithme d'apprentissage, constitué d'un ensemble de couches (appelé perceptron multicouches). Sa principale caractéristique est l'approximation de la fonction non linéaire, par rétropropagation de gradient (Back propagation).

## 2. Définition d'un neurone

Le neurone est l'unité de base du système nerveux, et peut présenter certaines différences fonctionnelles selon les espèces.

Du point de vu anatomique, le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former les dendrites, c'est par ces dendrites que les informations sont acheminées à l'extérieur vers le soma (Figure II.1).

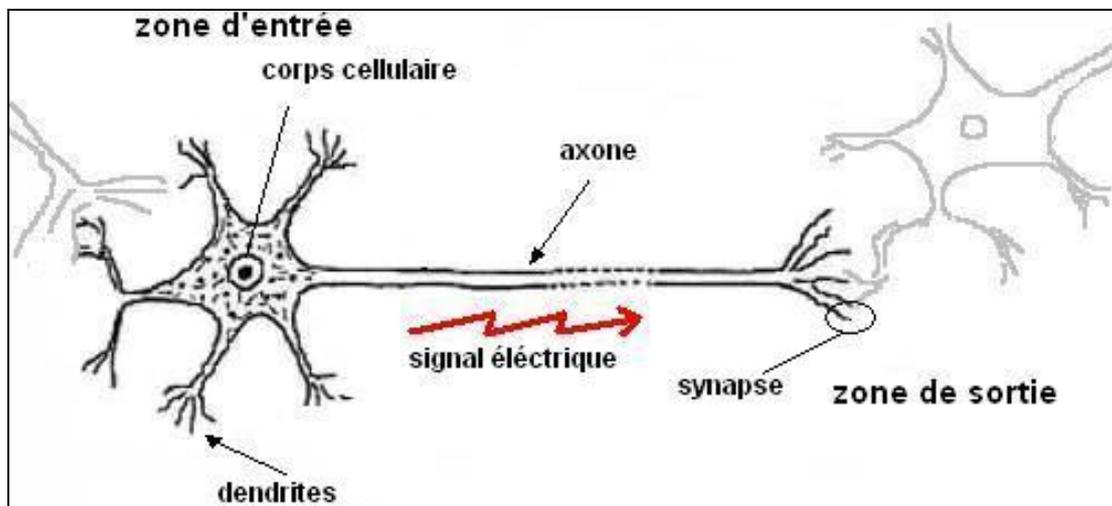


Figure II.1 : Schéma d'un neurone biologique

Le neurone est structuré en 4 régions à savoir :

### - Le corps cellulaire

Il contient le noyau du neurone ainsi que la machine biochimique nécessaire à la synthèse des enzymes, ce corps cellulaire de forme sphérique ou pyramidale contient aussi les autres molécules essentielles à la vie de la cellule, sa taille est de quelques microns de diamètre.

- **Les dendrites**

Ce sont de fines extensions tubulaires qui se ramifient autour du neurone et forment une sorte de vaste arborescence, les signaux envoyés au neurone sont captés par les dendrites, leur taille est de quelques dizaines de microns de longueur.

- **L'axone**

C'est le long de l'axone que les signaux partent du neurone, contrairement aux dendrites qui se ramifient autour du neurone, l'axone est plus long et se ramifie à son extrémité où il se connecte aux dendrites des autres neurones, sa taille peut varier entre quelques millimètres à plusieurs mètres.

- **Synapse**

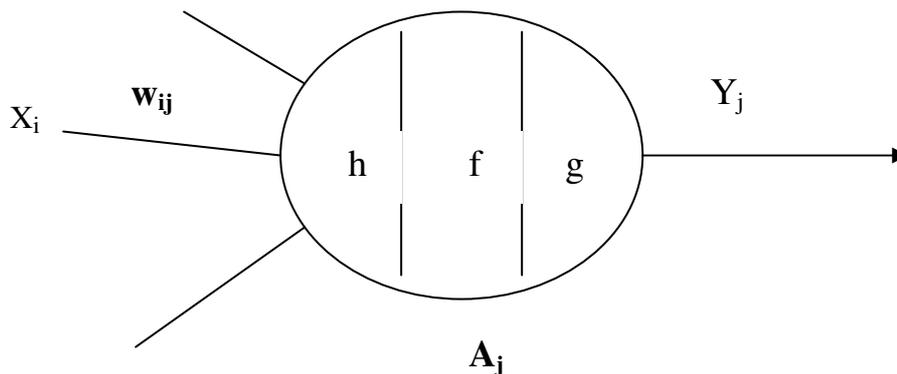
Une synapse est une jonction entre deux neurones, et généralement entre l'axone d'un neurone et un dendrite d'un autre neurone (mais il existe aussi des synapses axo-axonales par exemple).

**3. Définition du neurone formel**

**Une définition générale :** processeur qui applique une opération simple à ses entrées et que l'on peut relier à d'autres pour former un réseau qui peut réaliser une relation entrée - sortie quelconque.

**Définition usuelle :** processeur très simple qui calcule une somme pondérée et qui applique à cette somme une fonction de transfert non linéaire (échelon, sigmoïde, gaussienne,.....)

Le premier neurone formel est apparu en 1943, on le doit à Mac Culoch et Pitts (Figure II.2).



**Figure II.2 :** Schéma du neurone formel

Où :

$X_i$  : Entrée du neurone ;

$A_i$  : Activation du neurone ;

$Y_i$  : Sortie du neurone ;

$w_{ij}$  : Poids (synaptiques) ;

$h$  : Fonction d'entrée ;

$f$  : Fonction d'activation ou de transfert ;

$g$  : Fonction de sortie.

$$A_j = f(h(X_i, \{w_{ij}, i = 0 \text{ à } k\}))$$

$$Y_j = g(A_j) \text{ (} A_j \text{ le plus souvent)}$$

La combinaison (h,f,g) définit le type de neurone

#### 4. Modélisation d'un neurone formel (artificiel)

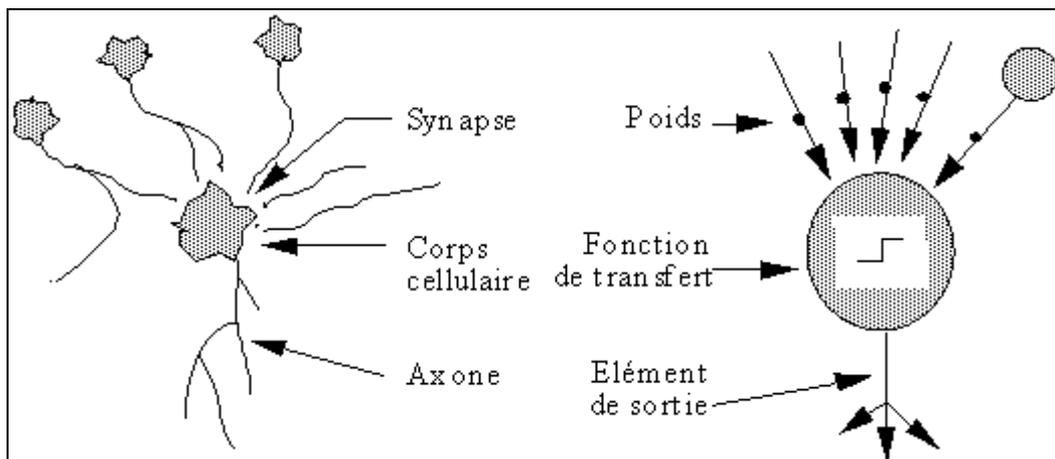
Les réseaux de neurones formels sont à l'origine d'une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. Les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de MM. Mac Culloch et Pitts, ils représentent un modèle assez simple pour les neurones et explorent les possibilités de ce modèle.

La modélisation consiste à mettre en œuvre un système de réseaux neuronaux sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que d'après le principe biologique, une correspondance pour chaque élément composant le neurone biologique aura lieu, donc une modélisation pour chacun d'entre eux.

Cette Modélisation est résumée par le tableau II.1 et illustrée en figure II.3, cela permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel.

**Tableau II.1** : Analogie entre le neurone biologique et ne neurone formel

Neurone biologique	Neurone artificiel
Synapses	Poids de connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrite	Signal d'entrée
Somma	Fonction d'activation



**Figure II.3** : Mise en correspondance neurone biologique / neurone artificiel

- 1- **Les entrées** : elles peuvent être
  - Booléennes
  - Binaires (0,1) ou bipolaires (-1,1)
  - Réelles
- 2- **Fonction d'activation** : cette fonction permet de définir l'état interne du neurone en fonction de son entrée totale.

## 5. Caractéristiques des réseaux de neurones formels (artificiels)

Les caractéristiques des réseaux de neurones sont :

1. Poids « w », et le biais « b »
2. **La fonction sommation** : une unité d'addition  $\sum_{i=1}^m w_{ij} X_i$  qui effectue une somme pondérée des entrées  $X_i$  par poids des connexions ( $w_{ij}$ ,  $i=1,m$ ) .  $w_{ij}$  est le poids de la connexion lie l'entrée  $X_i$  au neurone  $n_j$  est  $w_{ij}$  est négatif, si  $X_i$  doit la diminuer.
3. **Fonction d'activation (ou de transfert)** : une fonction d'activation ( $f_i$ ) qui sert à limiter la sortie du neurone  $n_j$  dans un intervalle prédéfini et/ou augmenter la non linéarité du neurone, le modèle du neurone peut inclure une valeur limite appelée seuil, ce terme seuil est préféré au terme biais couramment utilisé.

Il existe de nombreuses formes possibles pour la fonction de transfert, les plus courantes sont présentées en figure II.4 :

Nom de la fonction	Relation d'entrée/sortie	Icône
seuil	$a = 0$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
seuil symétrique	$a = -1$ si $n < 0$ $a = 1$ si $n \geq 0$	
linéaire	$a = n$	
linéaire saturée	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $0 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
linéaire saturée symétrique	$a = -1$ si $n < -1$ $a = n$ si $-1 \leq n \leq 1$ $a = 1$ si $n > 1$	
linéaire positive	$a = 0$ si $n < 0$ $a = n$ si $n \geq 0$	
log - sigmoïde	$a = \frac{1}{1+\exp^{-n}}$	
tangente hyperbolique sigmoïde	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$	
compétitive	$a = 1$ si $n$ maximum $a = 0$ autrement	

Figure II.4 : Fonctions de transferts les plus courantes ( $a = f(n)$ )

## 6. Fonctionnement du neurone

Un neurone reçoit des impulsions de ses voisins (des autres neurones) par l'intermédiaire des « dendrites », il y aura une sommation au niveau du corps cellulaire de toutes ces informations (signaux), si la somme des signaux dépasse un certain seuil, il renvoie un signal vers d'autres neurones, par l'intermédiaire de son « axone ». Ce mécanisme complexifie la façon dont les informations sont transmises : un neurone ne se borne pas à faire passer l'information, il la filtre (Figure II.5).

Pour résumer, un neurone peut être schématisé ainsi : il fait la somme de toutes les informations qu'il reçoit, et il émet un signal à condition que la somme soit suffisamment élevée.

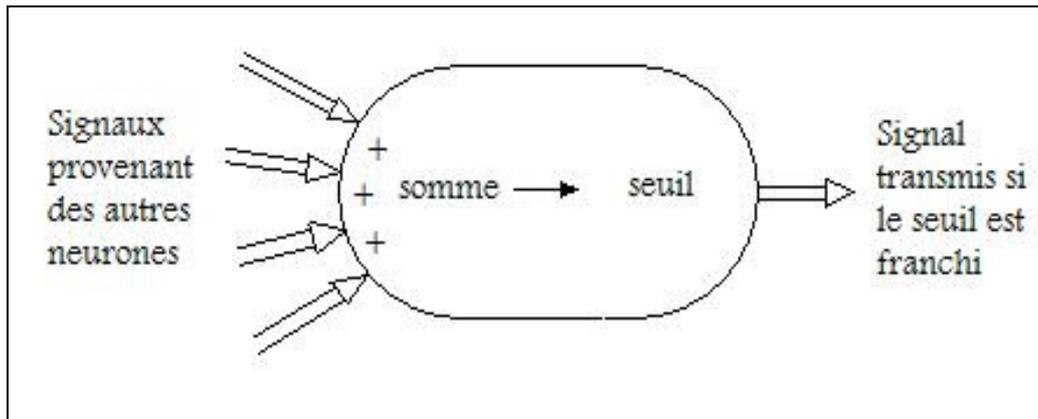


Figure II.5 : Schéma du fonctionnement du neurone

## 7. Le neurone mathématique

Les neurones ont un fonctionnement assez simple et applicable en mathématique, faire la somme des informations qui lui sont fournies et appliquer un seuil.

Pour schématiser cela, on admet que les entrées (les informations que le neurone reçoit) ne peuvent valoir que « 0 » ou « 1 », cela correspond aux signaux électriques fournies par les neurones voisins (Figure II.6).

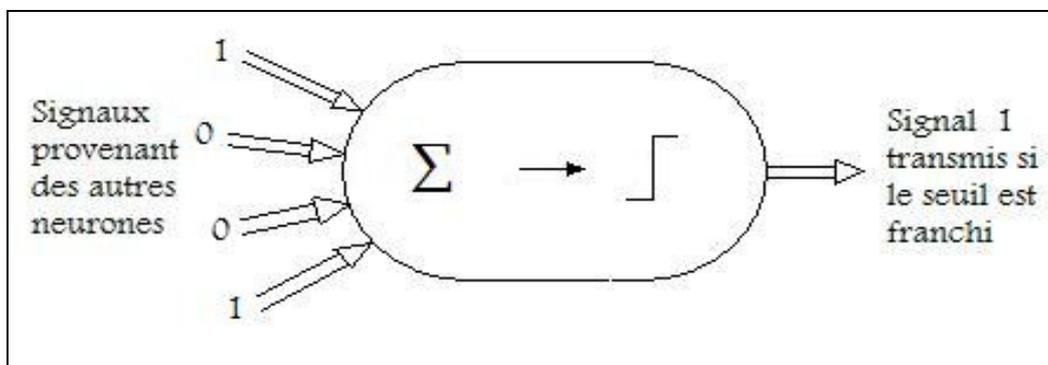


Figure II.6 : Schéma du fonctionnement du neurone mathématique

Pour un nombre compris entré ( $j=1$ ) et un nombre quelconque  $n$ , le neurone formel va calculer la somme de ses entrées ( $X_1, \dots, X_n$ ), pondérées par les poids synaptiques ( $w_1, \dots, w_n$ ) et la comparer à son seuil. Si le résultat est supérieur au seuil alors la valeur renvoyée est « 1 », sinon la valeur renvoyée est « 0 ».

Le seuil est représenté par une fonction Heaviside (Figure II.7)

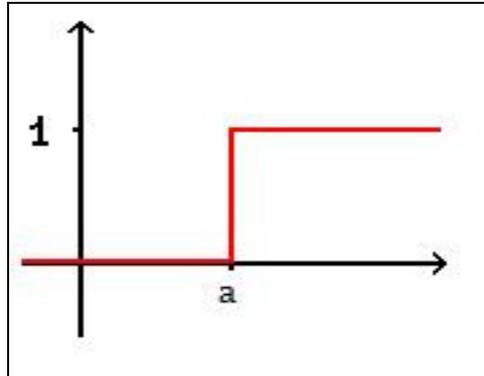


Figure II.7 : Fonction Heaviside

Où la fonction Heaviside est définie par :

$$a = f(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{II.1})$$

## 8. Type de réseaux de neurones

Les réseaux de neurones sont classés en deux grandes familles :

- Réseaux non bouclés
- Réseaux bouclés

### 8.1 Réseaux non bouclés

Ils sont utilisés en classification, dans la reconnaissance de formes (caractères, paroles, ...) et en prédiction.

Les neurones peuvent être ordonnés d'une façon telle qu'il n'y a aucune connexion « vers l'arrière ». L'information se propage de couche en couche sans retour en arrière possible (terme anglais « Feed Forward » neural network) appelé aussi « réseau perceptron » où le temps n'intervient pas comme variable fonctionnelle (c'est-à-dire n'a pas de mémoire et ses sorties ne dépendent pas de son passé) (Figure II.8).

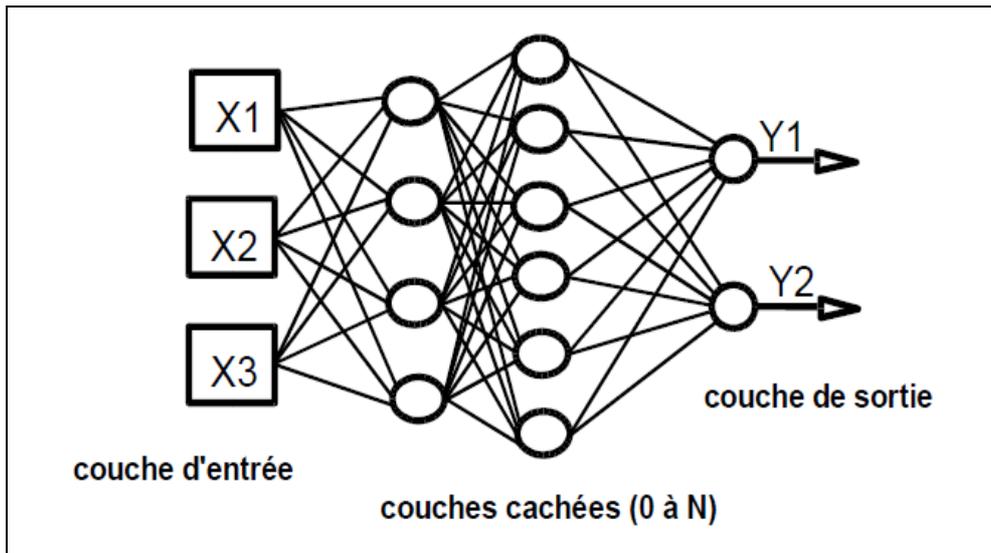


Figure II.8 : Réseaux non bouclés a couches

## 8.2 Réseaux bouclés

Ils sont utilisés comme mémoire associative (Hopfield, réseaux à attracteurs) ou pour des tâches de traitement du signal de commande (Feed Back) appelé aussi « réseaux récurrents » réseaux dont lesquels il y a retour de l'information ( Figure II.9 ).

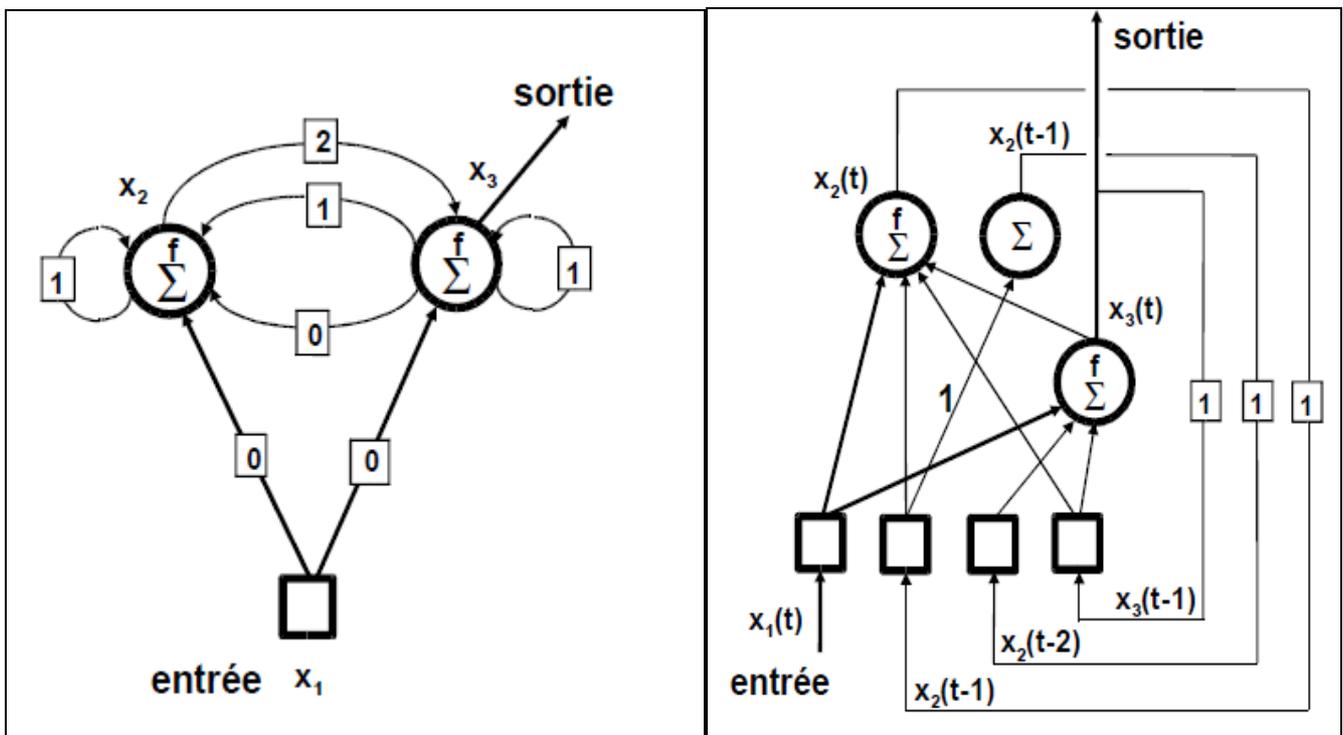


Figure II.9 : Réseaux Bouclés

## 9. Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage est une procédure adaptative pour laquelle les connexions (synapses) des neurones sont ajustées face à une source d'information ( RUMELHART et al, 1986).

## 9.1 Définition

C'est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau en réaction avec les simulées qu'il reçoit de son environnement, le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les changements de paramètres surviennent.

L'objectif de l'apprentissage (Hinton, 1989), est de fournir une méthode au réseau afin qu'il puisse ajuster ces paramètres lorsque des exemplaires à traiter lui sont présentés.

## 9.2 Types d'apprentissage

Il existe plusieurs règles d'apprentissage :

### 1. Le mode supervisé

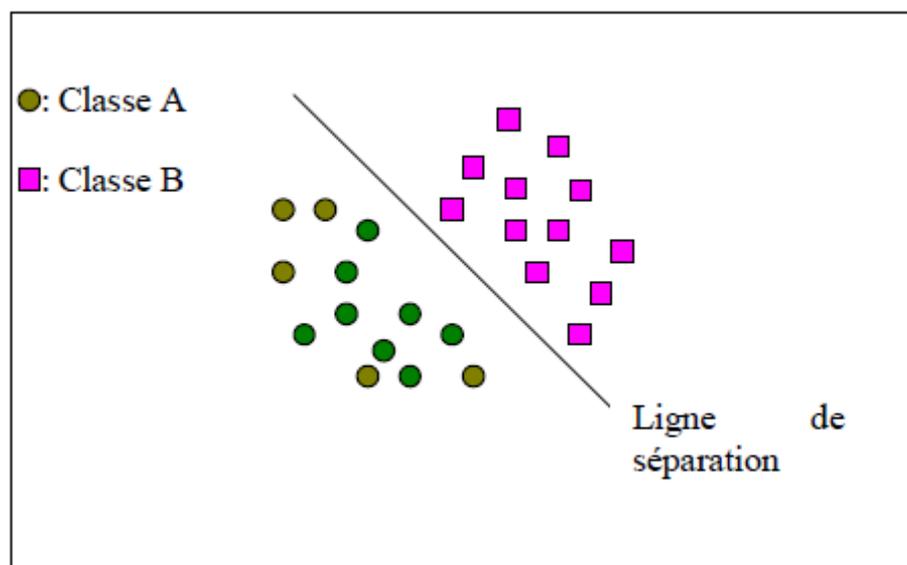
Dans ce type d'apprentissage, le réseau s'adapte par comparaison entre le résultat qu'il a calculé, en fonction des entrées fournies, et la réponse attendue en sortie. Ainsi, le réseau va se modifier jusqu'à ce qu'il trouve la bonne sortie, c'est-à-dire celle attendue, correspondant à une entrée donnée.

- **Les réseaux de neurones basés sur la décision**

- **Le Perceptron et l'Adaline (Perceptron simple)**

Ce type de réseau effectue la séparation entre deux zones de l'espace. La position de l'hyperplan séparant ces deux régions, constitue les contours de décision. L'Adaline (ADAPTative LInear NEurone) est une extension du Perceptron (simple). L'idée est de remplacer la fonction « seuil » sur les neurones de sortie par la fonction « identité » ( $f(x)=x$ ). L'avantage de cette approche est de ne plus être restreinte à une réponse binaire, mais d'offrir tout l'éventail de valeurs possibles.

Les modèles des neurones utilisés dans le Perceptron et l'Adaline sont des modèles linéaires  
Séparation linéaire : deux classe A et B sont linéairement séparé, si ils sont séparés par une droite coupant le plan en deux (Figure II.10)



**Figure II.10** : Séparation linéaire entre la classe A et B

Widrow (1960) a proposé une solution qui évite l'estimation de l'espérance, pour cela, l'algorithme agit à la présentation de chaque exemple en entrée, ainsi, l'algorithme estime la trajectoire à prendre vers le point minimum à chaque présentation d'un vecteur d'entrée, appelée méthode de descente du gradient.

• **Méthode de Descente du Gradient**

Cette méthode consiste à déterminer les adaptations qu'il faut apporter aux vecteurs des poids synaptiques à chaque présentation d'une entrée, afin de faire décroître l'erreur de sortie jusqu'à obtention de la solution optimale.

L'algorithme proposé par Widrow permet d'estimer la trajectoire à prendre vers le point minimum à chaque présentation d'entrée. Ainsi à chaque vecteur présenté, une surface d'erreur est enregistrée, le gradient en fonction des poids synaptiques est estimé, et modifiant ces poids pour faire décroître l'erreur, c'est la méthode du Delta, de cette manière, le gradient ne pointera que le minimum instantané à chaque étape.

L'erreur quadratique instantanée à chaque étape est :

$$E^k = \frac{1}{2} (e^k)^2 = \frac{1}{2} (d^k - y^k)^2 \tag{II.2}$$

Avec :

$E^k$  : Fonction quadratique ;

$e^k$  : Fonction objectif ;

$d^k$  : Valeurs observées ;

$y^k$  : Valeurs simulées par le réseau de neurones.

Afin de progresser dans le sens opposé du gradient :

$$W_{ij}^{k+1} = W_{ij}^k + \eta_k (d_i^k - y_i^k) x_j^k \tag{II.3}$$

Avec :

$w_{ij}$  : Poids ou coefficients ;

$\eta_k$  : Taux d'apprentissage ; son rôle est de réguler la vitesse de convergence et contrôler la stabilité de ce processus. Cependant, les réseaux de neurones basés sur la décision représentent un approximateur linéaire et sont donc limités aux fonctions linéaires.

• **Le renforcement**

Le renforcement est en fait une sorte d'apprentissage supervisé et certains auteurs le classe d'ailleurs dans la catégorie des modes supervisés, dans cette approche, le réseau doit apprendre la corrélation entrée/sortie via une estimation de son erreur, c'est-à-dire du rapport échec/succès, le réseau va donc tendre à maximiser un index de performance qui lui est fourni, appelé signal de renforcement, le système étant capable ici, de savoir si la réponse qu'il fournit est correcte ou non, mais il ne connaît pas la bonne réponse.

**2. Le mode non supervisé (ou auto-organisationnel)**

Dans ce cas, l'apprentissage est basé sur des probabilités, le réseau va se modifier en fonction des régularités statistiques de l'entrée et établir des catégories, en attribuant et en optimisant une valeur de qualité, aux catégories reconnues.

**3. Le mode hybride**

Le mode hybride reprend en fait les deux autres approches, puisque une partie des poids va être déterminée par apprentissage supervisé et l'autre partie par apprentissage non supervisé.

## 10. Les règles d'apprentissage

### 10.1 Règle de correction d'erreurs

Cette règle s'inscrit dans le modèle d'apprentissage supervisé, c'est -à-dire dans le cas où l'on fournit au réseau une entrée et la sortie correspondante, si y est considéré comme étant la sortie calculée par le réseau, et la sortie désirée, le principe de cette règle est d'utiliser l'erreur (d-y), afin de modifier les connexions et de diminuer ainsi l'erreur globale du système. Le réseau va donc s'adapter jusqu'à ce que y soit égal à d, ce principe est notamment utilisé dans le modèle du perceptron simple.

### 10.2 Apprentissage de Boltzmann

Les réseaux de Boltzmann sont des réseaux symétriques récurrents, ils possèdent deux sous-groupes de cellules, le premier étant relié à l'environnement (cellules dites visibles) et le second ne l'étant pas (cellules dites cachées). Cette règle d'apprentissage est de type stochastique (qui relève partiellement du hasard) et elle consiste à ajuster les poids des connexions, de telle sorte que l'état des cellules visibles satisfasse une distribution probabiliste souhaitée.

### 10.3 Règles de Hebb

Cette règle, basée sur des données biologiques, modélise le fait que si des neurones, de part et d'autre d'une synapse, sont activés de façon synchrone et répétée, la force de la connexion synaptique va aller croissant. Il est à noter ici que l'apprentissage est localisé, c'est-à-dire que la modification d'un poids synaptique  $w_{ij}$  ne dépend que de l'activation d'un neurone i et d'un autre neurone j.

### 10.4 Règle d'apprentissage par compétitions

La particularité de cette règle, est que l'apprentissage ne concerne qu'un seul neurone, le principe est de regrouper les données en catégories, les patrons similaires vont donc être rangés dans une même classe, en se basant sur les corrélations des données, et seront représentés par un seul neurone, c'est le « winner-take-all ».

Dans un réseau à compétition simple, chaque neurone de sortie est connecté aux neurones de la couche d'entrée, aux autres cellules de la couche de sortie (connexions inhibitrices) et à elle-même (connexion excitatrice), la sortie va dépendre de la compétition entre les connexions inhibitrices et excitatrices.

## 11. Réseaux de neurones multicouches (Perceptron multicouches)

Vers le début des années quatre vingt, avec l'essor qu'ont connu les réseaux de neurones artificiels notamment par la vulgarisation de l'algorithme de rétrogradation de l'erreur (Backpropagation) (Rumelhart et al, 1986), ce modèle constitué de plusieurs couches (appelé Perceptron multicouche) a permis l'émergence de toute une catégorie de classe de réseaux de neurones, dont la propriété reste l'approximation non linéaire.

### 11.1 Algorithmes d'apprentissage

Pour les réseaux de neurones, les algorithmes les plus utilisés, sont les modèles d'optimisation non linéaires par rapport aux paramètres, les vecteurs des entrées et de la sortie sont centrés :

$$Y = f(X, \theta) + \omega \quad (\text{II.4})$$

Avec :

f : Fonction de régression (d'activation) ;

Y : Vecteur de sortie ;

X : Vecteur d'entrée ;

$\theta, \omega$  : Paramètres.

Ces modèles utilisent des méthodes itératives pour obtenir une estimation des paramètres, leur principe est de se placer en un point, de trouver une direction de descente du coût dans l'espace des paramètres  $\theta$ , et de se déplacer d'un pas suivant cette direction, on poursuit cette démarche jusqu'à satisfaction de ce critère d'arrêt (Dreyfus et al., 2004).

### 11.2 La backporagation

C'est Werbos (1974), qui a été le premier à mettre en œuvre, cet algorithme avec notamment, son fondement mathématique, il avait appelé cette méthode The Dynamic Algorithm Feed-back (Werbos, 1990). Son initiative resta cependant sans succès.

En 1986 un groupe de chercheurs de l'université de Standford (Etats Unis) Rumelhart, Hinton et Williams, l'ont développé et l'ont complètement adapté aux réseaux multicouches ; Cet algorithme a été publié dans leur ouvrage sur les processus distribués parallèles (Parallel Distributed Processing) (Rumelhart et al, 1986), ils ont appelé la méthode Backpropagation en référence à l'erreur qui se rétropropage, à travers les couches du réseau (Yeddou, 1998). Il s'agit d'une méthode d'apprentissage supervisé, fondée sur la modification des poids du réseau dans le sens contraire à celui du gradient de l'erreur par rapport à ces poids.

### 11.3 Méthodes d'optimisation avec la Backprogataion

Dans cette étude deux méthodes sont présentées, celle de Newton et celle de Levenberg-Marquardt, qui est une méthode d'optimisation du second ordre, cette dernière est basée sur l'utilisation de la dérivée seconde de la fonction de coût (fonction objectif) par rapport aux poids, l'introduction de la matrice Hessien H informe sur la forme de la surface d'erreur dans l'espace des poids.

- **Méthode de Newton**

La méthode de Newton utilise la courbure (dérivée seconde) de la fonction de coût pour atteindre le minimum plus rapidement, elle consiste à minimiser la fonction d'énergie :

$$Q(s) = J_k(w_k) + \frac{1}{2} g(w_k)^T + \frac{1}{2} s^T H(w_k) s \tag{II.5}$$

Avec:

$$w_{k+1} - w_k = s ;$$

$$g(w_k) = \nabla_w J \quad ; \text{ Gradient ;}$$

$$H(w_k) = \nabla_w^2 J \quad ; \text{ Hessien ;}$$

w : Matrice de l'ensemble des poids.

La méthode de Newton consiste à calculer  $w_{k+1}$  de manière à minimiser  $Q(s)$  de l'équation (II.5). La formule itérative se déduit telle que :

$$w_{k+1} = w_k - [H(w_k)]^{-1} g(w_k) \tag{II.6}$$

Le minimum existe si le Hessien H est défini positif. La méthode de Newton nécessite le calcul du vecteur gradient et de l'inverse du Hessien de la fonction coût, dans ce cas :

$$p_k = -H_k^{-1} g_k \quad \text{et} \quad \alpha_k = 1$$

Avec :

$p_k$  : Direction de la descente ;

$\alpha_k$  : Pas variable.

Pour une fonction non linéaire quelconque, cette méthode ne converge pas nécessairement vers un minimum global. De plus, si le poids de départ  $w_0$  est initié trop loin du minimum, la méthode ne converge pas.

Pour améliorer les propriétés de convergence de la méthode de Newton, de nombreuses méthodes vont porter sur la reformulation de :

$$w_{k+1} - w_k = s_k \text{ et } s_k = \alpha_k p_k$$

• **Méthode de Levenberg-Marquardt**

Cette méthode consiste à considérer la surface d'erreur quadratique, en se basant sur la fonction d'énergie (II.5).

En posant pour chaque neurone  $i$  d'une couche  $l$ , le vecteur de poids lui parvenant des neurones de la couche qui le précède, et qui inclue en plus le biais :

$$W_i^l = [w_{i1}^l, w_{i2}^l \dots w_{i_{n-1}}^l, \theta_i^l] \tag{II.7}$$

Soient  $F_i^L$ : les vecteurs des dérivées de l'erreur à la sortie du réseau par rapport à ces vecteurs poids  $w_i^l$ ,  $l=1\dots L$ ,  $i=1 \dots n_l$

$$F_i^L = \sum_{p=1}^M \sum_{i=1}^{n_l} (d_i^p - y_i^L) \left[ -\frac{\partial y_i^L}{\partial W_i^l} \right] \tag{II.8}$$

Avec :

- $M$  : Nombre d'entraînement ;
- $n_l$  : Nombre de neurones dans la couche  $l$  ;
- $y_i^L$  : La  $i$ ème sortie du réseau,
- $d_i^p$  : Sortie désirée pour la  $P$  ième entrée.

Soit  $F$  : Vecteur rassemblant des vecteurs  $F_i^L$ . Pour trouver l'optimum on a :

$$H \Delta w = -F \tag{II.9}$$

$H$  représente la matrice Hessien de la fonction erreur en sortie, la méthode de Levenberg-Marquardt remplace le calcul du Hessien par une approximation numérique donnée par :

$$H = FFT + \lambda \Omega \tag{II.10}$$

Avec :

- $H$  : Valeur du calcul Hessien ;
- $FFT$  : Matrice positive qui sert à conditionner la matrice  $H$  ;
- $\Omega$  : Matrice diagonale définie positive ;
- $\lambda$  : Coefficient positif.

**12. Résultats de simulation par les réseaux de neurones**

La simulation d'un processus par les réseaux de neurones requiert une certaine connaissance quant aux différents modèles et algorithmes que caractérisent ces réseaux.

Cette différenciation peut être résumée en :

### 12.1 Choix d'un réseau de neurones

Il existe un grand nombre de types de réseaux de neurones, avec pour chacun des avantages et des inconvénients (Lippman, 1987). Le choix d'un réseau peut dépendre :

- De la tâche à effectuer (classification, association, contrôle de processus, séparation aveugle de sources...);
- De la nature des données ;
- D'éventuelles contraintes d'utilisation en temps réel :(certains types de réseaux de neurones, tels que « la machine de Boltzmann » nécessitant des tirages aléatoires et un nombre de cycles de calculs important, et présentent plus de contraintes que d'autres réseaux pour une utilisation en temps réel.

### 12.2 Choix du nombre d'unités cachées

Le nombre d'unités cachées (neurones dans les couches cachées) joue un rôle crucial dans le contrôle de la capacité du réseau de neurones. Si la valeur de ce nombre est trop petite, alors le réseau possède trop peu de paramètres, il ne peut capter toutes les dépendances qui servent à modéliser et prédire les valeurs du processus observé. À l'inverse, si l'on choisit une valeur trop grande, alors le nombre de paramètres du modèle augmente et il devient possible, pendant la phase d'optimisation des paramètres, de modéliser certaines relations qui ne sont que le fruit de fluctuations statistiques propres à l'ensemble d'entraînement utilisé plutôt que des relations fondamentales de dépendance entre les variables.

### 12.3 Paramètres d'apprentissage

Le choix des paramètres d'un algorithme d'apprentissage influe beaucoup sur la rapidité des calculs. Dans le cas de l'algorithme de rétropropagation, le calcul du gradient consiste à définir, dans un espace contenant autant de dimensions qu'il y a de poids, la direction dans laquelle doit s'effectuer la modification des poids. Le principe de descente de gradient consiste alors à effectuer de manière itérative (pas par pas) une modification des poids suivant cette direction jusqu'à arriver à un minimum sur la fonction de coût représentant l'écart entre les sorties obtenues celles de référence. Autrement dit, un réseau de neurones peut apprendre par cœur un ensemble d'entraînement. Afin de s'assurer que le réseau de neurones s'en tient aux relations fondamentales de dépendance, en plus de l'ensemble d'entraînement, un second appelé ensemble de validation est utilisé à la fin de chaque époque d'entraînement, seulement l'erreur d'entraînement est mesurée aussi bien que l'erreur de validation, c'est à dire l'erreur totale commise sur tous les exemples de l'ensemble de validation. Cette erreur est calculée une fois que la phase d'optimisation des paramètres est terminée.

Après avoir entraîné quelques modèles, chacun avec un nombre différent d'unités cachées, les erreurs d'entraînement et de validation sont comparées.

L'erreur d'entraînement diminue au fur et à mesure que le nombre d'unités cachées augmente. L'erreur de validation, quant à elle, est élevée lorsque le nombre d'unités cachées est faible, décroît avec l'augmentation du nombre d'unités cachées, atteint un minimum pour un certain nombre optimal d'unités cachées, puis croît lorsque le nombre d'unités devient trop grand. C'est l'utilisation d'un ensemble de validation, distinct de l'ensemble d'entraînement (calage), qui permet de choisir le nombre optimal d'unités cachées ou neurones.

## II.2 Analyse en Composante Principale

L'ACP est une méthode de réduction des données ayant pour objectif de présenter des données globales qui caractérisent la population dans un espace de dimension réduite avec le minimum de perte d'information.

### 1. Cadre d'application

L'ACP est une méthode d'analyse factorielle adaptée à l'analyse des tableaux statistiques représentant l'observation de  $p$  variables sur  $n$  individus.

Les variables doivent être de type quantitatif, hétérogènes et ne doivent pas être globalement indépendantes. En effet, l'ACP procède par réduction de la dimension de l'espace des variables en tirant partie des corrélations entre les variables initiales.

### 2. Tableau des données

Un nombre de  $n$  individus  $X_1, \dots, X_n$  sur lesquels les valeurs de  $p$  variables sont observées  $Y^1, \dots, Y^p$ .

L'observation de la variable  $Y^j$  sur l'individu  $X_i$  est notée  $k_{ij}$ .

Ces données sont résumées dans le tableau statistique II.1

**Tableau II.2:** matrice des données brutes

	$Y^1$	..	$Y^i$	$Y^p$
$X_1$			:	
:			:	
$X_i$	..	..	$K_{ij}$	..
$X_n$			:	

Pour chaque variable  $Y^j$ , le calcul de sa moyenne et sa variance est effectué :

Moyenne :

$$\bar{Y}^j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n k_{ij} \quad (\text{II.11})$$

Et variance :

$$S_{ij}^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (k_{ij} - \bar{Y}^j)^2 \quad (\text{II.12})$$

Afin d'éliminer les effets dus aux différences des moyennes et aux choix des unités, les variables centrées et réduites des variables  $Y_j$  sont calculées. Le tableau centré - réduit  $X$  de terme général

$$X_{ij} = \frac{K_{ij} - \bar{Y}^j}{S_j \sqrt{n}} \quad (\text{II.13})$$

### 3. Nuage des individus

Le nuage  $N(I)$  composé de  $n$  points  $X_i$  de  $R_p$  est considéré. Chaque individu  $X_i$  est représenté dans  $R_p$ . Chacune de ses coordonnées représente la valeur de la variable  $Y^j$  sur cet individu.

À chaque point une masse  $m_i = 1$  est associée. Les variables étant centrées, le centre de gravité  $G$  du nuage se trouve donc en  $0$  :

$$G = (\overline{X_1}, \dots, \overline{X_p}) = (0, \dots, 0)$$

Une analyse factorielle du nuage  $N(I)$  en  $G = 0$  est effectuée, la matrice d'inertie est :

$$V = X'X$$

Les  $X_{ij}$  étant centrés,  $V$  correspond à la matrice des variances - covariances des  $Y^j$ .

Les  $X_{ij}$  étant réduits,  $V$  est la matrice des corrélations ( $r_{ij}$ )

La diagonalisation de  $V$  permet d'obtenir les  $p$  valeurs propres :  $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_p$

Les axes propres associés :  $C_1, C_2, \dots, C_p$  sont appelés axes principaux.

Plus généralement, dans l'ACP, les axes principaux considérés ne sont que ceux correspondant à des valeurs propres supérieures à 1. Le nuage  $N(I)$  est alors projeté sur le sous-espace engendré par les axes principaux considérés.

### 4. Nuage des variables

A présent le nuage  $N(J)$  composé de  $p$  points  $Y_j$  de  $R_n$  est considéré, chaque variable  $Y_j$  est représentée dans  $R_n$ . Chacune de ses coordonnées représente la valeur de la variable  $Y_j$  sur les  $n$  individus.

Pour :

$j \in \{1, \dots, p\}$ , on a

$$\|Y^j\| = 1$$

et pour  $j' \in \{1, \dots, p\}$ , on a

$$\cos(Y^j, Y^{j'}) = r(Y^j, Y^{j'}) = r_{jj'}$$

Les valeurs propres (non nulles) de  $\Gamma$  sont les mêmes que celles de  $V$  :

$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3 > \dots > \lambda_p$  les axes propres associés sont appelés composantes principales.

Les composantes principales  $W_1, \dots, W_p$  peuvent être considérées comme de nouvelles variables.

$$W_1 = \frac{1}{\sqrt{\lambda_1}} X C_1, \dots, \frac{1}{\sqrt{\lambda_p}} X C_p \quad (\text{II.14})$$

## 5. Qualité des résultats

Le but de l'analyse en composantes principales est la transformation des variables en des nouvelles variables indépendantes qui ne sont que des combinaisons linéaires des variables initiales.

Les nouvelles variables sont appelées «composantes principales» et sont caractérisées par une variance maximale et une moyenne nulle.

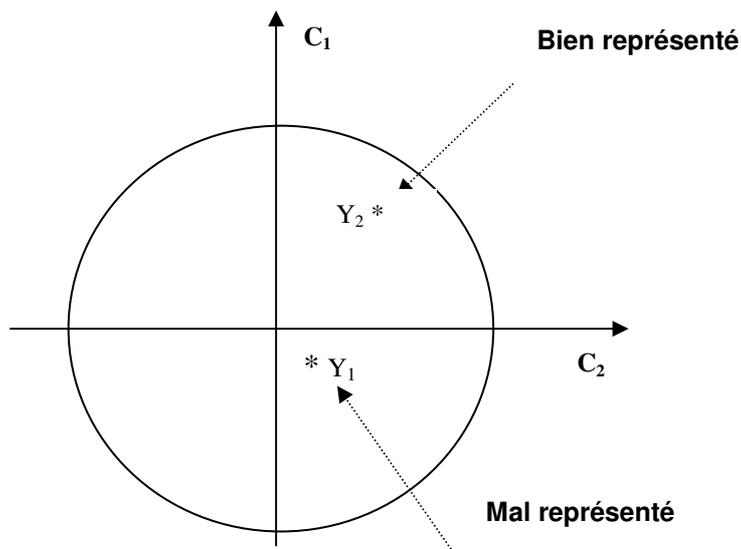
Les axes qui les déterminent sont les axes principaux.

L'interprétation des résultats de l'ACP peut être facilitée par une représentation graphique des observations (individus) et des variables sur les plans formés par les axes  $C_1$  et  $C_2$  (Figure II.11).

Cette représentation permet de regrouper ou de dégager la ressemblance suivant la combinaison de toutes les variables initiales.

La présentation sous forme de tableaux numériques des résultats de l'analyse en composantes principales donne les résultats suivants :

- La moyenne et l'écart type de chaque variable ;
- La matrice des corrélations de toutes les variables entre elles ;
- La valeur propre de chaque axe factoriel ;
- Les vecteurs propres ;
- Les corrélations entre les variables et les axes principaux ;
- Les cercles de corrélations.



**Figure II.11** : Cercle de corrélation

# CHAPITRE III : PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

## Chapitre III : Présentation de la zone d'étude

### Introduction

Le territoire national est découpé en cinq (05) unités hydrographiques naturelles, conformément à la loi N°83 -17 du 16 juillet 1983 portant sur code des eaux, ces unités dénommées « bassins hydrographique » sont :

1. Algérois Hodna Soummam
2. Constantinois Seybouse Mellègue
3. Oranie Chott Chergui
4. Chellif Zahres
5. Sahara

### III.1 Caractéristiques physiques

#### 1. Situation géographique

Le bassin hydrographique Algérois Hodna Soummam (Figure III.1) est situé dans la partie centrale de l'Algérie du Nord. Il est limité par :

- au Nord : la mer méditerranée
- à l'Ouest : le bassin Cheliff Zahres
- à l'Est : le bassin Constantinois Seybouse Mellègue
- au Sud : bassin Sahara

Le bassin hydrographique AHS s'étend sur 14 wilayas (département) (Figure III.2):

- 6 en totalité : Alger, Tizi Ouzou, Boumerdes, Blida, Bordj Bou Arreridj, Bouira.
- 8 partiellement : M'sila, Médéa, Tipaza, Ain Defla, Batna, Djelfa, Bénéjaia, Setif.

Il englobe 453 communes et 1483 agglomérations, la population totale de la région est de 10.000.000 hab.

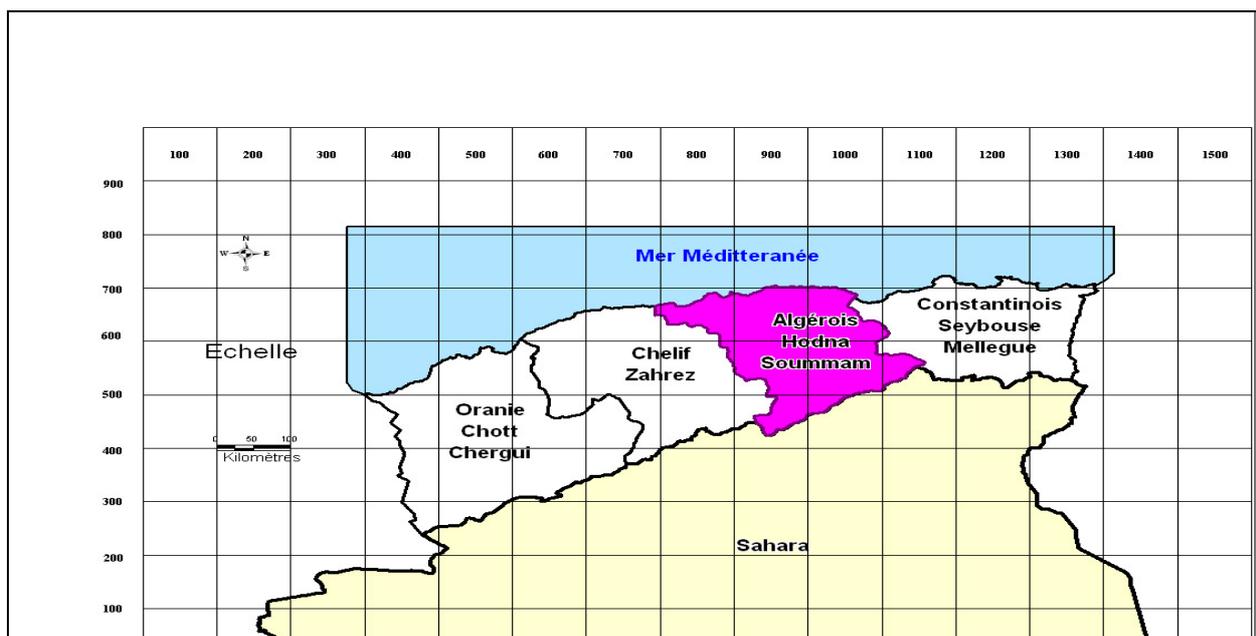


Figure III.1 : Situation générale du bassin hydrographique AHS

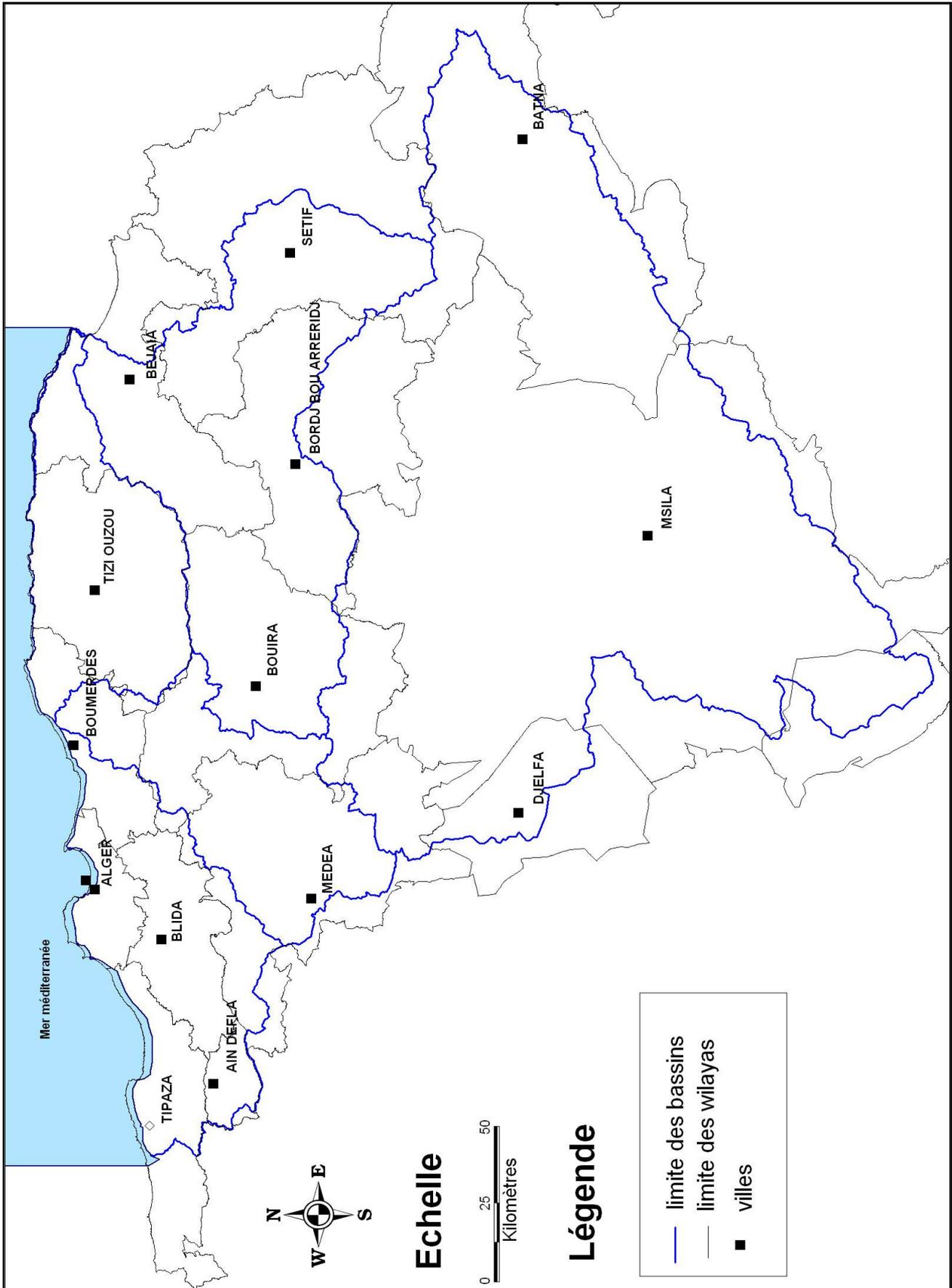


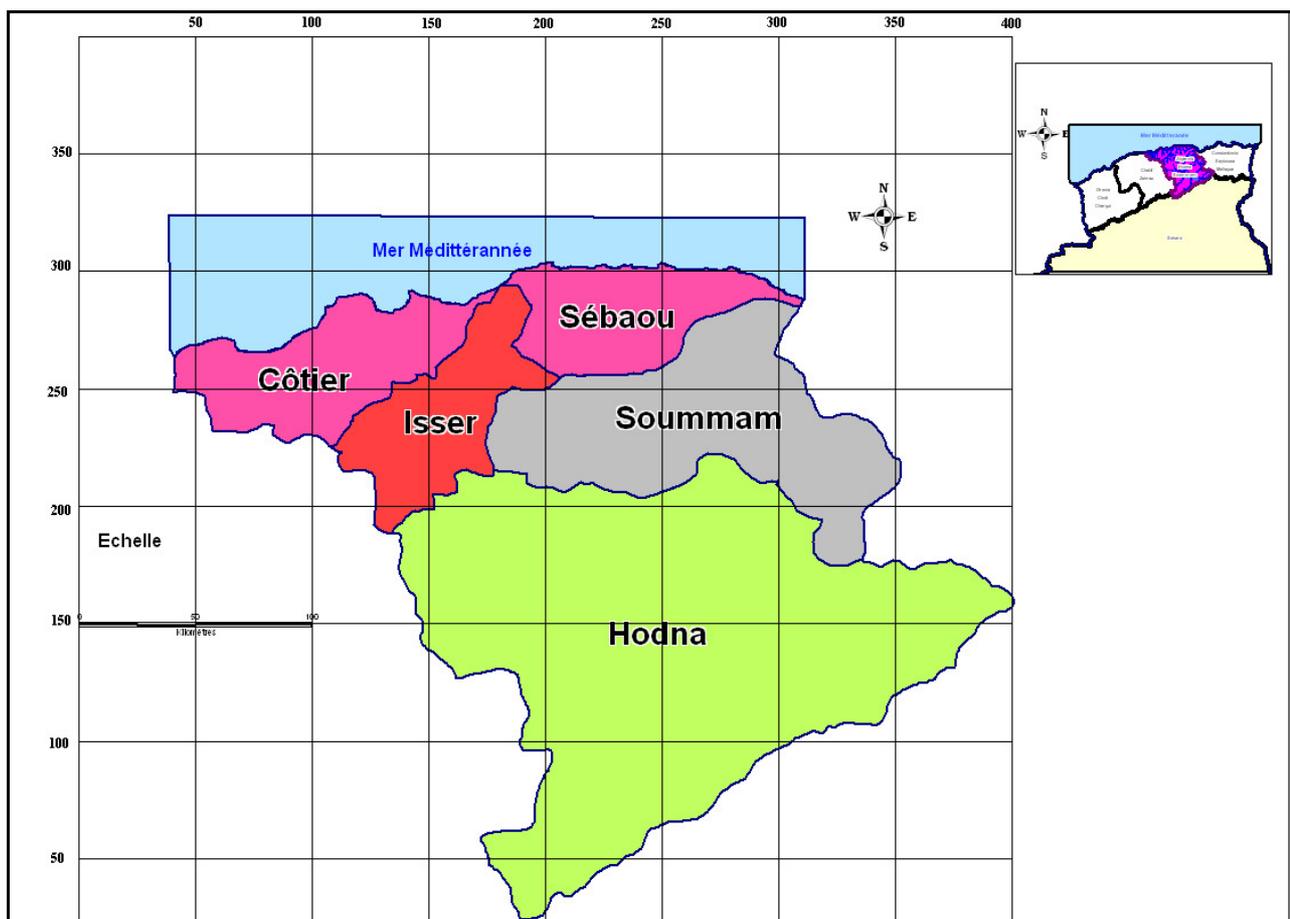
Figure III.2 : Wilaya dans le bassin AHS

## 2. Caractéristiques de forme

### 2.1 Superficie

Le bassin hydrographique de l'Algérois Hodna Soummam couvre une superficie de **47 875 Km<sup>2</sup>** ; il comprend trois (03) grands bassins versants (Figure III.3) à savoir :

- **Le bassin de l'Algérois (02)** : il s'étend sur une superficie de **12 914 Km<sup>2</sup>** soit **27 %** de la superficie totale du bassin hydrographique, il se compose de trois (03) sous bassins :
  - **Isser (09)** : situé au centre Nord de l'Algérie, sa superficie totale est de **4 156 Km<sup>2</sup>** soit **8,7 %** de la superficie totale.
  - **Cotiers Algérois (2a)** : il s'étend sur une superficie de **4 173 Km<sup>2</sup>** soit **8,72 %** de la superficie totale du bassin hydrographique.
  - **Côtier Algérois (2b)** : il s'étend sur une superficie de **4 585 Km<sup>2</sup>** soit **9,58 %** de la superficie totale du bassin Algérois Hodna Soummam.
- **Le bassin de la Soummam (15)** : situé a l'Est de l'Algérois à 100 Km au Sud d'Alger ; il s'étend sur une superficie de **9 121 Km<sup>2</sup>** soit **19 %** de la superficie totale.
- **Le bassin Hodna (05)** : constitue une des dépressions existantes dans le grand ensemble du territorial des hauts plateaux. Il s'étend sur une superficie de **25 840 Km<sup>2</sup>**, soit **54 %** de la superficie totale du bassin hydrographique AHS.



**Figure III.3** : Découpage du bassin Hydrographique AHS



- Le bassin de l'Algérois composé de 18 sous bassins pour le Côtiers Algérois et 05 sous bassins pour l'Isser, il compte 30 oueds principaux (22 oueds pour le Côtiers Algérois et 8 pour le Isser) totalisant une longueur de 1 145 Km allant de 11 Km pour Ladrat a 114 Km pour Isser, et dont les plus importants sont : Oued El Harrach, Bouroumi, Mazafran, Sébaou et Isser. (Tableau III.2)

**Tableau III.2 : Longueur des cours d'eau principaux des bassins versants**

<b>Bassin</b>	<b>Nom de l'oued</b>	<b>Longueur (Km)</b>
<b>Côtiers Algérois (02)</b>	El harrach	59
	Bouroumi	72
	Chiffa	35
	Mazafran	96
	Hamiz	35
	Djemaa	27
	Barek	25
	Djer	50
	Semmar	23
	Reghaia	13
	El hachem	34
	Meurad	20
	El Afroun	49
	Bourkika	36
	Daas	27
	S.Ahmed Youcef	30
	Diss	19
	Stita	14
	Faraoun	29
	Sébaou	97
M'leta	13	
El Hammam	15	
<b>Isser (09)</b>	Isser	114
	Soufflat	36
	Bouhamoud	26
	Yagour	16
	Ladrat	11
	El Melah Ouest	45
	El Melah Est	26
<b>Hodna (05)</b>	K'sob	73
	El Ham	110
	Soubella	61
	Barika	102
	Bou Saada	52
	M'Cif	104
	Djenane	64
<b>Soummam (15)</b>	Soummam	226
	Bou Sellam	144
	Eddous	85
	Bouktou	56
	O'Khriss	23
	Ftaisa	44
	Ziane	54
	Azerou	40
	Lekhal	*
	Soummam	226

(Source : ABH)

- Le réseau hydrographique du bassin de la Soummam est très développé. Il draine les apports de 10 sous bassins constitués de 09 Oueds principaux (Azero, Ziane, Fataïssa, O'kriss, Bouktou, Eddous, El Main, Bousselem et Soummam), totalisant une longueur de 726 Km dont le plus court est de 23 Km (O'kriss) et le plus long de 226 Km (Soummam). La plupart de ces cours d'eau sont activés au cours de la période hivernale.

Ces bassins sont drainés vers la Mer Méditerranée.

- Le bassin du Hodna est constitué d'un réseau hydrographique riche dont l'exutoire est le Chott el Hodna. Les oueds principaux qui s'écoulent vers le Chott sont : Bitam, Sbisseb, M'sila, Djenane, M'cif, Boussaada, Barika, Soubella, El ham et K'sob, leur linaire totale est de 816 Km.

En figure III.5, une représentation graphique des différentes longueurs des cours d'eau est donnée.

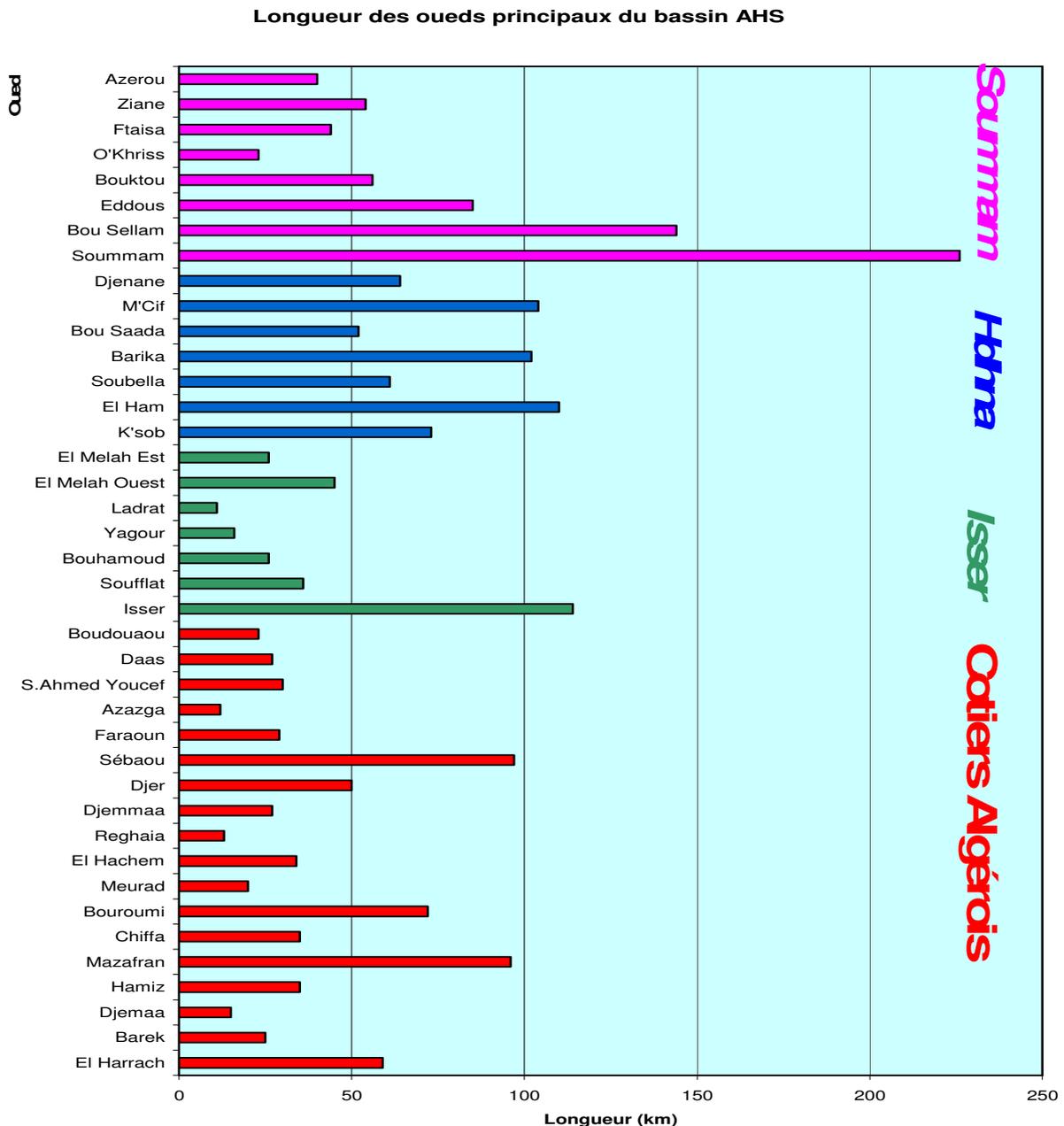


Figure III.5 : Graphique des longueurs des cours d'eau principaux du bassin hydrographique AHS

Les principaux facteurs qui peuvent différencier un réseau hydrographique dans un bassin sont :

- **La géologie** : la nature du substratum influence la forme du réseau hydrographique. La structure de la roche, sa forme, ses failles, ses plissements, forcent le courant à changer de direction.
- **Le climat** : le réseau hydrographique est dense dans les régions montagneuses très humides et tend à disparaître dans les régions désertiques.
- **La pente du terrain** : elle détermine si les cours d'eau sont en phase érosive ou sédimentaire. Dans les zones plus élevées, les cours d'eau participent souvent à l'érosion de la roche sur laquelle ils s'écoulent. Au contraire, en plaine, les cours d'eau s'écoulent sur un lit où la sédimentation prédomine.
- **La présence humaine** : le drainage des terres agricoles, la construction de barrages, l'endiguement, la protection des berges et la correction des cours d'eau modifient continuellement le tracé original du réseau hydrographique.

### 3. Caractéristiques pédologiques

Les résultats des études pédologiques antérieures et l'inventaire réalisés par l'ANRH et l'Agence des Bassins Hydrographique dans le bassin de l'Algérois Hodna Soummam, montrent que les sols inventoriés représentent une superficie de 1 869 11 ha tandis que la superficie des sols irrigables qui en résulte avoisine les 593 300 ha.

#### ➤ Catégories des sols et aptitudes culturales

La classification des sols en zone homogènes, adoptée par l'ANRH, selon leurs aptitudes à la mise en valeur en irrigué a dégagé cinq catégories dont les trois premières représentent les sols irrigables :

**Catégorie I** : sols profonds de texture moyenne à fine bien structurés et bien drainés. Ces sols sont aptes à toutes les cultures.

**Catégorie II** : sols profonds ou moyennement profonds de texture moyenne fine, bien structurés à une profondeur moyenne. Ils sont aptes à toutes les cultures avec restrictions pour certaines. Ces sols sont favorables plus spécialement aux cultures industrielles.

**Catégorie III** : sols peu ou moyennement profonds, à texture moyennement fine à très fine, généralement bien structurés. Ils sont réservés aux cultures en assolement.

**Catégorie IV** : sols à profondeur variable, de texture grossière à très fine. L'aptitude culturale de ces sols est limitée pour quelques cultures céréalières, fourragères et maraîchères. La mise en valeur en sec pour ces sols est généralement recommandée.

**Catégorie V** : sols non irrigables.

#### ❖ Récapitulation d'aptitude à l'irrigation

Sols irrigables catégories **I+II+III**

Sols non irrigables : catégories **IV+V**.

Le tableau III.3 donne les superficies et le pourcentage de chaque catégorie de sol dans le bassin Hydrographique AHS.

Tableau III. 3 : Superficie des sols du bassin AHS par catégorie

Catégorie de sols		Bassins				Bassin AHS
		Algérois		Hodna	Soummam	
		Cotier	Isser			
Catégorie I	Superficie (ha)	27 786	5 531	72 528	30 509	136 354
	Pourcentage%	11,60	9,51	6,63	6,37	7,29
Catégorie II	Superficie (ha)	66 541	9 388	34 809	36 486	147 224
	Pourcentage%	27,79	16,14	3,18	7,62	7,87
Catégorie III	Superficie (ha)	66 806	15 402	105 372	122 134	309 714
	Pourcentage%	27,90	26,48	12,47	25,52	16,57
Catégorie IV	Superficie (ha)	16 487	14 406	136 410	108 496	276 074
	Pourcentage%	6,88	24,77	68,06	22,67	14,77
Catégorie V	Superficie (ha)	61 794	23,08	744 033	37,78	1 000 020
	Pourcentage%	25,81	13 422	212 709	180 771	53,50
Sols irrigable(I+II+III)	Superficie (ha)	161 133	30 321	212 709	189 129	593 292
	Pourcentage%	67,30	52,14	19,45	39,53	31,73
Superficie totale (Ha)		239 414	58 149	1093 152	478 396	1 869 111

(Source : ABH)

D'après le tableau III.3, il est à remarquer que presque 32% des sols du bassin hydrographique AHS sont **irrigables** (catégories I+II+III) et 68% des sols sont non irrigables (catégories IV+V).

L'essentiel des sols irrigables se trouvent dans les bassins du Hodna et Soummam qui totalisent environ 68% des superficies des sols irrigables du bassin Algérois Hodna Soummam. 45% des terres irrigables de la région se trouvent au niveau des plaines de la Mitidja (122 150 ha), du Hodna (130 342 ha) et des hautes plaines sétifiennes (157 246 ha).

## III.2 Caractéristiques hydroclimatiques

Le climat algérien est un climat de transition entre le climat tempéré humide et le climat désertique. Il varie de manière contrastée, du type méditerranéen et semi aride dans le nord vers le type désertique dans le Sahara. Le bassin Algérois - Hodna - Soummam est sous l'influence de trois régimes climatiques :

- Climat tempéré littoral
- Climat de l'atlas Télien
- Climat des hauts plateaux

### 1. Pluviométrie

Les précipitations moyennes dans le bassin Algérois Hodna Soummam, se caractérisent par une variation spatio - temporelle remarquable.

La pluie moyenne diminue au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la côte.

- La pluviométrie moyenne annuelle pour l'Algérois varie entre **500** et **1000 mm** en augmentant de l'Ouest vers l'Est. Les écoulements annuels de surface sont estimés à **3489 Million de m<sup>3</sup>**.
- Pour l'ensemble du bassin Soummam, la pluviométrie moyenne est de **511 mm**, oscillant entre **300** et **1000 mm** près de la côte de Béjaia. Elle atteint approximativement 1500 mm sur les flancs Sud du massif de Djurdjura, en augmentant de l'Ouest vers l'Est.

- Pour l'ensemble du bassin de Hodna, la pluviométrie moyenne est de **285 mm**, oscillant entre **200 et 500 mm** avec une variation, avec une variation extrême dans l'espace et dans le temps.

Les précipitations varient en moyenne entre **300 et 1500 mm** dans la région côtière et de **200 à 500 mm** au Sud (source : Agence des bassins AHS).

### 2. Température

- Le bassin de **Hodna** est exposé aux influences sahéliennes par le seuil de Biskra. Les températures moyennes annuelles oscillent entre 13 et 19° C. La moyenne mensuelle des maxima varie entre 19 et 24 C° et celles des moyennes annuelles des minima varient entre 6° et 12°C.
- Pour l'ensemble du bassin de la **Soummam**, le mois le plus chaud est celui d'Aout avec une température d'environ 25° C quand aux températures les plus basses, elles sont atteintes au mois de Janvier où leur moyenne sont d'environ 12°C.
- Quant au bassin de **l'Isser**, la température moyenne annuelle décroît de 17°C à 10°C par effet orographique. L'amplitude moyenne mensuelle passe de 16°C à 20°C du Nord au Sud de cette région, les minima sont observés en hiver.

En résumé, la température moyenne mensuelle dans le bassin AHS varie entre 6°C et 12°C pour les minima et entre 16°C et 25°C pour celle des maxima.

### 4. Evapotranspiration

Pour l'ensemble du bassin hydrographique Algérois Hodna Soummam (AHS), l'évapotranspiration potentielle (ETP) annuelle oscille entre 1000 et 1900 mm.

D'après la carte établie par l'Agence Nationale des ressources Hydrauliques (ANRH) en l'année 2000, l'évapotranspiration potentielle annuelle dans le bassin de **l'Algérois** varie entre **1214 mm** et **1569 mm**. Par ailleurs, l'examen de la carte établie par l'ANRH en l'année 2002 montre que l'évapotranspiration potentielle annuelle varie entre **1200 mm** et **1900 mm** au niveau du bassin **Hodna** et entre **1000 mm** et **1600 mm** pour le bassin de la Soummam. Elle est plus élevée dans la partie de ce dernier. Mais d'après la FAO (1969), l'ETP du bassin Hodna oscille entre **1085 mm** et **1362 mm**, pour la majeure partie de ce dernier, elle est de **1250 mm**.

### III.3 Données disponibles

Les données représentent la source principale de toute étude. Leurs fiabilités représentent un intérêt majeur dans la qualité des résultats à obtenir.

#### 1. Données pluviométriques

Les données pluviométriques sont issues de la banque de données ANHR, l'ensemble du bassin Algérois Hodna Soummam englobe **396 stations pluviométriques**.

Leur distribution est hétérogène à travers les bassins d'études. La plus forte concentration est rencontrée dans la région Nord de la zone d'étude (le côtier Algérois).

Le tableau III.4 et la figure III.6 rendent compte de la répartition du nombre des postes pluviométriques à travers les bassins versant de l'Algérois Hodna Soummam.

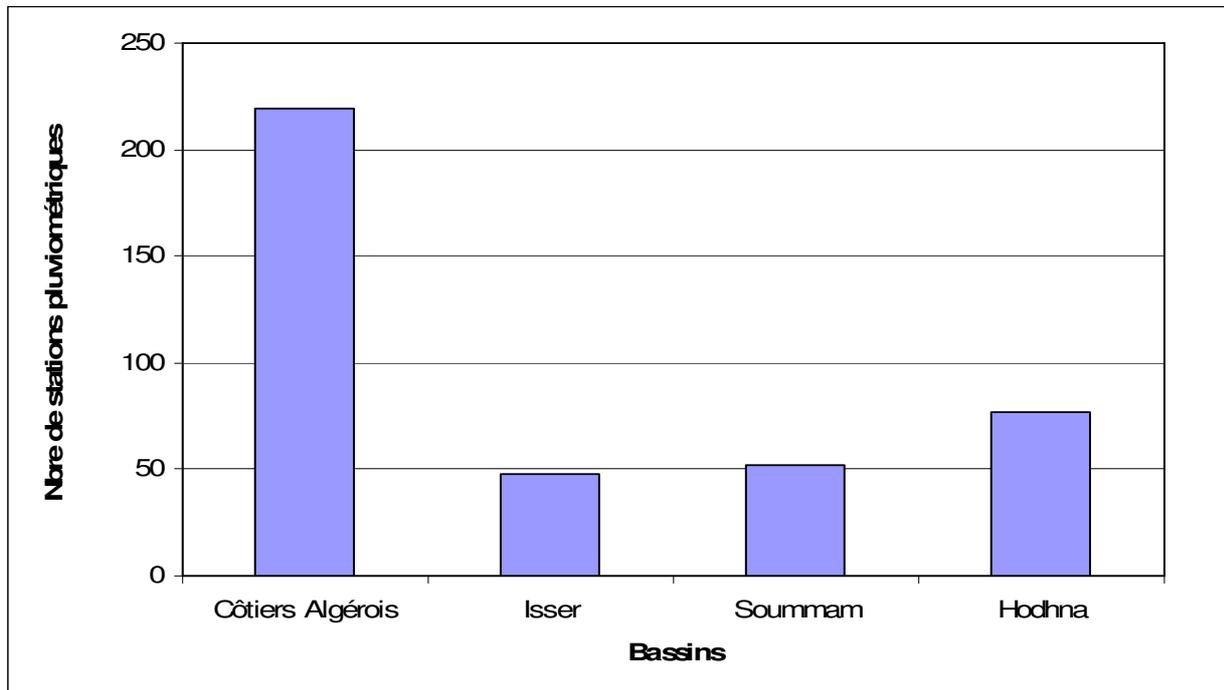
Le bassin du Côtiers Algérois a lui seul possède près de 55% du réseau de mesure du bassin hydrographique AHS. Ceci est essentiellement dû à la forte activité économique (agriculture,

industrie) auxquelles s'ajoutent les conditions propices qui sont génératrices de pluies qui caractérisent les régions où sont situés les bassins.

**Tableau III.4 : Nombre des stations pluviométriques du bassin AHS**

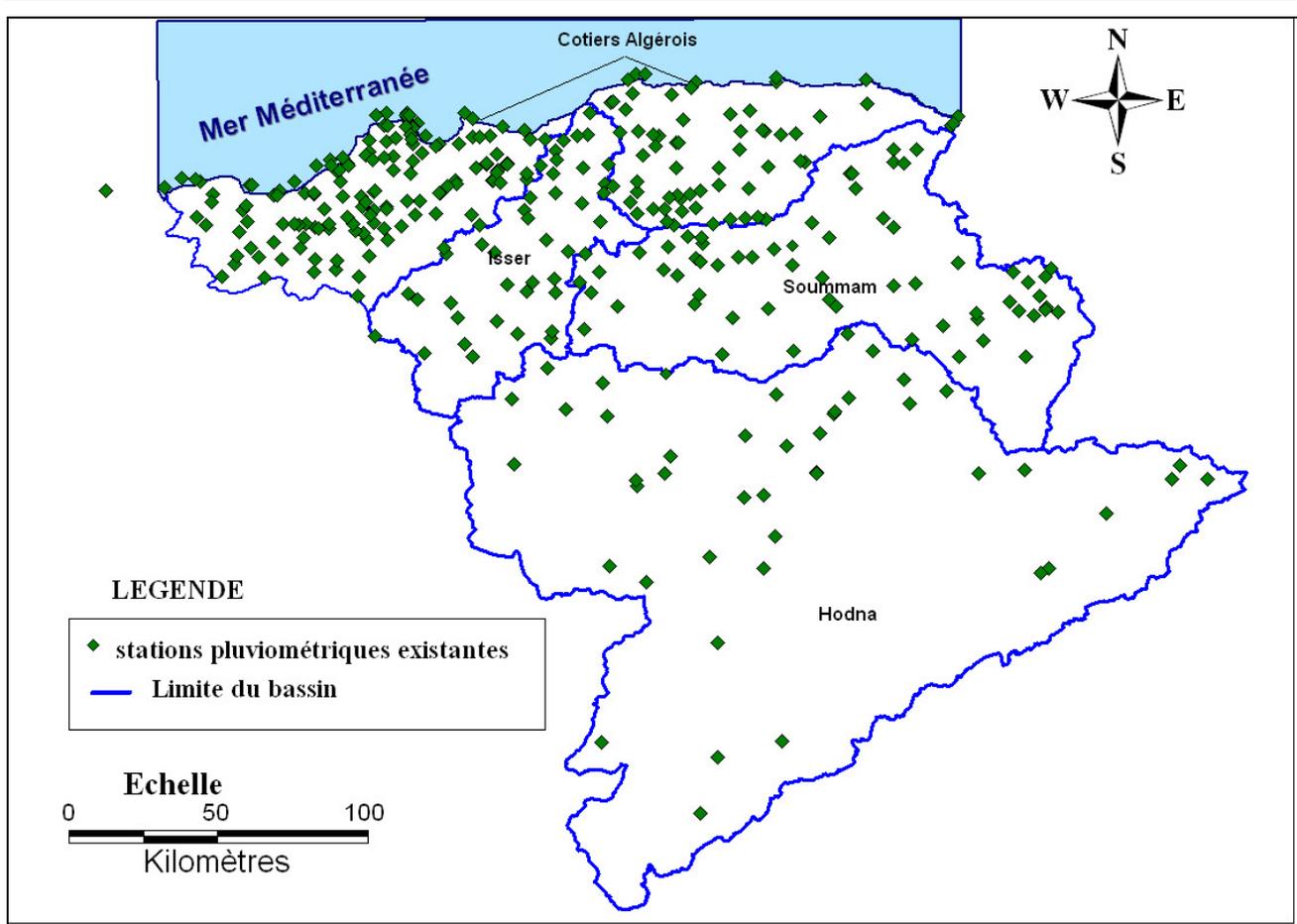
Code	Bassin	Nombre de postes pluviométriques
02	Côtiers Algérois	219
09	Isser	48
05	Hodna	52
15	Soummam	77
	<b>Total</b>	<b>396</b>

**Source (PNE : Plan National de l'Eau + Agence des Bassins)**



**Figure III.6 : Répartition du nombre de stations pluviométriques à travers le bassin**

En figure II.7, une localisation des postes pluviométriques à travers le bassin hydrographique Algérois Hodna Soummam.



**Figure III.7 :** Localisation des stations pluviométriques dans bassin AHS

## 2. Données hydrométriques

Les données hydrométriques sont issues de la banque de données ANRH (Agence Nationale des ressources Hydrauliques). Le bassin de l'Algérois Hodna Soummam englobe 66 stations hydrométriques réparties à travers tous ses sous bassins versants.

La densité du réseau hydrographique est très hétérogène, les régions du Nord sont les mieux équipées. Le tableau III.5, les figures III.8 et III.9 montrent la répartition des stations disponibles.

**Tableau III.5 :** Nombre de stations hydrométriques du bassin AHS

Code	Bassins	Nombre de stations
02	Côteaux Algérois	35
09	Isser	09
15	Soummam	11
05	Hodna	11
<b>Total</b>		<b>66</b>

Source (PNE : Plan National de l'Eau + Agence des Bassins)

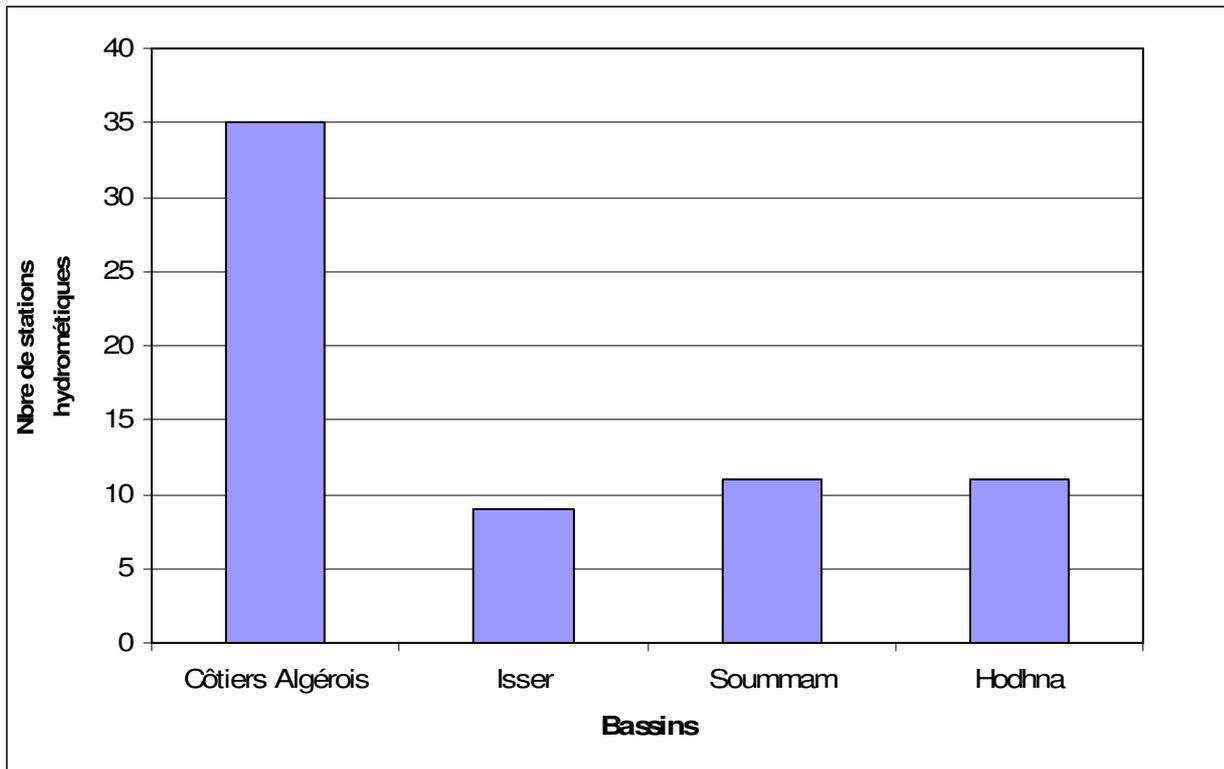


Figure III.8 : Répartition des stations hydrométriques à travers le bassin AHS

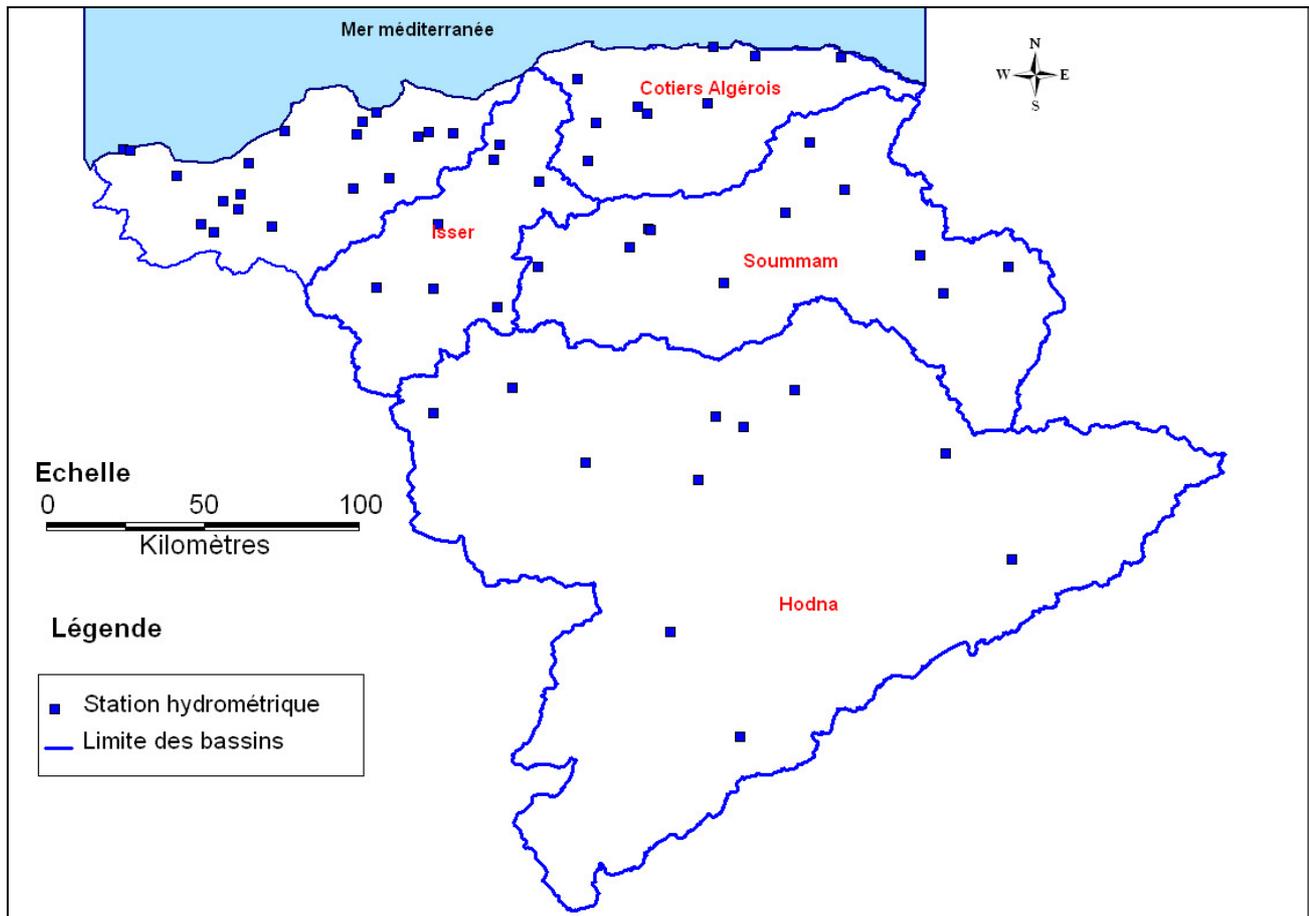


Figure III.9 : Localisation des stations hydrométriques dans le bassin AHS

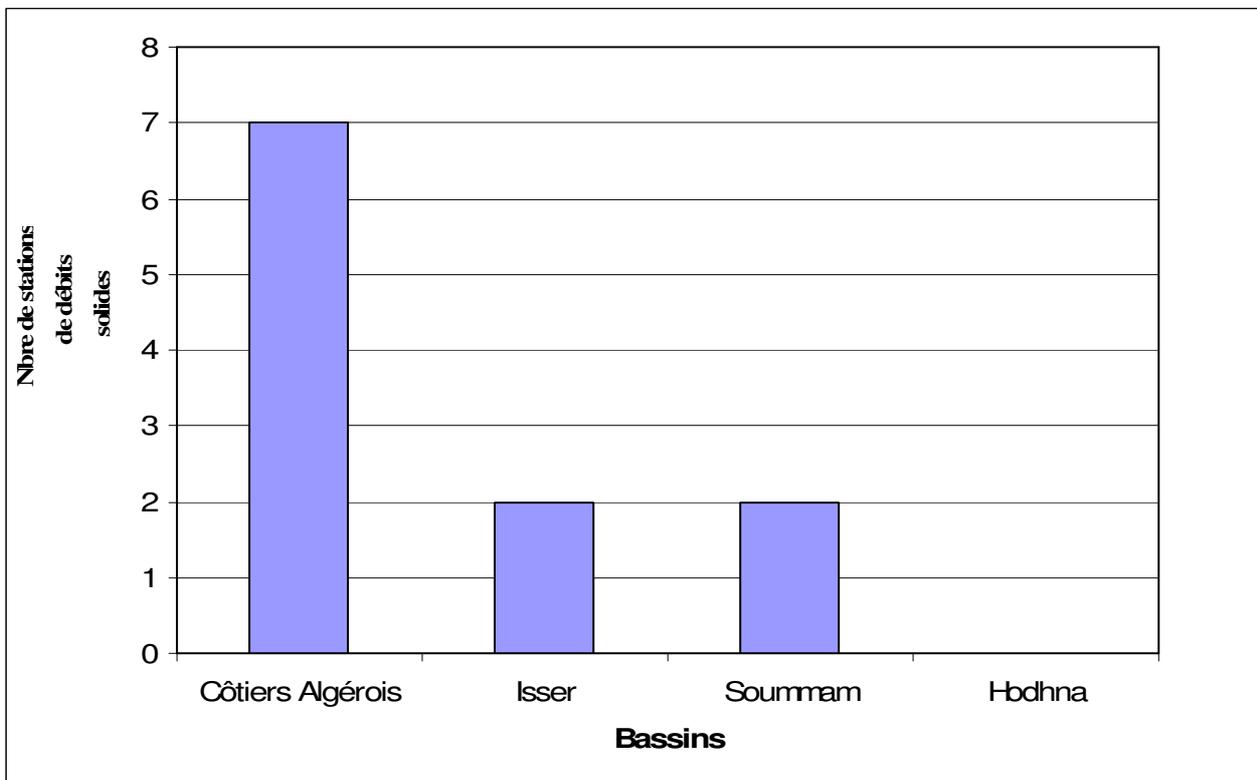
### 3. Débits solides recueillis

Les données sont fournies par l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques et concernent les débits moyens mensuels, annuels et interannuels se rapportant à quelques années d'observations ; Dans notre étude, en raison de la disponibilité des données, 11 stations de mesure de débits solides réparties à travers le bassin AHS ont été étudiées.

Le tableau III.6, les figures III.10 et III.11 montrent leur répartition.

**Tableau III. 6:** Nombre de stations de mesure de débit solide sélectionnées du bassin AHS

Code	Bassins	Nombre de stations
02	Côtiers Algérois	07
09	Isser	02
15	Soummam	02
<b>Total</b>		<b>11</b>



**Figure III.10 :** Répartition des stations de mesure de débit sélectionnées à travers le bassin AHS

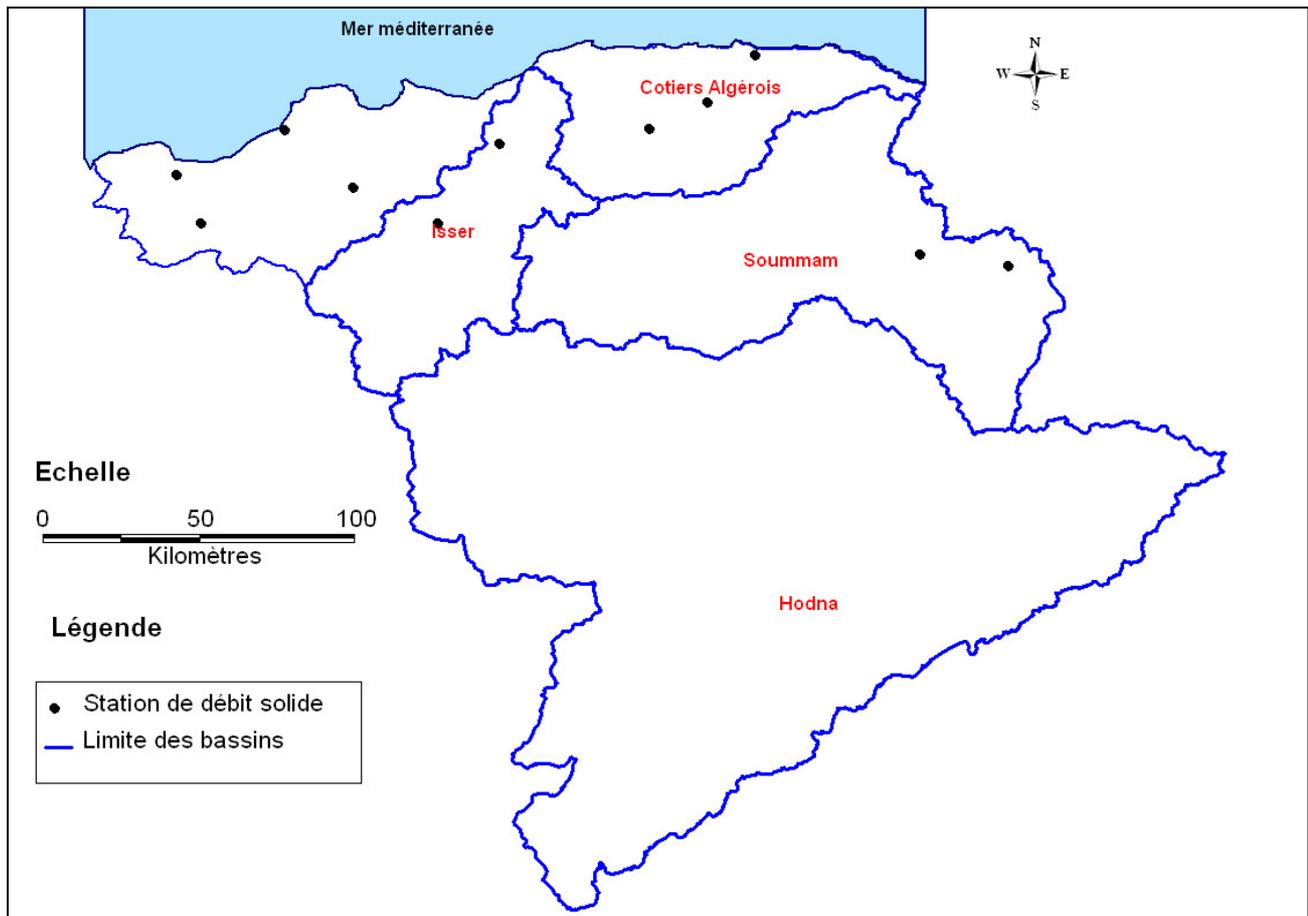


Figure III.11 : Localisation des stations de mesure de débit sélectionnées dans le bassin AHS

### III.4 ouvrages existants

#### 1. Barrages :

Les données sont fournies par l'Agence Nationale des Barrages et Transfert (ANBT). Le bassin de l'AHS compte douze (13) barrages en exploitation totalisant une capacité de **1 081,30 Hm<sup>3</sup>** avec un volume régularisé annuel de **827,7 Hm<sup>3</sup>**, le dernier barrage réceptionné est celui de Tichy Haf avec une capacité de **80 Hm<sup>3</sup>** et un volume régularisé annuel de **150 Hm<sup>3</sup>** et un (01) barrages sont en cours de construction avec une capacité de **640 Hm<sup>3</sup>** et un volume régularisé annuel de **178 Hm<sup>3</sup>**.

La répartition de ces barrages à travers nos bassins d'étude est illustrée dans le tableau III.7.

Tableau III.7 : Répartition des grands barrages en exploitation du bassin AHS

Bassins		Barrage en exploitation	Barrage en construction
Algérois	Côtiers Algérois	Keddara	
		Hamiz	
		Bouroumi	
		Meurad	
		Boukerdane	
		Taksebt	
Isser	Beni Amrane	Koudiat Acerdoune	
	Lardat		
Soummam		Lekhal	
		Tichy haf	
		Ain Zada	
		Tilesdit	
Hodna		K'sob	

Les caractéristiques principales de ces barrages sont données dans le tableau III.8

Tableau III.8 : Caractéristiques des grands barrages du bassin AHS

Bassins	Nom Barrage	Wilaya	Coordonnées			Capacité Initiale (Hm <sup>3</sup> )	Volume régul (Hm <sup>3</sup> )	Usage	année de mise en service
			X (km)	Y (km)	Z (m)				
Algérois	Keddara	Boumerdes	564,20	372,50	57,7	145,60	165,00	AEP	1985
	Hamiz	Boumerdes	558,55	367,10	150	21,00	17,00	AEP-Irrigation	1935
	Bouroumi	Blida	495,30	347,90	120	188,00	98,00	Irrigation	1985
	Meurad	Tipaza	468,78	357,57	-	0,30	1,00	Irrigation	1860
	Boukerdane	Tipaza	464,78	359,04	70	97,00	49,00	AEP-Irrigation	1992
	Beni Amrane	Boumerdes	570,10	369,75	90	16,00	T.vers Keddara	T.vers Keddara	1988
	Lardat	Médéa	533,30	326,55	650	10,00	4,70	Irrigation	1989
	Taksebt	Tizi Ouzou	627,00	376,10	-	175,00	180,00	AEP	2001
	Koudiat Acerdoune	Bouira	580,15	354,70	217	640,00	178,00	AEP-AEI Irrigation	-
Soummam	Lekhal	Bouira	591,56	329,70	645	30,00	17,00	AEP Irrigation	1985
	Ain Zada	B.B Arreridj	721,05	320,80	825	125,00	50,00	AEP-AEI Irrigation	1986
	Tichy haf	Béjaia	675,60	349,60	245	80,00	150,00	AEP-AEI Irrigation	-
	Tilesdit	Bouira	626,17	340,80	399	167,00	73,00	AEP-AEI Irrigation	2004
Hodna	K'sob	M'sila	668,45	282,10	-	26,40	23,00	Irrigation	1977

(Source : ANBT)

Le bassin de l'AHS compte également 20 barrages en cours d'étude (projeté) et le barrage de porte Fer n'est pas inventorié par l'ANBT. Il est abandonné car il est complètement envasé.

La figure III.12 illustre bien la position des différents barrages à travers les bassins d'étude.

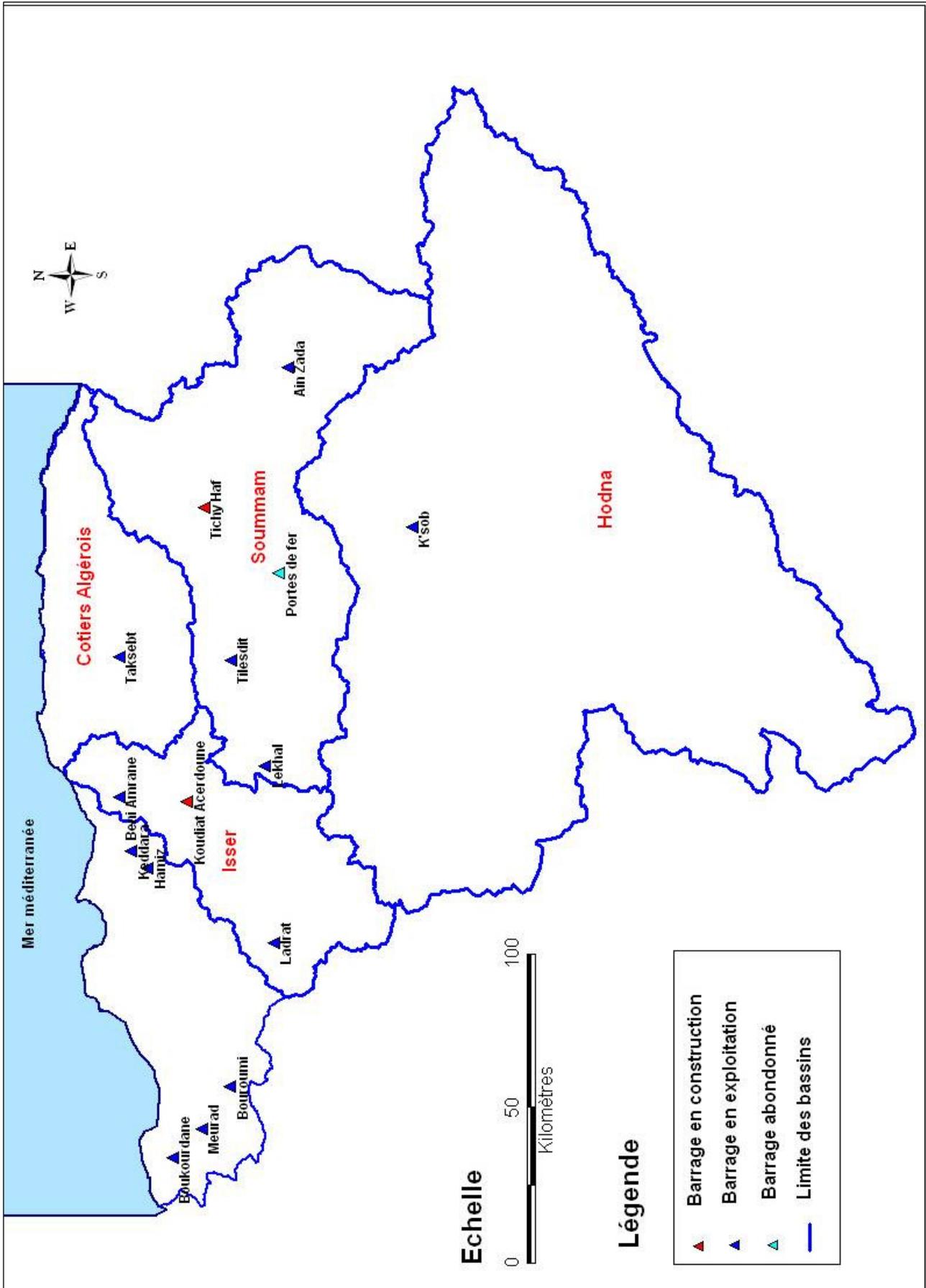


Figure III.12 : Localisation des barrages dans le bassin de l'AHS

### 2. Description des barrages

Les grands barrages qui se trouvent dans le bassin hydrographique de l'Algérois Hodna Soummam sont :

#### 2.1 Bassin de l'Algérois

- **Barrage Bouroumi**

Le barrage est situé à 8 Km à l'Est de Bou Medfaa et à 15 Km au Sud d'El Affroun. Il se trouve sur l'Oued Bouroumi. L'apport annuel moyen de l'Oued au niveau du barrage est estimé à 25 Hm<sup>3</sup> pour une superficie du bassin versant de 150 Km<sup>2</sup>.

Ce barrage a un intérêt hydro-agricole, il a été inclus récemment dans le système de sécurisation d'Alimentation en eau potable de la wilaya d'Alger.

- **Barrage Boukerdane**

Le barrage de Boukerdane, sur l'oued El Hachem est situé à environ 1.3 Km au Sud du village de Sidi Amar dans la wilaya de Tipaza. Cet ouvrage est destiné à l'alimentation en eau potable des villes de Tipaza, Cherchel, Nador, Hadjout, Sidi Amar et Mered et pour l'irrigation de la vallée de l'Oued El Hachem et des régions de Hadjout et du Sahel.

- **Barrage Keddara**

Le barrage est situé dans la wilaya de Boumerdes à 8 Kms au Sud de Boudouaou et à 50 Km à l'Est d'Alger. Il ferme la vallée de l'oued Boudouaou à 300 m à l'aval de la confluence des oueds Keddara et El Haad. Cet ouvrage alimente la capitale et la ville de Boumerdes.

La mise en service de cet ouvrage qui fait partie du système de production « Isser-Keddara » s'est faite en 1987.

- **Barrage Beni Amrane**

Le barrage est implanté sur l'oued Isser et situé à 5 km environ à l'amont de la ville de Thenia, dans la wilaya de Boumerdes. Les apports de l'Oued Isser, sont estimés à 414 Hm<sup>3</sup> pour une superficie du bassin versant de 3 710 km<sup>2</sup>. Après la réalisation du barrage Koudiat Acerdoune, implanté sur le même oued, le barrage Beni Amrane ne drainera que les apports du bassin Intermédiaire soit 370 km<sup>2</sup>. Il est conçu de manière à fournir un stockage de l'Oued Isser afin de faciliter le pompage d'eau brute vers les réservoirs de Keddara et éventuellement directement à la station de traitement de Boudouaou

- **Barrage Ladrat**

L'ouvrage se situe à l'Est de Médéa à 5 km environ au Sud-Ouest d'El Oumaria dans la wilaya de Médéa, sur l'Oued Ladrat, Les apports de ce dernier au niveau du barrage sont estimés à 8 Hm<sup>3</sup> pour une superficie du bassin versant de 73 km<sup>2</sup>. Le barrage est destiné à l'irrigation du périmètre de Ladrat.

- **Barrage Koudiat Acerdoune**

Ce barrage actuellement en construction est situé dans la commune de Maala, wilaya de Bouira. Il est destiné à l'alimentation en eau potable de 14 centres urbains et 34 localités à travers le territoire des wilayas : Bouira, Tizi Ouzou, Médéa et M'sila et à l'irrigation de 3 000 ha du périmètre du moyen Isser ainsi qu'au renforcement de la mise en valeur hydro-agricole du périmètre de la Mitidja Centre et Est.

- **Barrage de Meurad**

Le barrage est implanté sur l'Oued Boudjebroun et dans la wilaya de Tipaza. Les apports de cet Oued sont estimés annuellement à 1,5 Hm<sup>3</sup> pour une superficie du bassin versant de 10 km<sup>2</sup>. L'ouvrage est en terre, il dessert un volume annuel de 0,9 Hm<sup>3</sup> pour l'irrigation du périmètre de Meurad.

- **Barrage de Hamiz**

Le barrage du Hamiz est situé dans la Wilaya de Boumerdes dans la région Nord de l'Algérie. Il retient les eaux de l'Oued Arbatache.

L'exploitant de ce réservoir est L'Agence Nationale des Barrages (ANBT).

Le but actuel de ce réservoir est :

- Le stockage de l'eau d'irrigation ;
- L'approvisionnement en eau potable ;
- L'alimentation de l'industrie.

Le barrage a été construit et mis en service en 1879 et a été surélevé en 1935. A partir de la plus basse fondation sa hauteur est de 50 m. Le P.H.E (Le niveau des plus hautes eaux exceptionnelles) est à 175.00 m et la côte de retenue normale (RN) est fixée à 174.10 m.

- **Barrage de Taksebt**

L'ouvrage se situe dans la wilaya de Tizi Ouzou. Le barrage est en terre, il est implanté sur l'Oued Aissi, la superficie du bassin versant de 448 km<sup>2</sup>. Il dessert 136 Hm<sup>3</sup> pour la wilaya d'Alger et 44 Hm<sup>3</sup> pour la wilaya de Tizi Ouzou en Alimentation en Eau Potable et l'Alimentation en Eau Industrielle.

### 2.2 Bassin du Hodna

- **Barrage K'Sob**

Cet ouvrage est situé au Nord de la ville de M'sila., d'un apport moyen de 53 Hm<sup>3</sup> et implanté sur l'Oued K'sob, avec une superficie du bassin versant de 1 500 Hm<sup>3</sup>. Il a été surélevé de 15 m entre 1972 et 1977 pour compenser le volume de la vase stockée dans la retenue. Il est destiné à l'irrigation du périmètre de K'Sob.

### 2.3 Bassin de la Soummam

- **Barrage Lekhal**

Le barrage Lekhal est situé à 5 Km d'Ain Bessam dans la wilaya de Bouira. Il est implanté à la confluence des oueds Lekhal et Fahem. Les apports annuels de l'Oued Lekhal sont estimés à 22 Hm<sup>3</sup> pour une superficie du bassin versant de 189 km<sup>2</sup>. Il est destiné à l'irrigation des périmètres des Arribs et à l'alimentation en eau d'Ain Bessam, Sour El Ghozlane et la Zone industrielle.

- **Barrage Ain Zada**

Le barrage de Ain Zada est situé à 40 km de la ville de Bordj Bou Arréridj. Il est implanté sur l'Oued Bou Sellam d'un apport estimé à 90 Hm<sup>3</sup> pour une superficie du bassin versant de 2 080 Hm<sup>3</sup>. Avec une capacité actuelle de 121,7 Hm<sup>3</sup> et un volume régularisé de 50 Hm<sup>3</sup>, il est destiné à l'alimentation en eau potable et industrielle des villes de Sétif, Bordj Bou Arréridj et El Eulma.

- **Barrage Tichy Haf**

Le barrage Tichy Haf actuellement en construction est situé près du village de Malfouda Daira de Seddouk wilaya de Béjaia. Il est implanté sur l'Oued Bou Sellam à l'aval du barrage Ain Zada. Il est destiné à l'alimentation en eau potable et industrielle des agglomérations situées dans le couloir Akbou-Béjaia et à l'irrigation des deux périmètres: Sahel et la basse Soummam.

- **Barrage Tilesdit**

L'ouvrage, réceptionné en 2004, est situé à 18 km environ à l'Est de la ville de Bouira. D'une capacité de 167 Hm<sup>3</sup> et un volume régularisé annuellement de 73 Hm<sup>3</sup>, le barrage Tilesdit est destiné au

renforcement de l'approvisionnement en eau potable de la ville de Bouira et de ses communes limitrophes, de la zone industrielle de Sidi Khaled ainsi qu'à l'irrigation des périmètres projetés: plateaux « El Esnam et vallée du Sahel » et « Bled El Madjen, Hamza et El Hachimia ».

### 3. Petits barrages, prises et dérivations

Le bassin AHS comporte aussi des petits barrages, prises et dérivations qui sont gérés par la Direction de l'Hydraulique de la Wilaya (DHW).

#### -Petits barrages

Les caractéristiques essentielles des petits barrages existants sont résumées dans le tableau III.9

**Tableau III.9 : Caractéristiques des petits barrages**

Petit barrage	Bassin	Code Sous Bassin	Coordonnées		wilaya	Oued	Superficie B.V (Km <sup>2</sup> )
			X (Km)	Y (Km)			
Douera	Côtiers Algérois	0212	520,25	373,11	Alger	Ben Amer	8,98
Cap Djinet		0207	590,55	394,24	Boumerdes	*	*
Freha		0216	643,04	384,13	Tizi Ouzou	Diss	552,45
Souk Telat		0219	611,26	377,19	Tizi Ouzou	Bougdoura	501,40
Azib Timizar		0209	685,62	388,32	Béjaia	Daas	130,36
Sidi Khelifa		0209	660,63	397,00	Tizi Ouzou	Ah si Youcef	219,64
Bounachi		0216	620,52	379,60	Tizi Ouzou	Rabta	62,03
Acif Nath Khelifa		0215	645,66	379,06	Tizi Ouzou	*	*
Barek		0206	552,40	369,00	Blida	Zerouala	1,87
Khraicia		0214	526,04	378,03	Alger	El Achour	14,65
Zaouia		0218	622,13	383,98	Tizi Ouzou	*	72,67
Sidi Daoud		0207	596,25	396,33	Boumerdes	Arbaa	*
Naciria		0220	601,84	383,65	Boumerdes	*	*
Bouameur		0218	620,83	380,20	Tizi Ouzou	*	*
Chender		0207	597,21	394,46	Tizi Ouzou	*	*
Djebbla		0216	635,24	386,43	Tizi Ouzou	Tacift	*
Ksari		0219	605,50	371,39	Tizi Ouzou	*	*
Zerazria	Hodna	0509	684,93	300,79	BBA	K'sob	465,04
Soubella		0511	720,51	266,07	M'sila	Soubella	198,02
M'cif		0523	689,44	221,77	M'sila	M'cif	4 209,07
Koudiat Ben Aida		0507	645,88	253,25	M'sila	*	6 180,35
Barika		0513	745,66	236,66	Batna	Barika	1 252,67
Djezzar		0511	737,00	251,43	Batna	Djezzar	218,73
Oued Chair		0510	642,47	273,91	M'sila	Chair	47,58
Bouhamoud	Isser	0904	594,37	362,23	Bouira	Bouhamoud	14,35
El Mellah		0903	555,80	318,60	Médéa	Mellah	178,92
Djemaa aval		0905	590,35	386,74	Boumerdes	Djemaa	122,74
Chertiouah	Soum-mam	1508	692,33	329,54	B.B.A	Chertiouah	117,45
Mehadjer		1508	683,98	330,67	B.B.A	Mehadjer	210,25
Mahouane		1506	741,31	331,91	Setif	El Guessar	23,45

(Source, PNE, 2002)

\* : pas d'information

## Présentation de la zone d'étude

- **Prises et dérivations :** Le bassin AHS, compte **6** prises et **4** dérivations permettant le transfert d'un volume d'eau vers les grands barrages de Tilestit, Bouroumi, Boukerdane et les petits barrages de Douera et Djamaa aval.

Les caractéristiques de ces ouvrages ainsi que sont résumées dans le tableau III.10:

**Tableau III.10 : Caractéristiques des prises et des dérivations**

Prise et dérivation	Bassin	Code Sous Bassin	Coordonnées			Wilaya	Oued	Superficie B.V (Km <sup>2</sup> )
			X (Km)	Y (Km)	Z (m)			
<b>P. Nador</b>	Côtiers Algérois	0203	473,14	361,53	40	Tipaza	Nador	202
<b>P. Djer</b>		0210	487,53	345,78	220	Blida	Djer	340
<b>D. El Harrach</b>		0214	356,40	533,00	124,00	Alger	El Harrach	387
<b>D. Mazafran</b>		0212	510,60	373,10	3,00	Alger	Mazafran	1 900
<b>D. Chiffa</b>		0211	505,97	338,44	-	Blida	Chiffa	281
<b>D. El Kiffan</b>		0220	605,25	388,25	-	Boumerdès	Sébaou	2 350
<b>P. Barbare</b>	Soummam	1501	626,90	342,55		Bouira	Barbar	30,23
<b>P. Ziane</b>		1502	615,25	334,70		Bouira	Ziane	774,58
<b>P. Azerou</b>		1504	651,60	322,99		B.B Arreridj	Azerou	605,47
<b>P. Berd</b>		1503	623,75	343,45		Bouira	Berd	53,68

(Source : Agence des bassins+PNE, 2002)

P : Prise  
D : Dérivation

La localisation des petits barrages, prises et dérivation et illustrée en figure III.13.

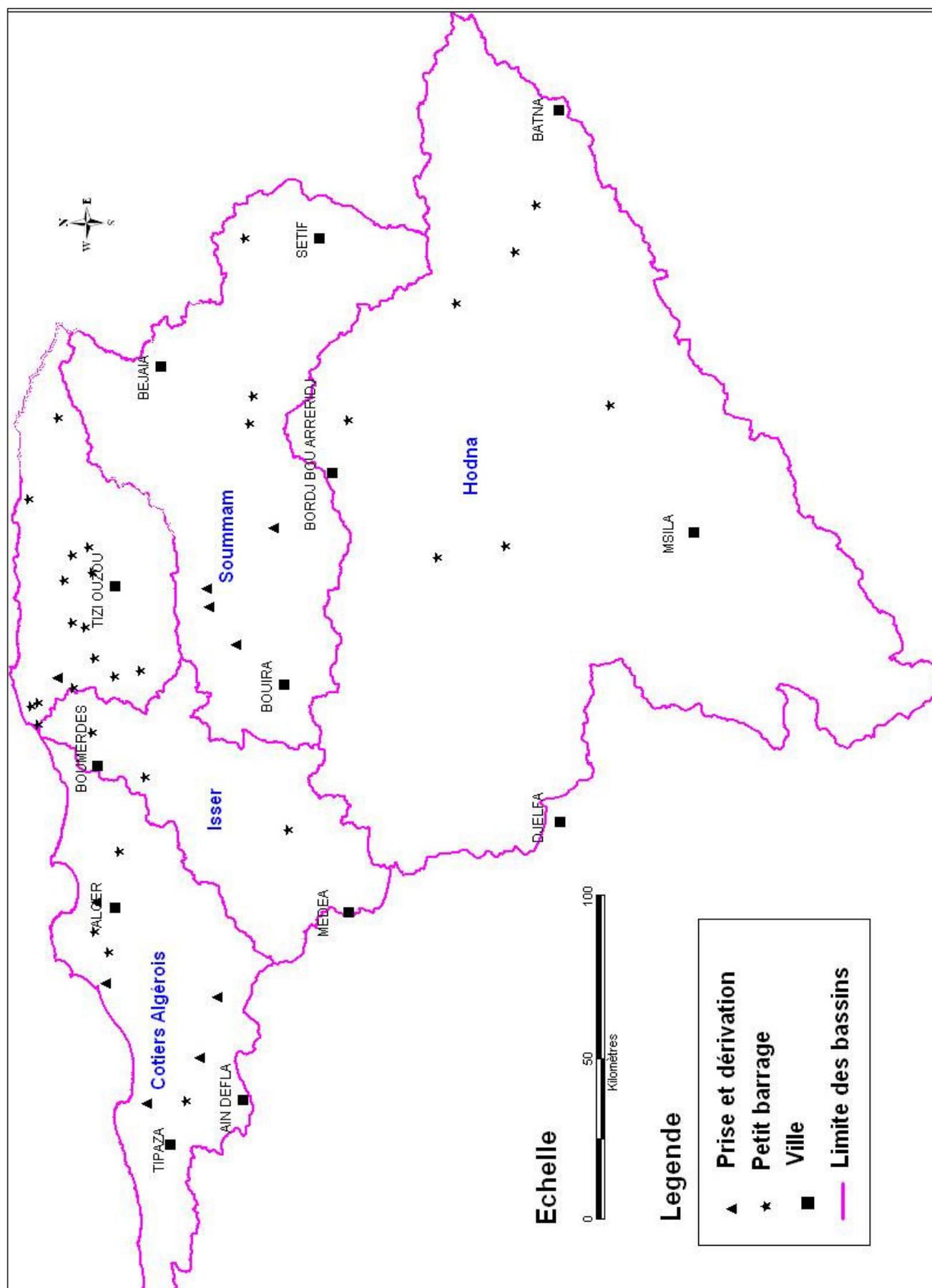


Figure III.13 : Localisation des petits barrages, prises et dérivation

#### **4. Retenues collinaires**

La réalisation des retenues collinaires a connu un véritable programme d'études et de réalisations initié par le secteur de l'hydraulique visant la satisfaction des besoins des petites exploitations agricoles.

Le bassin de l'AHS compte 268 retenues collinaires totalisant une capacité de 44,96 Hm<sup>3</sup> dont le plus grand nombre de retenues a été recensé au niveau du bassin côtier Algérois avec 124 retenues totalisant une capacité de 16,57 Hm<sup>3</sup>, 52 retenues se trouvent au bassin du Isser avec une capacité totale de 10Hm<sup>3</sup>, 75 retenues recensées au bassin de la Soummam avec une capacité totale de 17 Hm<sup>3</sup> et 17 retenues au bassin de Hodna avec une capacité totale de 1,39 Hm<sup>3</sup>.

Le tableau III.11 donne le nombre de retenues et leurs capacités par wilaya :

**Tableau III.11 : Nombre de retenues collinaires par wilaya**

Wilaya	Retenues	
	Nombre	Capacité * 1000 m <sup>3</sup>
Béjaia	35	1 285
B ;B Arreridj	3	3 185
Bouira	44	5 473
Setif	11	8 412
Tizi Ouzou	81	11 782
Boumerdes	45	3 790
Médéa	34	8 554
Batna	3	283
Blida	1	1 868
Ain Defla	2	120
Tipaza	1	120
Total	269	44 872

**(Source Agence des Bassins, 2002)**

Il est à signaler qu'environ 25% des retenues collinaires du bassin de l'AHS présentent un état de dégradation (détérioration de la digue, envasement...) engendrant ainsi des pertes considérables dans la ressource mobilisée.

# CHAPITRE IV : COLLECTE ET CRITIQUE DES DONNÉES

## Chapitre IV : Collecte et critique des données

### Introduction

Le comportement hydrologique des cours d'eau est basé sur les conditions climatiques du bassin versant (Roche 1963, Cosande, 2001). Ce sont les paramètres climatiques (précipitations, apports), morphologiques, lithologiques et biogéographiques, qui constituent les facteurs essentiels pour la quantification du transport solide à l'aval d'un ouvrage de mobilisation des eaux.

### IV.1 Choix des ouvrages

Les ouvrages sélectionnés sont répartis sur l'ensemble AHS comme le montre la figure IV.1.

#### 1. Choix des barrages, petits barrages et prises

Le choix a été dicté par la disponibilité de l'information et de la pertinence de l'ouvrage dans le contrôle du bassin versant. Le tableau IV.1 résume les ouvrages retenus.

**Tableau IV.1 : Barrages, petits barrages et prises retenus**

N°	code bge	ouvrage	Nom de l'oued	wilaya	Coordonnées			Type d'ouvrage	année de mise en service	Etat
					X(m)	Y(m)	Z(m)			
1	BG3501	Beni Amrane	Isser	Boumerdes	581559,76	375 950,13	90	barrage	1988	EXP
2	BG1501	Taksebt	Aissa	Tizi Ouzou	626863,57	375 793,36	260	barrage	2001	EXP
3	BG1502	Freha	Boubbir		643045,33	384 133,93	130	petit barrage		
4	BG1503	Sidi Khelifa	Ah si youcef		660630,36	397 009,05	20	petit barrage		
5	BG1504	Tichy Haf	Boussellam		675154,24	348 955,74	245	barrage		EXP
6	BG0201	El harrach	Ben Amar	Alger	520250,22	373 118,80	100	Prise		
7	BG3401	Ain Zada	Boussellam	B,B,A	720604,83	322 012,85	825	barrage	1986	
8	BG1001	Koudiat Acerdoune	Isser	Bouira	580069,45	354 229,20	217	barrage		EXP
9	BG0901	Djer	Djer	Blida	487539,9	345 781,89	220	Prise		
10	BG4201	Nador	Nador	Tipaza	473144,03	361 539,54	40	Prise		
11	BG4202	Mazafran	Mazafran		510106,47	373 990,04	10	Prise		

(Source : ANBT)

#### 2. Choix des retenues collinaires

Avec la collaboration des DHW de la zone d'étude, tous les anciens ouvrages envasés, ou en cours d'envasement ont été répertoriés pour la quantification du volume mort à partir de leurs capacités (Tableau IV.2).

Leur implantation est donnée en figure IV.1

Tableau IV.2: Retenues collinaires retenues

N°	Code	Ouvrage	Nom de l'oued	Commune	Wilaya	année de mise en service	Etat d'envasement en %
1	4201	Ain Zouaoua	Ain Zouaoua	Attatba	Tipaza	1986	100
2	4401	Oued Skhouana	Oued Skhouana	Boumefaâ	Ain defla	1985	100
3	1502	Freha	Freha	Freha (djaballah)	Tizi ousou	1987	100
4	3504	DAS Bourahla 1	DAS Bourahla 1	Sidi Daoud	Boumerdes	1988	100
5	3505	DAS Bourahla 2	DAS Bourahla 2			1988	100
6	3516	Kouanine	Kouanine	Baghlia		1990	100
7	3517	Naciria	Naciria	Naciria			100
8	3518	ND	Larbaa	Sidi Daoud			100
9	601	Boussedoum	Ighzer Boussedoum	Amalou	Béjaia	1986	100
10	1001	Oued Assila	Oued assila	Dirah	Bouira	1985	100
11	1002	Boumerzel (I)	Affl O. Bechloul	Ahl lakser		1971	100
12	1003	Boumerzel (II)	Affl O. Bechloul			1972	100
13	1004	Ouled el berdi-av	Ouled el berdi	Ouled el berdi		1985	100
14	1005	bordj oukhris	bordj oukhris	bordj oukhris		1987	100
15	1006	Gueria	El Gueria	bir ghalou		1987	100
16	1007	Ighil Libene	O,Tassala	Haizer		1987	100
17	1008	Chabet Merdja	Chabet Merdja			1986	40
18	1009	Gominsis	O.Gominsis	Taghzout		1987	40
19	1010	Djedala	O.Djedala	Djebahia		1987	50
20	1011	Bouchiouane	O.Bouchiouane	Kadiria		1988	50
21	1012	H.M'thene	O.H.M'thene	Ain Laloui		1987	60
22	1013	Merdja	Oued Merdja	Ain Bessam		1987	40
23	1014	harbitia	oued harbitia	Ridane		1987	100
24	1015	mihab	El mihab	Dirah		1986	60
25	1016	Dra alouest	Dra alouest	Hadjra zerga		1986	100
26	1017	Bergoug	Ch. Bergoug	Bouira		1987	40
27	1018	Ouled el berdi-am	Ouled el berdi	Ouled el berdi		1987	100
28	3403	Lechbour	Lechbour	Medjana	B,B,A	1998	100
29	3401	El H'mada		El-Achir		1989	100
30	1902	Draouet	Oued Draouet	Tala Ifacen	Sétif	1987	100
31	1904	Oued Ouled Saber	Oued Ouled Saber	Ouled Saber		1986	100
32	1905	RC Lemhari	ND			1985	100
33	2602	Oued Sedd	Oued Sedd	Kef Lakhdar		100	
34	2603	Mechtates Sedari	Mechtates Sedari			100	
35	2605	chabet Mehadjer	chabet Mehadjer	sidi Ziane	1988	100	
36	2606	Chabet Ain Bouaicha	Chabet Ain Bouaicha	Rébaia	1988	100	
37	2608	Oued Anseur El Hadj	Oued Anseur El Hadj	El Azizia	1986	100	
38	2609	Djoueb	Djoueb 02	Djoueb	1985	100	
39	2610	Chabet El Farfachia	Chabet El Farfachia			1986	100
40	2611	Chabet Tatouch	Chabet Tatouch	Beni slimane	1985	100	
41	2612	Chabet Arous	Chabet Arous		1986	100	
42	2613	Chabet Loualouia	Chabet Loualouia		1987	100	
43	2614	Chabet metreg	Chabet metreg		1986	100	
44	2616	Chabet Touhiah	Chabet Touhiah		1976	100	
45	2617	B.22	/	Sidi rabie	1985	100	
46	2621	Chabet Mahrouga	Chabet Mahrouga	El Azizia		100	
47	2622	Chabet Sfaï	Oued Sfaï	Rébaia	1986	30	
48	2623	Oued Rhorb	Oued Rhorb		10		
49	2624	Oued Messai	Oued Messai	El Azizia	1990	70	
50	2635	Chabet Bouhalfia	Chabet Bouhalfia	Souagui	1988	10	
51	2636	Chabet Defla	Chabet Defla	Ouled Brahim	1984	10	
52	2637	Chabet Drabine	Chabet Drabine		1986	10	
53	2638	Oued Ben Loulou	Oued Ben Loulou	Bouskène	1984	50	

(Source : DHW)

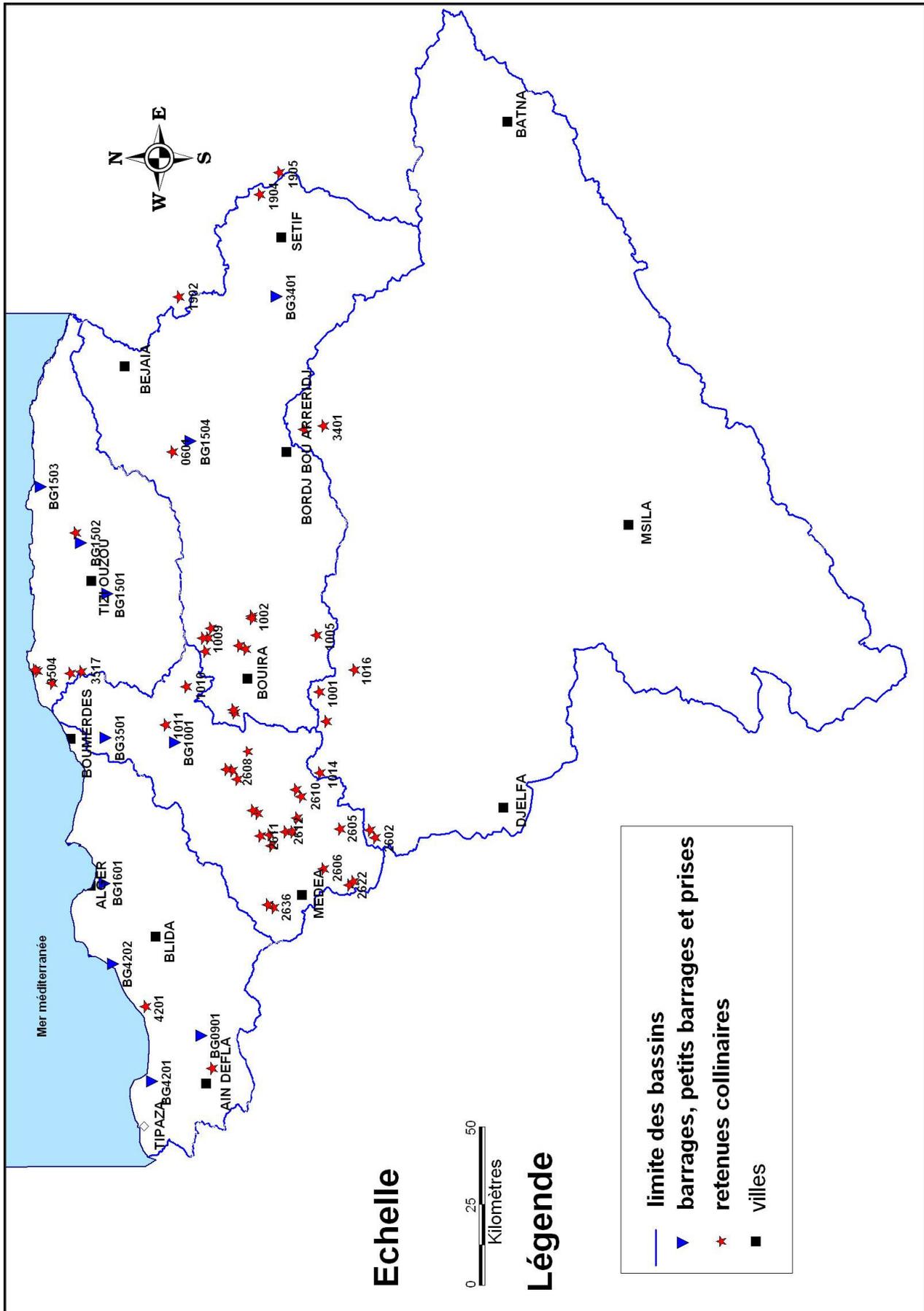


Figure IV.1: Localisation des ouvrages retenus

## IV.2 Caractéristiques hydromorphométriques

Le géo référencement des ouvrages a permis de délimiter les bassins versants au droit des ouvrages retenus et de déterminer leurs caractéristiques morphométriques (en annexe I, la délimitation d'une dizaine de bassins de retenues avec leurs réseaux hydrographiques et courbes de niveau).

Les résultats sont résumés dans les tableaux IV.3 et IV.4

**Tableau IV.3 :** Caractéristiques hydromorphométriques des S/bassins des barrages, petits barrages et prises

Ouvrage	S(Km <sup>2</sup> )	Per (Km)	H <sub>max</sub> (m)	H <sub>min</sub> (m)	D(km/km <sup>2</sup> )	I <sub>m</sub> (%)
Beni Amrane	3710,00	394,40	1800	50	0,58	17,27
Ain zada	2078,00	228,83	1750	850	0,63	7,45
Freha	552,45	116,00	1850	150	0,97	30,81
Koudiet acerdoune	2792,24	301,64	1800	200	0,57	13,62
Prise Djer	359,67	102,01	1500	200	0,68	26,46
Prise El Harrach	972,16	174,27	1600	25	0,65	25,83
Prise Nador	202,13	69,26	1100	50	0,91	16,88
Prise Mazafran	1833,48	268,47	1600	25	0,63	19,24
Sidi Khelifa	219,63	78,74	1500	50	0,95	28,19
Taksebt	454,24	101,16	2150	150	0,88	39,58
Tichy haf	4015,81	374,11	1750	300	0,65	12,69

S: superficie bu bassin versant de l'ouvrage (Km<sup>2</sup>); Per: périmètre du BV de l'ouvrage (Km); H<sub>max</sub>: altitude maximale (m); H<sub>min</sub>: altitude minimale (m); D: densité de drainage (Km/km<sup>2</sup>), I<sub>m</sub>: pente moyenne du bassin (%)

D'après les tableaux IV.3 et IV.4, le réseau hydrographique des bassins des ouvrages n'est pas dense, du faite que la densité de drainage (D) dans l'ensemble des bassins des barrages, prises et petits barrages ne dépasse pas 1 Km/Km<sup>2</sup> et 5 Km/Km<sup>2</sup> dans les bassins des retenues collinaires, a l'exception du bassin de Draout qui présente une densité de 25 Km/Km<sup>2</sup>.

La pente moyenne (I<sub>m</sub>) des bassins de l'ensemble des ouvrages varie entre 6,9 (%) dans le bassin Ouled el Berdi, arrivant 39,6 % dans le bassin de Taksebt, celle-ci présente une pente raide.

Tableau IV.4: Caractéristiques hydromorphométriques des s/bassins des retenues

Ouvrage	S (Km <sup>2</sup> )	Per (Km)	H <sub>max</sub> (m)	H <sub>min</sub> (m)	D(km/ km <sup>2</sup> )	I <sub>m</sub> (%)
Ain Zouaoua	1,64	5,95	260	104	3,24	26,35
Oued Skhouana	6,58	12,03	543	280	3,32	21,85
Freha	0,51	2,84	260	200	3,85	17,00
DAS Bourahla 1	0,50	3,00	540	120	3,59	47,70
DAS Bourahla 2	0,38	175,00	360	60	4,72	27,19
Kouanine	8,60	11,77	450	75	3,17	15,32
Naciria	0,58	3,06	236	140	3,84	13,52
Sidi Daoud	0,18	1,61	169	115	3,89	21,22
Boussedoum	2,60	7,20	959	240	3,23	36,15
Oued Assila	12,70	15,83	1100	887	4,03	18,05
Boumerzel (I)	9,04	16,15	760	560	2,83	13,84
Boumerzel (II)	6,70	12,00	900	560	2,97	11,85
Ouled el berdi-av	48,16	32,19	813	520	1,96	6,89
bordj oukhris	10,92	13,57	1021	758	3,28	10,99
Bir Ghalou	2,12	5,65	721	630	1,72	7,39
Ighil Libene	1,40	4,80	660	549	3,36	11,86
Chabet Merdja	1,00	4,40	590	555	3,00	6,42
Gominsis	3,00	8,15	901	545	2,97	18,67
Djedala	1,14	5,51	720	495	2,96	21,05
Bouchiouane	1,80	5,52	544	320	4,06	31,30
H.M'thene	2,70	7,20	826	648	3,12	9,56
Merdja	1,40	6,70	822	647	2,71	8,29
harbitia	1,21	6,03	1300	1000	4,29	21,19
mihab	4,15	10,50	1137	880	3,25	21,69
Dra alouest	20,00	19,22	1200	864	4,08	22,70
Bergoug	3,60	7,50	720	537	3,09	10,28
Ouled el berdi-am	47,00	30,00	813	540	1,96	7,00
Lechbour	32,25	29,40	1284	1023	3,29	10,96
El H'mada	20,23	22,13	1233	885	2,55	13,87
Draouet	25,85	20,11	1248	687	25,27	22,76
Oued Ouled Saber	6,18	10,07	1260	1100	2,63	9,77
RC Lemhari	15,43	17,10	1240	1120	2,75	10,09
Oued Sedd	4,70	9,90	1400	1040	2,46	18,46
Mechtates Sedari	1,47	5,35	1260	1050	4,91	16,56
chabet Mehadjer	3,03	8,11	1256	920	3,37	17,75
Chabet Ain Bouaicha	3,27	8,65	1060	780	3,87	19,06
Oued Anseur El Hadj	2,58	8,22	820	575	3,47	18,54
Djoueb	1,56	5,54	1212	878	2,18	21,45
Chabet El Farfachia	2,54	7,50	1200	870	2,07	15,68
Chabet Tatouch	3,02	7,53	776	647	2,78	12,65
Chabet Arous	6,04	10,28	1019	720	1,85	16,05
Chabet Loualouia	13,43	17,28	933	630	2,07	9,16
Chabet metreg	2,55	6,43	780	650	3,18	14,00
Chabet Touhiah	3,87	8,86	843	587	3,74	20,16
B.22	1,24	5,38	780	600	3,38	15,98
Chabet Mahrouga	2,10	7,44	620	520	3,60	19,15
Chabet Sfaï	9,40	14,50	1123	830	2,18	16,81
Oued Rhorb	33,50	29,60	1380	860	2,73	18,86
Oued Messai	10,30	13,60	941	585	3,40	11,40
Chabet Bouhalfia	1,80	5,40	858	740	2,61	7,90
Chabet Defla	3,30	9,00	1114	800	1,97	18,73
Chabet Drabine	3,50	8,20	926	745	2,57	13,03
Oued Ben Loulou	10,00	15,50	846	670	1,40	7,84

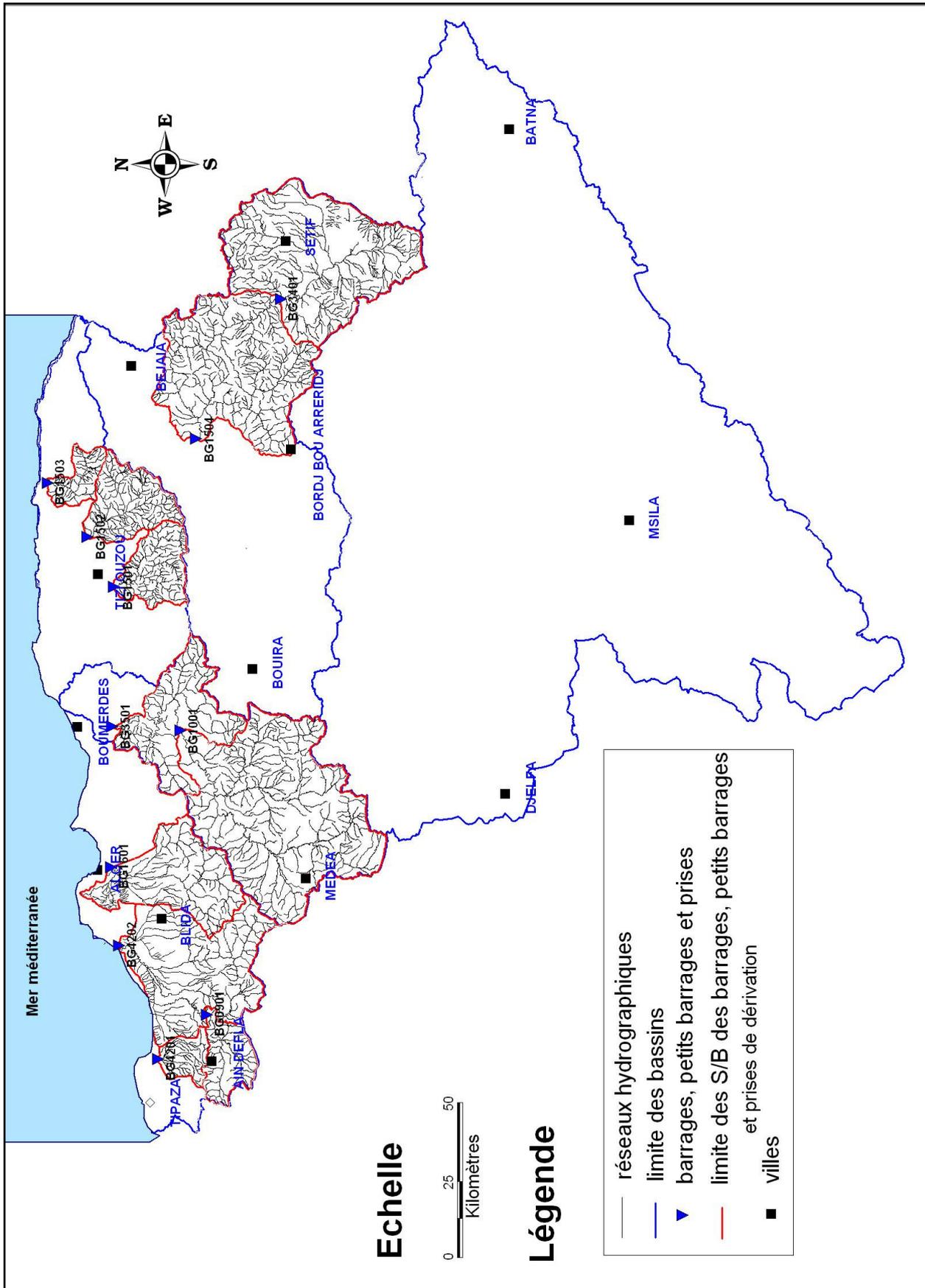


Figure IV.2 : Localisation des barrages, petits barrage et prises de dérivation avec leurs réseaux hydrographiques

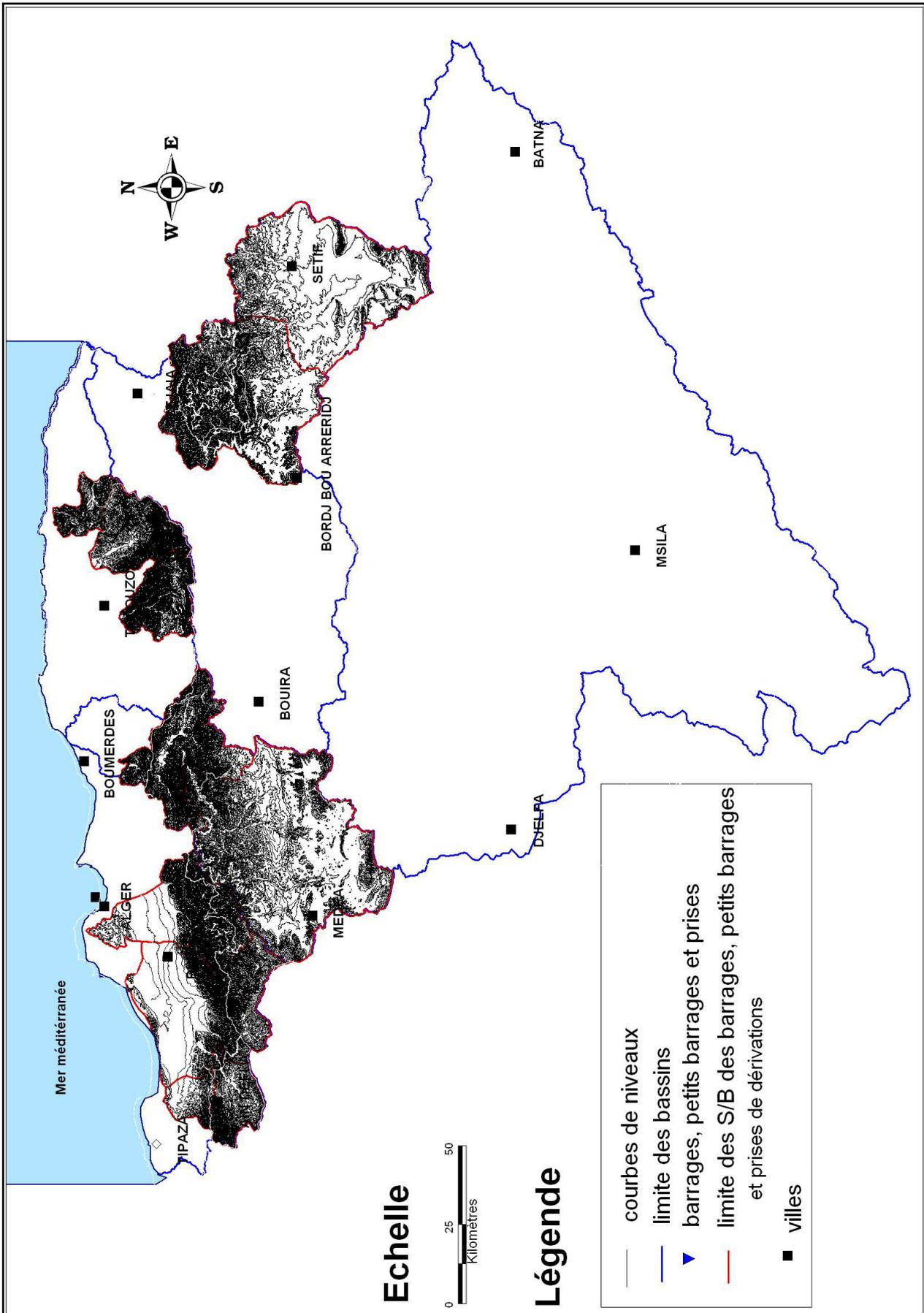


Figure IV.3 : Orographie des S/bassins des barrages, petits barrages et prises de dérivation

## IV.3 Caractéristiques climatiques et hydrologiques

### 1. Précipitation

Le choix des stations pluviométriques a été arrêté sur une vingtaine de stations; situées à proximité des ouvrages étudiés. L'agence Nationale des Ressources Hydraulique (A.N.R.H) est l'organisme collecteur des données pluviométriques et hydrométriques, le tableau IV.5 exprime les caractéristiques des stations retenues :

**Tableau IV.5** : Caractéristiques des stations pluviométriques

N°	Bassin	Code	Nom	CoordX (Km)	Coord Y (Km)	Altitude (m)	Période	précipitation moyenne (mm)
1	Algérois	021020	Ameur el Ain	488,1	352,75	120	1978-2006	553.5
2		020306	barrage meurad	473,80	349,90	270	1978-2006	595.2
3		021504	Azzega Ecole	649,90	384,00	430	1978-2006	903.1
4		021801	Cap Bengut phare	606.50	403.25	27	1978-2006	900.0
5		020810	El azaieb Mezrana	625.05	398.55	150	1978-2006	780.0
6		020602	Hamiz Barrage	558,55	367,4	130	1978-2006	667.5
7		021443	Altairac	525,4	375,30	20	1978-2007	432.7
8		021024	Helloula	486,3	362,30	57	1978-2007	469.1
9		021407	Douera	522,27	374,90	170	1978-2006	601.9
10		021601	Aghribs	644,7	390,70	730	1978-2006	1046.3
11		021810	T.Ouzou.ANRH	620,90	320,20		1984-2007	701.5
12	Soummam	151002	Akbou	665,4	353	240	1914-1976	483.4
13		150101	Soure el Ghzolane	590,60	316,45	882	1901-1999	459.6
14		150103	El Hachimia	600.65	325.10	730	1971-1999	381.8
15		150111	Irorhat Haizer	617,30	345,10	580	1969-1988	598.1
16		150105	Bouira	607,85	342,95	531	1908-1973	526.0
17		150703	Bou Birek	689,6	354,5	500	1942-2000	565.6
18		150607	Ain arnat	743,90	323,50	1100	1937-2000	344.1
19		151007	Tifra	678,7	375,70	450	1922-2000	723.7
20		150102	Ain Bessam	587.3	332.9	682	1922-1961	511.0
21	Isser	090403	Djebahia	594,80	353,45	520	1969-1998	392.6
22		090405	Kaidiria	588,36	359,8	178	1927-1954	257.6
23		090503	Ouled Bouhaddada	574,55	372,30	425	1968-1997	186.9
24	Hodhna	050201	Taghdirt Souk el Khm	616,15	302,20	1055	1969-1997	179.6
25		050102	Chellalet El Adaoura	565,03	293,80	990	1972-1997	262.7
26		050402	Dirah centre	595,35	299,2	800	1922-1998	254.1
27		050905	Bordj Bou Arreridj	685,80	309,95	922	1913-1995	363.2

(Source : ANRH)

Les précipitations moyennes des stations pluviométriques proches des bassins d'ouvrages dans le bassin versant de l'Algérois varient entre 430 mm et 1040 mm, elles varient entre 340 mm et 720 mm dans le bassin versant de la Soummam et oscillent entre mm 190 et 390 mm dans le bassin de Isser, alors qu'elles varient entre 180 mm et 360 mm dans le bassin versant du Hodna .

### 2. Hydrométrie

11 stations de débit liquide et solide réparties uniformément sur le bassin AHS contrôlant l'apport des 11 ouvrages (barrages, petits barrages et prises) ont été considérés à savoir : Barrage de Beni Amrane, Ain Zada, Koudiat Acerdoune, Tichy Haf, Barrage de Taksebt, petit barrage de Freha et de Sidi Khelifa ; prise Djer, prise d'El Harrach, Nador, Mazafran, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau IV.6.

**Tableau IV.6 : Caractéristiques des stations hydrométriques**

Nom de la station	Bassin	code	Oued	Superficie (Km <sup>2</sup> )	Coordonnées Lambert		Période (an)
					X (km)	Y (km)	
Hadjout CW.7	Algérois	020318	Bourkika	72	475,80	358,80	1989-1997
Tifezouine		020916	S.A Youcef	220	660,60	397,50	1990-1998
Boumedfaa		021006	Djer	336	483,60	343,40	1990-1997
Fer a cheval		021201	Mazafran	1 900	510,10	373,20	1976-1995
R .des pigeons		021301	El harrach	387	532,10	354,80	1978-1989
RN12		021715	Aissi	460	627,10	363,60	1988-1997
Fréha		021605	Diss	100	643,00	382,40	1990-1997
La traïlle	Isser	090408	Isser	2750	559,30	343,30	1971-1986
lakhdaria		090501	Isser	3620	579,10	368,8	1986-2002
Fermatou	Sou-mam	150601	Boussellam	105	742,00	329,40	1973-1995
Magroua		150702	Boussellam	2350	713,60	33310	1969-1992

**(Source : Agence des Bassins, PNE)**

En vu des données hydrométriques obtenues, la période d'observation, dans la plupart des stations hydrométriques, est assez courte et ne dépasse pas 20 ans d'une part, d'autres part, aucune de ces stations ne présente une série complète.

L'emplacement de ces stations est représenté dans la figure IV.4.

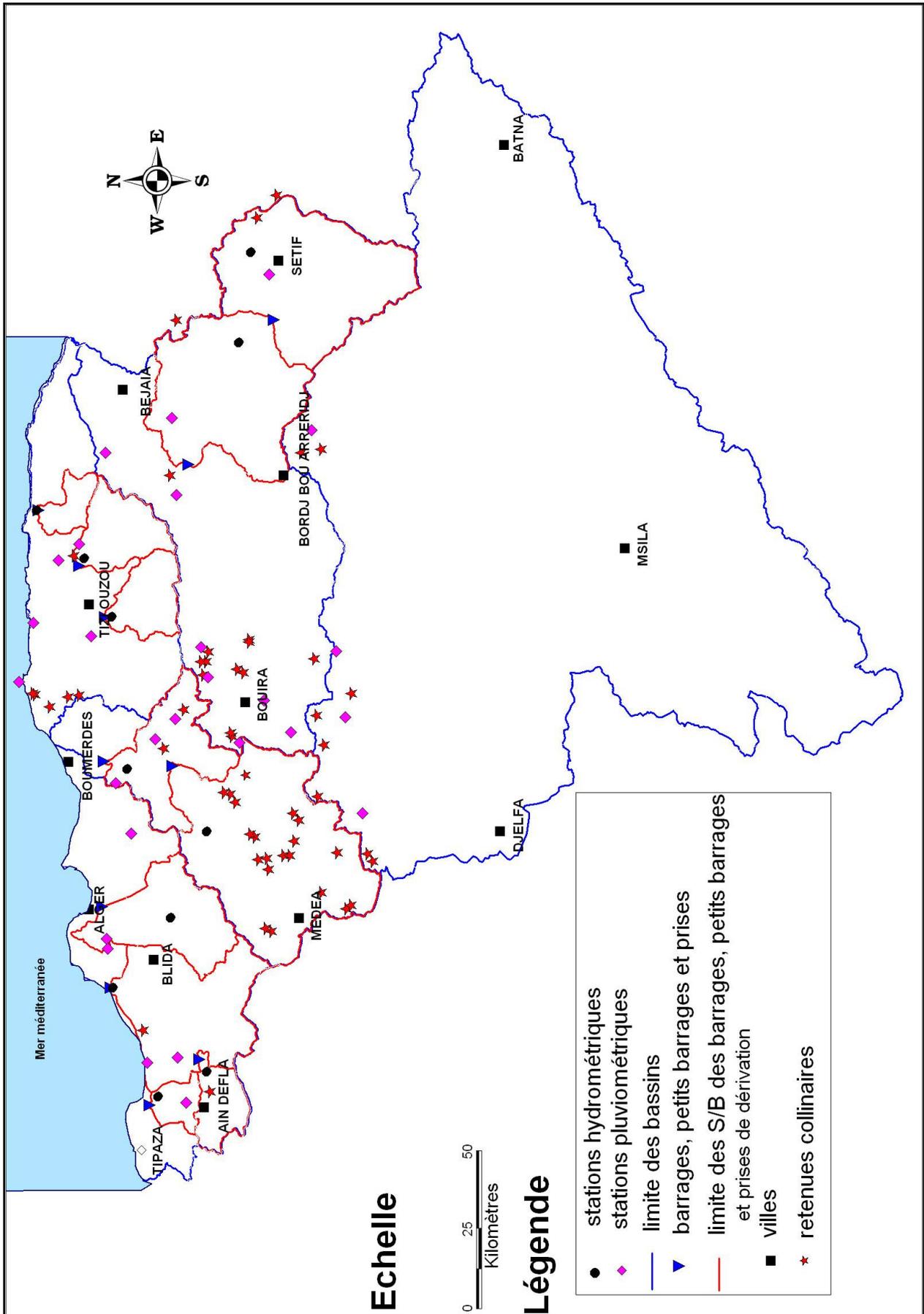


Figure IV.4 : Emplacement des stations hydrométriques et pluviométriques des ouvrages

### 3. Lame écoulée

Les lames écoulées des barrages, petits barrages et prises sont déduites de l'apport liquide et celles des retenues collinaires ont été tirées de la carte des écoulements moyens annuels sur le Nord de l'Algérie, éditée en 2005 par l' AHRH, les tableaux IV.7 et IV.8 résument les résultats trouvés :

**Tableau IV .7** : Lame écoulée : barrages, petits barrages et prises

nom de l'ouvrage	Le (mm)
Beni Amrane	119.68
Ain zada	43.31
Freha	52.49
Koudiet acerdoune	88.10
Prise Djer	63.25
Prise El Harrach	244.87
Prise Nador	21.57
Prise Mazafran	51.41
Sidi Khelifa	224.42
Taksebt	431.49
Tichy haf	45.57

D'après le tableau IV.7, les lames écoulées sont importantes dans les sites de Taksebt, Sidi khelifa et Beni Amrane alors qu'elles sont moins importantes dans les autres sites.

**Tableau IV.8** : Lame écoulée : retenues collinaires

nom de l'ouvrage	Le (mm)	nom de l'ouvrage	Le (mm)
Ain Zouaoua	75	Lechbour	20
Oued Skhouana	75	El H'mada	15
Freha	125	Draouet	175
DAS Bourahla	175	Oued Ouled	50
DAS Bourahla	175	RC Lemhari	35
Kouanine	175	Oued Sedd	15
Naciria	175	Mechtates	15
Larbaa	175	chabet Mehadjer	35
Boussedoum	75	Chabet Ain	35
Oued Assila	50	Oued Anseur El	35
Boumerzel (I)	35	Djoueb	35
Boumerzel (II)	35	Chabet El	75
Ouled el berdi-	50	Chabet Tatouch	35
bordj oukhris	15	Chabet Arous	35
Guerria	75	Chabet	35
Ighil Libene	175	Chabet metreg	35
Chabet Merdja	175	Chabet Touhiah	35
Gominsis	175	B.22	35
Djedala	125	Chabet	35
Bouchiouane	125	Chabet Sfaï	35
H.M'thene	75	Oued Rhorb	35
Merdja	75	Oued Messai	35
harbitia	75	Chabet	35
mihab	35	Chabet Defla	75
Dra alouest	15	Chabet Drabine	35
Bergoug	75	Oued Ben	75
Ouled el berdi-	50		

(Source : ANRH)

Les lames écoulées sont considérables dans les sites de Bourahla, Draout, Ighil Libene, Chabet Merdja Gomensis, Kouanine, Naciria et Larbaa, alors qu'elles sont moins considérables dans les autres sites.

#### 4. Analyse et traitement des données

##### 4.1. Analyse des précipitations annuelles

Un ajustement à différentes lois de distribution des fréquences a été élaboré : loi Log normale, Racine Normale, Normale, Gumbel. Le meilleur ajustement des précipitations annuelles a été donné par les lois Normale et Log normale pour la majorité des stations.

27 stations pluviométriques ont fait l'objet de cette étude, l'ajustement de leurs séries pluviométriques annuelles est donné en annexe II.

##### 4.2. Analyse des apports liquides

###### a. Comblement des lacunes

Parmi les 11 stations d'apports liquides, les séries des stations **R.des pigeons et Hadjout CW.7**, présentent des durées d'observations assez courtes et comportant des lacunes, ainsi un comblement de ces dernières s'avère obligatoire aussi bien aux échelles mensuelles qu'annuelles.

LABORDE a proposé une approche globale permettant de combler plus rapidement les lacunes et lisser les erreurs et anomalies de mesures en se basant sur l'ACP.

Celle ci a permis de reconstituer l'apport liquide  $X_e(i,j)$  pour une année  $i$  et un mois  $j$  à partir des observations  $c(i,1), c(i,2), \dots, c(i,nc)$  pour l'année  $i$  sur  $nc$  composante, et des projection  $a(1,j), a(2,j), \dots, (nc,j)$  de la variable  $j$  sur les  $nc$  composantes :

$$X_e(i, j) = MX(j) + SX(j) * \{a(1, j)c(i, j) + a(2, j)c(i,2) + \dots + a(k, j)c(i, k) + \dots + a(nc, j)c(i, nc) \}$$

où  $MX(j)$  et  $SX(j)$  sont la moyenne et l'écart type des apports liquides annuels à la station  $j$ .

Cette estimation  $X_e(i,j)$  diffère bien sûr de la vraie valeur  $X(i,j)$  mais qui peut très bien être entachée d'erreurs. Par contre  $X_e(i,j)$  est la valeur la plus probable compte tenu de ce qui s'est passé sur l'ensemble du domaine et qui est représenté par les valeurs prises par les composantes.

Cette estimation  $X_e(i,j)$  est utilisée pour combler une lacune d'une année  $i$  pour un mois  $L$  l'objectif est de combler les matrices de  $n_v$  mois durant les  $n_0$  années d'observation.

L'ACP se fait sur une matrice  $[X]$  complète, malheureusement les  $n_v$  mois n'ont pas tous été observés durant les  $n_0$  de la période de référence de la matrice des données. Cette matrice comporte des **trous** correspondant aux lacunes d'observation qu'il convient de combler.

$$[X] = \begin{pmatrix} x(1,1) & \text{inconnu} & \dots & x(1, j) & \dots & x(1, n_v) \\ x(2,1) & x(2,2) & \dots & x(2, j) & \dots & \text{inconnu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(i,1) & x(i,2) & \dots & x(i, j) & \dots & x(i, n_v) \\ \text{inconnu} & \dots & \dots & \text{inconnu} & \dots & \dots \\ x(no,1) & x(no,2) & \dots & x(no, j) & \dots & x(no, n_v) \end{pmatrix}$$

###### b. Procédé

Les moyennes expérimentales  $M_{x_0}(j)$  et les écart-types expérimentaux  $S_{x_0}(j)$  des apports liquides pour chaque station  $j$  sur les seules années réellement observées sont calculés :

$$[M_{x_0}] = |M_{x_0}(1) \quad M_{x_0}(2) \quad \dots \quad M_{x_0}(j) \quad \dots \quad M_{x_0}(n_v)|$$

$$[S_{x_0}] = |S_{x_0}(1) \quad S_{x_0}(2) \quad \dots \quad S_{x_0}(j) \quad \dots \quad S_{x_0}(n_v)|$$

La matrice des valeurs centrées réduites est évaluée par :

$$u(i, j) = \frac{x(i, j) - M_{x_0}(j)}{S_{x_0(j)}} \dots\dots\dots(IV.1)$$

Et calculer pour chaque observation la moyenne des valeurs centrées réduites disponibles :  $\bar{u}(i)$

$$[u] = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccc} u(1,1) & \text{inconnu} & \dots & u(1, j) & \dots & u(1, n_v) \\ u(2,1) & u(2,2) & \dots & u(2, j) & \dots & \text{inconnu} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u(i,1) & u(i,2) & \dots & u(i, j) & \dots & u(i, n_v) \\ \text{inconnu} & \dots & \dots & \text{inconnu} & \dots & \dots \\ u(no,1) & u(no,2) & \dots & u(no, j) & \dots & u(no, n_v) \end{array} \right| \begin{array}{l} \bar{u}(1) \\ \bar{u}(2) \\ \dots \\ \bar{u}(i) \\ \dots \\ \bar{u}(n_0) \end{array} \end{array} \quad \text{où } [u]: \text{ matrice centrée réduite}$$

Dans une première étape, chaque valeur inconnue X(i,j) est remplacée par une valeur :

$$Xe_o(i, j) = \frac{\bar{u}(i) - M_{x_0}(j)}{\sigma_{x_0}(j)}$$

Correspond à la variable réduite pour cette observation. Une première matrice complète [X<sub>0</sub>] est obtenue : Xe<sub>o</sub>(i, j)

$$[X_0] = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccc} x(1,1) & xe_o(1,1) & \dots & x(1, j) & \dots & x(1, n_v) \\ x(2,1) & x(2,2) & \dots & x(2, j) & \dots & xe_o(2, n_v) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(i,1) & x(i,2) & \dots & x(i, j) & \dots & x(i, n_v) \\ xe_o(i+1,1) & \dots & \dots & xe_o(i+1, j) & \dots & \dots \\ x(no,1) & x(no,2) & \dots & x(no, j) & \dots & x(no, n_v) \end{array} \right| \end{array}$$

L'ACP est lancée sur cette matrice [X<sub>0</sub>], les projections des variables [a<sub>1</sub>] et des observations [c<sub>1</sub>] sur les k seules premières composantes principales pouvant avoir une signification physique sont obtenus :

$$[a_1] = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccccc} a_1(1,1) & a_1(1,2) & \dots & a_1(1, j) & \dots & a_1(1, n_v) \\ a_1(2,1) & a_1(2,2) & \dots & a_1(2, j) & \dots & a_1(2, n_v) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_1(k,1) & a_1(k,2) & a_1(1,1) & a_1(k, j) & a_1(1,1) & a_1(k, n_v) \end{array} \right| \end{array} \quad [c_1] = \begin{array}{c} \left| \begin{array}{cccc} c_1(1,1) & c_1(1,2) & \dots & c_1(1, k) \\ c_1(2,1) & c_1(1,2) & \dots & c_1(1, k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_1(i,1) & c_1(i,2) & \dots & c_1(1, k) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_1(no,1) & c_1(no,2) & \dots & c_1(no, k) \end{array} \right| \end{array}$$

Ainsi que les matrices des moyennes et écarts types :

$$[M_{x_1}] = |M_{x_1}(1) \quad M_{x_1}(2) \quad \dots \quad M_{x_1}(j) \quad \dots \quad M_{x_1}(n_v)|$$

$$[S_{x_1}] = |S_{x_1}(1) \quad S_{x_1}(2) \quad \dots \quad S_{x_1}(j) \quad \dots \quad S_{x_1}(n_v)|$$

Il est alors possible de reconstituer chaque observation manquante  $x(i,j)$  par une nouvelle valeur estimée  $x_{e_1}(i,j)$  :

$$X_{e_1}(i, j) = MX_1(j) + SX_1(j) * \{a_1(1, j)c_1(i, j) + a_1(2, j)c_1(i,2) + \dots + a_1(k, j)c_1(i, k) + \dots + a_1(k, j)c_1(i, k) \}$$

Cette estimation n'est pas très correcte puisque l'ACP a été effectuée sur une matrice « bouchée » à partir des moyennes interannuelles. Cependant,  $X_{e_1}(i, j)$  est une meilleure estimation que  $X_{e_0}(i, j)$  puisqu'elle tient compte des observations aux autres mois pour cette année  $j$ . Le processus est réitéré en remplaçant dans la matrice  $[X_0]$  chaque  $X_{e_0}(i, j)$  par les  $X_{e_1}(i, j)$  adaptés. Une nouvelle matrice  $[X_1]$  est obtenue :

$$[X_1] = \begin{pmatrix} x(1,1) & x_{e_1}(1,1) & \dots & x(1, j) & \dots & x(1, n_v) \\ x(2,1) & x(2,2) & \dots & x(2, j) & \dots & x_{e_1}(2, n_v) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x(i,1) & x(i,2) & \dots & x(i, j) & \dots & x(i, n_v) \\ x_{e_1}(i+1,1) & \dots & \dots & x_{e_1}(i+1, j) & \dots & \dots \\ x(no,1) & x(no,2) & \dots & x(no, j) & \dots & x(no, n_v) \end{pmatrix}$$

L'ACP est recommencée sur la matrice  $[x_1]$  permettant d'obtenir de nouvelles matrices  $[c_2]$ ,  $[a_2]$ ,  $[Mx_2]$  et  $[Sx_2]$  d'où les nouvelles estimations  $x_{e_2}(i,j)$  sont obtenues.

A chaque itération, les estimations sont modifiées pour les observations manquantes pour obtenir une matrice bouchée dont le traitement des données de débits liquides est effectué

Les résultats sont donnés en Annexe I

➤ **Traitement par l'Analyse en composantes principales**

Une A.C.P sur les matrices bouchées des apports liquides a été procédé, en recherchant les 3 premières composantes principales. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau IV.9

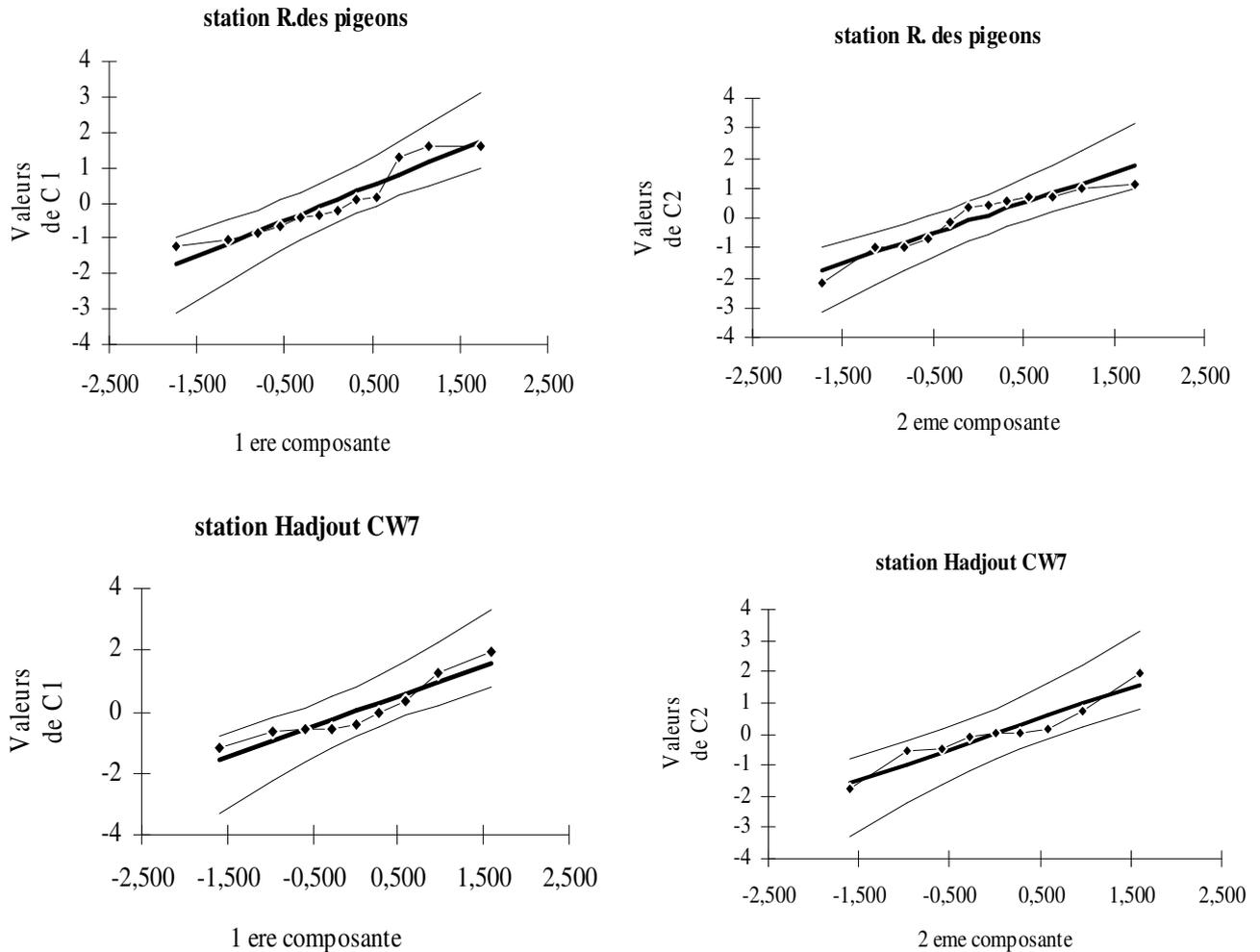
**Tableau IV.9 : Résultats de l'ACP**

<b>station de R.des pigeons (021301)</b>			
<b>Composante</b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>
<b>Valeurs propres</b>	3,90	2,78	1,73
<b>Variances expliquées (%)</b>	39	28	17
<b>Variances cumulées (%)</b>	39	67	84
<b>station de Hadjout CW.7 (020318)</b>			
<b>Composante</b>	<b>C<sub>1</sub></b>	<b>C<sub>2</sub></b>	<b>C<sub>3</sub></b>
<b>Valeurs propres</b>	5,96	2,95	1,57
<b>Variances expliquées (%)</b>	50	25	13
<b>Variances cumulées (%)</b>	50	74	87

Au vu du tableau IV.9, la variance expliquée par les deux premières composantes  $C_1$  et  $C_2$  dépasse les 66%, dans les deux stations R.des pigeons et Hadjout CW.7, permettent d'expliquer les 2/3 de cette variance. Ces composantes expliquent une part forte de la variance et semble ne servir qu'à reconstituer de faibles écarts sur l'ensemble des stations.

➤ **Ajustement des deux premières composantes  $C_1$   $C_2$  à la loi normale**

La figure IV.5 montre que les deux premières composantes  $C_1$  et  $C_2$  s'ajustent bien à la loi normale :



**Figure IV.5 :** Ajustement à la loi Normale des composantes  $C_1$  et  $C_2$

Les observations en un mois  $X$  ne dépendent que des valeurs prises par  $C_1$  et  $C_2$  et d'un résidu aléatoire. Puisque les deux premières composantes principales de toutes les stations s'ajustent bien à la loi normale, la régression est linéaire peut être établie.

➤ **Reconstitution des variables  $X$**

Nous avons procédé à la reconstitution des variables  $X$  de chaque station, après avoir évalué les paramètres de régression multiple entre les variables  $X$  et les deux premières composantes  $C_1$  et  $C_2$  d'après les  $n$  observation réellement disponibles.

La démarche utilisée pour la reconstitution des variables est comme suit :

Pour chaque station et  $n$  année d'observation sur chaque mois, les apports liquides observés  $X$ , les moyennes, l'écart type et le coefficient de corrélation total  $R$  entre  $X$ ,  $C_1$  et  $C_2$  (noté moy des  $X$ , moy des  $C_1$ , moy des  $C_2$ ,  $rxC_1$ ,  $rxC_2$ ,  $rC_1C_2$ ) ont été calculé.

A partir de ces paramètres, le coefficient de corrélation multiple R entre X, C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub> est évalué et la droite de régression établie permettant de reconstituer les variables.

Pour chaque observation X manquante en année n, son estimation X<sub>n</sub>, à partir de ces deux composantes, formant un vecteur X<sub>n</sub>

$$X_n = aC_{1n} + bC_{2n} + c$$

La validation des coefficients de corrélation est donnée par la table de Fischer (Tableau IV.10)

**Tableau IV.10 :** Coefficient de corrélation multiple entre les variables X et les composantes C<sub>1</sub> et C<sub>2</sub>

Mois/Station	sept	oct	nov	déc	janv	fév	mars	avril	mai	juin
R.des pigeons $\alpha = 0,05 ; R = 0,53$	0,87	0,91	0,8	0,53	0,81	0,69	0,68	0,90	0,87	0,96
Hadjout CW7 $\alpha = 0,05 ; R = 0,60$	0,81	0,80	0,94	<u>0,25</u>	/	/	/	/	/	/

Au vu du tableau IV.10, tout les coefficients de corrélation calculés sont supérieurs à la valeur critique, mise a part celui trouvé en mois de décembre dans la série de Lakhdaria (0,25) inférieur à celui critique.

Les résultats de calcul de l'apport liquide interannuel de toutes les stations sont résumés dans le tableau IV.11 :

**Tableau IV.11 :** Apport liquide interannuel des barrages, petits barrages et prises de dérivation

N°	nom de l'ouvrage	code Station	Apport liquide inter-annuel (Hm <sup>3</sup> /an)
1	Beni Amrane	090501	444.00
2	Ain Zada	150601	90.00
3	Freha	021605	29.00
4	Koudiet Acerdoune	090408	246.00
5	Prise Djer	021006	50.00
6	Prise El Harrach	021301	238.00
7	Prise Nador	020318	30.00
8	Prise Mazafran	021201	148.00
9	Sidi Khelifa	020916	50.00
10	Taksebt	021715	196.00
11	Tichy haf	150702	183.00

L'apport liquide interannuel est important dans le bassin de Beni Amrane, alors qu'il est faible dans le bassin de Fréha et prise Nador et prise Djer.

### 4.3 Analyse de l'apport solide

Les séries des apports solides sont incomplètes. Une relation débit liquide est recherchée pour compléter les séries ; malheureusement, il s'est avéré que cette démarche est fastidieuse et surtout peu fiable. En effet, les données brutes contiennent des erreurs systématiques et le nombre d'observations

et de données dans les apports liquides est beaucoup plus important que celui des apports solides, impliquant .L'incapacité de combler une matrice qui comporte plus de 70% de lacunes, l'utilisation de la régression simple répercutait ces erreurs, ce qui nous a poussé à changer d'approche.

Le comblement, par la même méthode que celle utilisée avec les apports liquides a donné des résultats aberrants et surestimés surtout en période d'étiage, du fait que le nombre de lacunes est très important. De ce fait, l'apport solide annuel a été sommé sur le nombre de jours observés dans l'année.

Les résultats de calcul de l'apport solide interannuel de toutes les stations sont résumés dans le tableau IV.12 où l'érosion spécifique (Es) est déduite à partir de la formule (IV.2) :

$$Es = As/S \quad (IV.2)$$

où

Es : érosion spécifique et Tonnes/ha.an

As : apport solide en tonnes/an et S : surfaces du sous bassins de l'ouvrages en Ha

**Tableau IV.12 : Apport solide interannuel des barrages, petits barrages et prises**

N°	nom de l'ouvrage	code station	Moyenne de nbre de jour sur l'année	As (tonnes/an)	Erosion spécifique (tonne/ha.an)
1	Beni Amrane	090501	127	1 200 283.6	3.24
2	Ain zada	150601	11	32 203	0.15
3	Freha	021605	83	26 595.81	0.48
4	Koudiet acerdoune	090408	117	4 589 972.9	16.44
5	Prise Djer	021006	22	427 614.9	11.89
6	Prise el harrach	021301	47	676 119	6.95
7	Prise nador	020318	37	3 246.33	0.16
8	Prise mazafran	021201	39	934 452	5.10
9	Sidi Khelifa	020916	60	11 784	0.54
10	Taksebt	021715	51	71 77.6	0.16
11	tichy haf	150702	47	457 886.59	1.14

Au vu du tableau IV.12, l'apport solide interannuel calculé au droit des différentes stations de débit solide est sous estimé, vu le manque de donnée et les lacunes existantes surtout au niveau de la prise Djer, le nombre de jour d'observations est insignifiant (22 jours).

L'érosion spécifique au site du bassin de Koudiet Acerdoune est de 16,4 tonnes/ha pour un nombre d'observation de 117 jours les 365 jours de l'année, alors qu'elle est de 11,9 tonnes/ha sur un nombre d'observations de 22 jours sur les 365 jours dans le site de la prise Djer.

Les levés bathymétriques des barrages de Beni Amrane, Ain Zada et Taksept résumé dans le tableau IV.13 et recueillies de l'A.N.B.T montrent bien la sous estimation de l'érosion annuelle calculée par les débits solides des stations citées au paravent (tableau IV.13):

**Tableau IV.13 : Levés bathymétriques des barrages (2009)**

N°	Barrage	Années de mise en eau	Capacité initiale Hm <sup>3</sup>	Capacité dernier levé Hm <sup>3</sup>	Envasement annuel Hm <sup>3</sup>	Erosion spécifique (tonnes/Ha.an)
1	AIN-ZADA	1986	125.00	121.4	0.5	3,85
2	BENI-AMRANE	1988	16.00	11.85	4.1	17,68
10	TAKSEBT	2001	175.00	181.02	0.265	9,46

(Source : ANBT)

De ce fait, les ouvrages dont leurs débits sont sous-estimés seront écartés de la base de données. L'ensemble des barrages retenus sera de trois (Beni Amrane, Ain Zada et Taksept) en plus des 53 retenues collinaires.

L'érosion spécifique des sites des retenues collinaires a été estimée à partir de leur capacité, vu que ces ouvrages sont complètement envasés ou ayant un taux d'envasement assez élevé, le volume est égal à la capacité ou à un pourcentage de cette dernière.

$$E_s = \frac{V_m \times \gamma}{T \times S} \quad (IV.3)$$

Où

$V_m$  : volume mort en  $m^3$

T : durée de vie en an

S : superficie en  $Km^2$

$\gamma$  : densité spécifique en tonnes/ $m^3$

La durée de vie des retenues collinaires est égale en moyenne à : 20 ans

La densité spécifique des matériaux est en général égale à 1,6 tonnes/ $m^3$

D'où les résultats de calcul sont affichés dans le tableau IV.14.

**Tableau IV.14 : Erosion spécifique des bassins des retenues collinaires**

Ouvrage	Erosion spécifique (tonne/ha.an)	Ouvrage	Erosion spécifique (tonne/ha.an)
Ain Zouaoua	4.28	Lechbour	33.07
Oued Skhouna	3.89	El H'mada	15.22
Freha	37.65	Draouet	61.90
DAS Bourahla 1	32.00	Oued Ouled Saber	32.36
DAS Bourahla 2	42.11	RC Lemhari	18.66
Kouanine	9.30	Oued Sedd	8.51
Naciria	41.38	Mechtates Sedari	48.98
Larbaa	44.44	chabet Mehadjer	1.32
Boussedoum	18.46	Chabet Ain Bouaicha	16.39
Oued Assila	18.58	Oued Anseur El Hadj	21.71
Boumerzel (I)	4.42	Djoueb	1.28
Boumerzel (II)	4.78	Chabet El Farfachia	18.90
Ouled el berdi-av	2.66	Chabet Tatouch	31.79
bordj oukhris	16.12	Chabet Arous	7.95
Guerria	11.32	Chabet Loualouia	4.77
Ighil Libene	28.57	Chabet metreg	31.37
Chabet Merdja	16.00	Chabet Touhiah	38.24
Gominsis	7.42	B.22	1.94
Djedala	6.10	Chabet Mahrouga	22.10
Bouchiouane	4.04	Chabet Sfaï	1.98
H.M'thene	23.19	Oued Rhorb	1.95
Merdja	20.87	Oued Messai	34.25
harbitia	39.67	Chabet Bouhalfia	2.42
mihab	7.33	Chabet Defla	3.92
Dra alouest	3.80	Chabet Drabine	3.24
Bergoug	11.59	Oued Ben Loulou	9.45
Ouled el berdi-am	1.28		

Au vu du tableau IV.14, l'érosion annuelle est différente d'un site à un autre. Elle est de 61,9 tonne/ha dans le site de Draout, 49, 47, 44, 42 et 41 tonnes/ha respectivement dans les sites de Mechtates Sterrari, Fréha, Larbaa, Bourahla 2 et Naciria.

#### IV.4 Couvert végétal

En plus des paramètres hydromorphologique et climatique, un facteur très important responsable de l'envasement qu'est le couvert végétal est introduit. Pour calculer ces paramètres dans les différents sous bassins des ouvrages retenues, des images satellitaires Landstat UTM<sup>+</sup> récentes (prises en 2010) avec une résolution de 30m × 30m qui couvrent toute la zone d'étude sont utilisées. Ces images offrent la possibilité de séparer et de classer les informations sur huit (08) bandes différentes, chacune d'elles est sensible à une longueur d'onde de spectre électromagnétique. Ceci a permis d'accéder à un maximum d'informations à traiter selon les objectifs recherchés.

Afin d'exploiter ces images satellitaires, le logiciel ERDAS est utilisé, la couleur marron foncé caractérise les zones défrâchées (terre labourées, route, barrages..), la couleur vert foncé caractérise les zones à végétation dense et les autres couleurs gris, vert clair et jaune caractérisent les zones intermédiaires.

L'application sur les sous bassins des barrages, petits barrages et prises est représentés sur la figure IV.6 (NDVI : indice de végétation)

Ainsi l'Indice de Végétation est calculé en considérant que la couleur vert foncé qui représente la végétation fixe dans le temps (forêts, bois, buissons, maquis, arbre, oliviers).

Pour confirmer la validité de ce choix, des missions dans les wilayas de Bouira et Médéa, où plusieurs sites d'ouvrages (barrages, retenues) ont été réalisés.

Les résultats de calcul sont affichés dans le tableau IV.15 :

**Tableau IV.15** : Couvert végétal des S/bassins des barrages, petits barrages et prises en %

Ouvrage	Superficie du Bv (Km <sup>2</sup> )	Superficie des forêts (Km <sup>2</sup> )	Cv (%)
Beni Amrane	3710	704.89	19.12
Ain zada	2078	93.16	4.48
Fréha	552.45	310.74	56.23
Koudiet acerdou	2792.24	419.15	15.01
Prise Djer	359.67	59.69	16.6
Prise el harrach	972.16	442.49	45.52
Prise nador	202.13	68.53	33.9
Prise mazafran	1833.48	660.97	36.05
Sidi Khlifa	219.63	152.28	69.33
Taksebt	454.24	212.32	46.74
tichy haf	4015.81	122.12	3.04

Sur les sites de Fréha et Sidi Khlifa, la couverture végétale est assez dense et représente respectivement 56% et 69%. Elle est moins dense sur les sites de Mazafran, Harrach et Taksebt (36, 45 et 46%) et faible ne dépasse pas les 20% sur les autres sites.

Concernant les sites des petits ouvrages (retenues collinaires), une cinquantaine d'ouvrages ont été identifiés dont la surfaces de leurs bassins versants est peu importante, le même procédé a été appliqué sauf que le couvert végétal des sites de ces petits ouvrages est supposé le même que celui de leurs communes, les résultats de calcul sont affichés dans le tableau IV.16

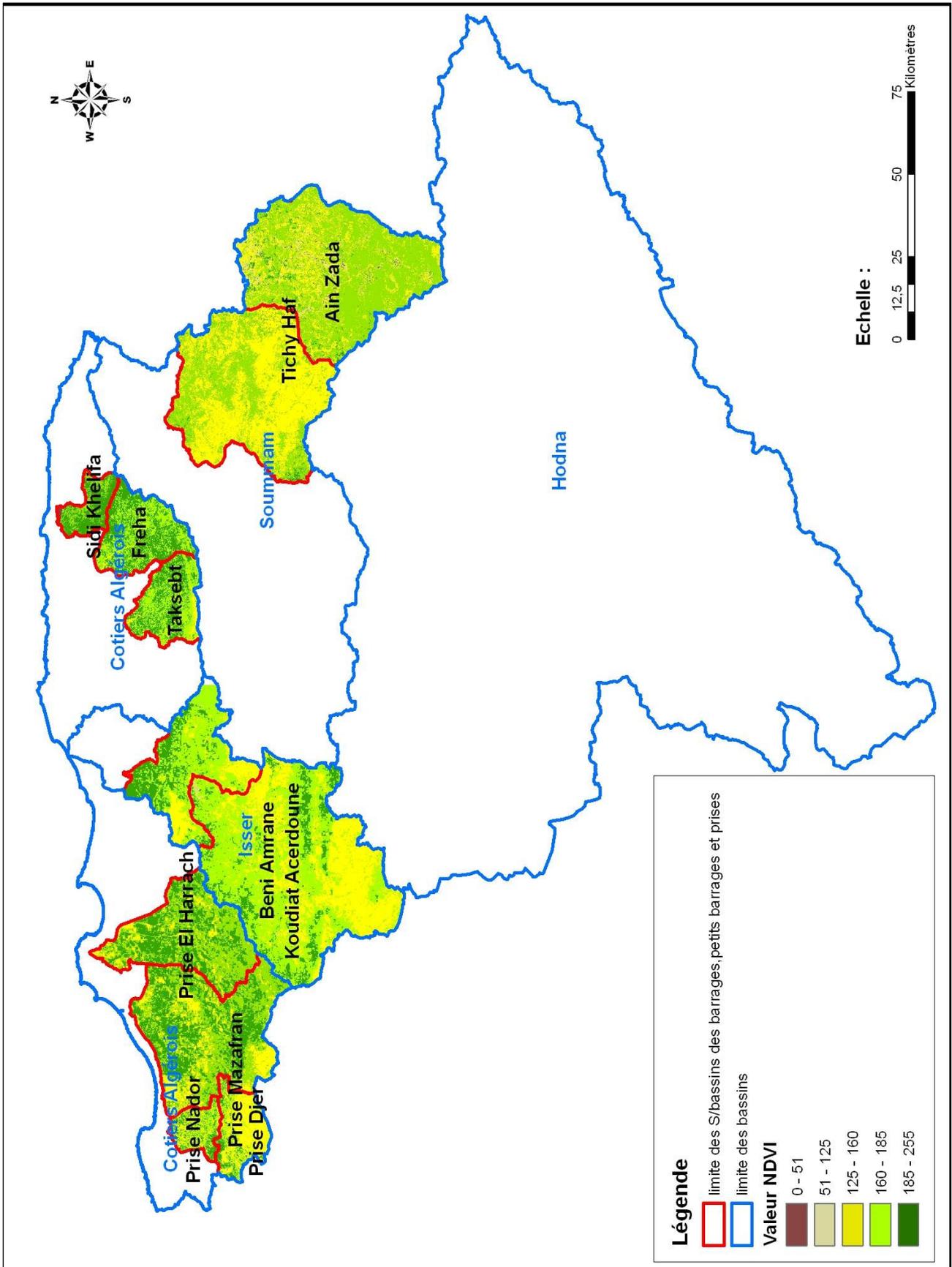


Figure IV.6 : Couvert végétal des S/bassins des barrages, petits barrages et prises

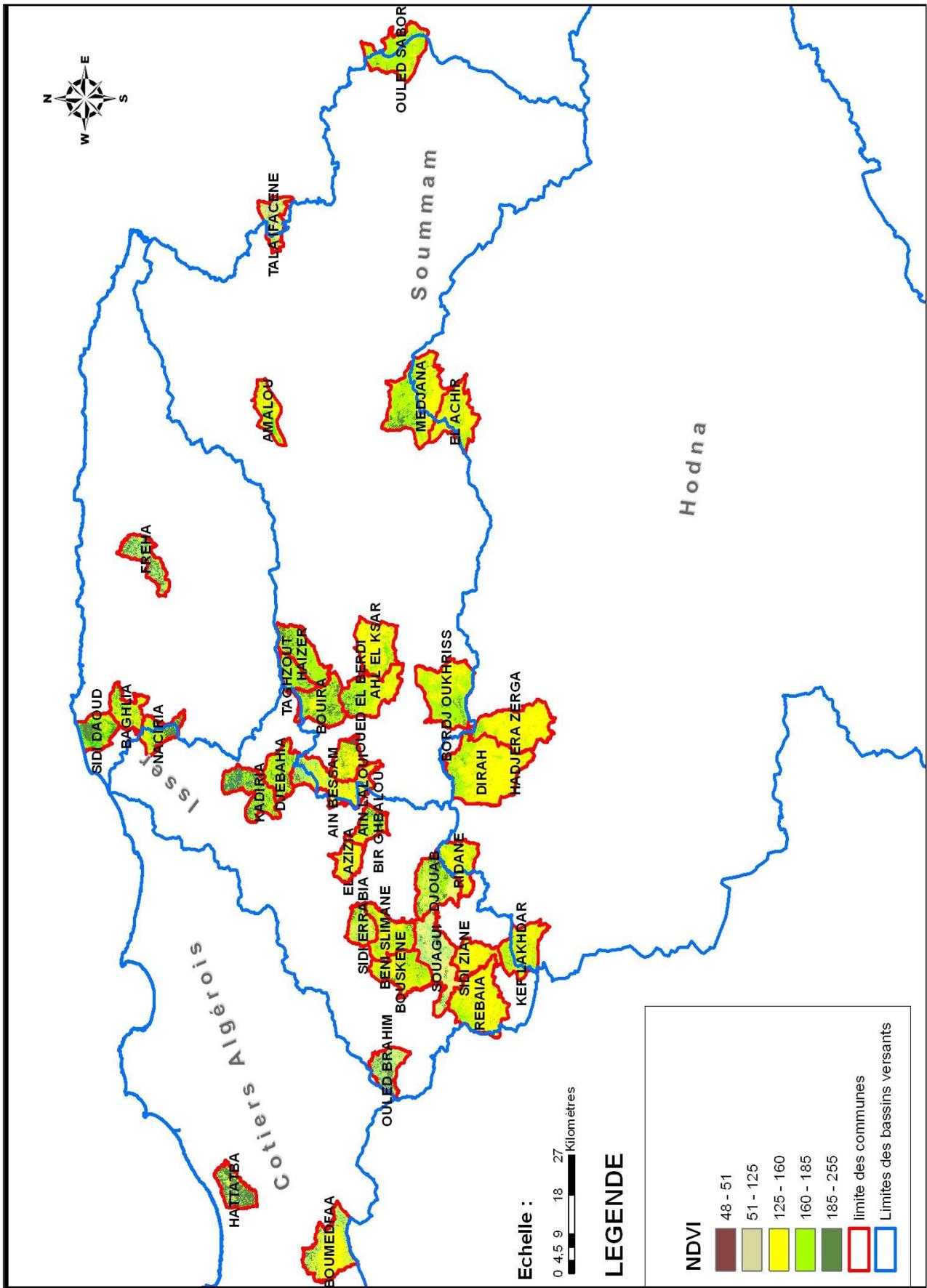


Figure IV.7 : Couvert végétal des sites des communes

Tableau IV.16: Couvert végétal des S/bassins des retenues en %

Commune	superficie de la commune (Km <sup>2</sup> )	superficie des forets (Km <sup>2</sup> )	Cv (%)
Hattatba	62.95	40.9	64.96
Boumefaâ	129.02	9.49	7.35
Freha (djaballah)	69.11	25.01	36.18
Sidi Daoud	62.99	21.37	33.9
Baghlia	60.05	10.03	16.7
Naciria	56.07	18.1	32.28
Bougara	86.13	40.9	47.49
Amalou	58.71	0.038	0.06
Dirah	235.32	4.85	2.06
Ahl lakser	104.34	0.013	0.01
bordj oukhris	155.09	6.14	3.9
Bir ghalou	50.03	8.63	17.26
Haizer	88.71	17.44	19.66
Taghzout	46.025	7.53	16.36
Djebahia	71.88	15.07	20.9
Kadiria	93.4	43.77	46.86
Ain Laloui	58.11	2.088	3.58
Ain Bessam	127.27	12.03	9.4
Ridane	77.55	2.41	3.1
hadjra zerga	148.09	1.91	1.29
Bouira	90.5	30.26	31.37
Ouled el berdi	112.7	9.11	8.08
Medjana	198.62	15.94	8.03
El-Achir	102.42	1.6	1.56
Tala Ifacen	56.15	4.03	7.19
Ouled Saber	131.9	4.33	3.29
Kef Lakhdar	97.59	32.87	3.36
sidi Ziane	64.27	0.423	0.65
El Azizia	48.19	0.98	2.04
Djoueb	105.2	23.95	22.7
Beni slimane	92.79	5.9	6.4
Sidi rabie	51.63	4.74	9.1
Rébaia	155.85	2.14	1.37
Souagui	136.96	11.63	8.49
Ouled Brahim	62.25	17.73	28.5
Bouskène	99.42	5.07	5.1

Sur la commune de Hattatba wilaya de Tipaza (64 %), la couverture végétale est dense, elle est moins dense sur les communes de Bougara, Kadiria, Fréha, Sidi daoud, Naciria, Bouira, Ouled Brahim et Djoueb (47%, 46%, 36%, 33 %, 32%, 31%, 28% et 22%) alors quelle est assez faible et ne dépasse pas les 20% sur les autres communes.

## Conclusion

L'ensemble des ouvrages retenus est arrêté au nombre de 56 ouvrages, les données recueillies sont résumées dans le tableau IV.17 :

**Tableau IV.17 : Résumé de caractéristiques des sites ouvrages retenues**

N°	Ouvrage	S du BV (Km <sup>2</sup> )	Per (Km)	Hmax (m)	Hmin (m)	P(mm)	Le (mm)	Densité de drainage D(km/km <sup>2</sup> )	penne moyenne lm (%)	couvert végétal CV(%)	Erosion spécifique Es(tonne/Km <sup>2</sup> .an)
1	Beni Amrane	3710.00	394.40	1800	50	187	120	0.58	17.27	19.12	1768.19
2	Ain zada	2078.00	228.83	1750	850	319	43	0.63	7.45	4.48	384.62
3	Taksebt	454.24	101.16	2150	150	702	431	0.88	39.58	46.74	946.43
4	Ain Zouaoua	1.64	5.95	260	104	554	75	3.24	26.35	64.96	428.00
5	Oued Skhouna	6.58	12.03	543	280	595	75	3.32	21.85	7.35	389.06
6	Freha	0.51	2.84	260	200	903	125	3.85	17.00	36.18	3764.71
7	DAS Bourahla 1	0.50	3.00	540	120	900	175	3.59	47.70	33.90	3200.00
8	DAS Bourahla 2	0.38	3.01	360	60	900	175	4.72	27.19	33.90	4210.53
9	Kouanine	8.60	11.77	450	75	780	175	3.17	15.32	16.70	930.23
10	Naciria	0.58	3.06	236	140	780	175	3.84	13.52	32.28	4137.93
11	Sidi Daoud	0.18	1.61	169	115	780	175	3.89	21.22	33.90	4444.44
12	Boussedoum	2.60	7.20	959	240	483	75	3.23	36.15	0.06	1846.15
13	Oued Assila	12.70	15.83	1100	887	460	50	4.03	18.05	2.06	1858.27
14	Boumerzel (I)	9.04	16.15	760	560	382	35	2.83	13.84	0.01	442.48
15	Boumerzel (II)	6.70	12.00	900	560	600	35	2.97	11.85	0.01	477.61
16	Ouled el berdi-av	48.16	32.19	813	520	526	50	1.96	6.89	8.08	265.78
17	bordj oukhris	10.92	13.57	1021	758	180	15	3.28	10.99	3.90	1611.72
18	Bir Ghablou	2.12	5.65	721	630	393	75	1.72	7.39	17.26	1132.08
19	Ighil Libene	1.40	4.80	660	549	600	175	3.36	11.86	19.66	2857.14
20	Chabet Merdja	1.00	4.40	590	555	598	175	3.00	6.42	19.66	1600.00
21	Gominsis	3.00	8.15	901	545	598	175	2.97	18.67	16.36	742.03
22	Djedala	1.14	5.51	720	495	393	125	2.96	21.05	20.90	610.22
23	Bouchiouane	1.80	5.52	544	320	258	125	4.06	31.30	46.86	404.04
24	H.M'thene	2.70	7.20	826	648	511	75	3.12	9.56	3.58	2318.84
25	Merdja	1.40	6.70	822	647	511	75	2.71	8.29	9.40	2086.96
26	harbitia	1.21	6.03	1300	1000	263	75	4.29	21.19	3.10	3966.94
27	mihab	4.15	10.50	1137	880	460	35	3.25	21.69	2.06	732.53
28	Dra alouest	20.00	19.22	1200	864	254	15	4.08	22.70	1.29	380.00
29	Bergoug	3.60	7.50	720	537	526	75	3.09	10.28	31.37	1159.42
30	Ouled el berdi-am	47.00	30.00	813	540	526	50	1.96	7.00	8.08	127.66
31	Lechbour	32.25	29.40	1284	1023	363	20	3.29	10.96	8.03	3307.49
32	El H'mada	20.23	22.13	1233	885	363	15	2.55	13.87	1.56	1522.49
33	Draouet	25.85	20.11	1248	687	566	175	25.27	22.76	7.19	6189.56
34	Oued Ouled Saber	6.18	10.07	1260	1100	344	50	2.63	9.77	3.29	3236.25
35	RC Lemhari	15.43	17.10	1240	1120	344	35	2.75	10.09	3.29	1866.49
36	Oued Sedd	4.70	9.90	1400	1040	263	15	2.46	18.46	3.36	851.06
37	Mechtates Sedari	1.47	5.35	1260	1050	263	15	4.91	16.56	3.36	4897.96
38	chabet Mehadjer	3.03	8.11	1256	920	263	35	3.37	17.75	0.65	132.01
39	Chabet Ain Bouaicha	3.27	8.65	1060	780	486	35	3.87	19.06	1.37	1639.14
40	Oued Anseur El Hadj	2.58	8.22	820	575	393	35	3.47	18.54	2.04	2170.54
41	Djoueb	1.56	5.54	1212	878	263	35	2.18	21.45	22.70	128.21
42	Chabet El Farfachia	2.54	7.50	1200	870	263	75	2.07	15.68	22.70	1889.76
43	Chabet Tatouch	3.02	7.53	776	647	380	35	2.78	12.65	6.40	3178.81
44	Chabet Arous	6.04	10.28	1019	720	380	35	1.85	16.05	6.40	794.70
45	Chabet Loualouia	13.43	17.28	933	630	380	35	2.07	9.16	6.40	476.55
46	Chabet metreg	2.55	6.43	780	650	380	35	3.18	14.00	9.10	3137.25
47	Chabet Touhiah	3.87	8.86	843	587	380	35	3.74	20.16	9.10	3824.29
48	B.22	1.24	5.38	780	600	380	35	3.38	15.98	9.10	193.55
49	Chabet Mahrouga	2.10	7.44	620	520	393	35	3.60	19.15	2.04	2209.52
50	Chabet Sfaï	9.40	14.50	1123	830	263	35	2.18	16.81	1.37	197.87
51	Oued Rhorb	33.50	29.60	1380	860	263	35	2.73	18.86	1.37	195.39
52	Oued Messai	10.30	13.60	941	585	393	35	3.40	11.40	2.04	3425.24
53	Chabet Bouhalfia	1.80	5.40	858	740	263	35	2.61	7.90	8.49	242.42
54	Chabet Defla	3.30	9.00	1114	800	486	75	1.97	18.73	28.50	391.61
55	Chabet Drabine	3.50	8.20	926	745	486	35	2.57	13.03	28.50	323.81
56	Oued Ben Loulou	10.00	15.50	846	670	486	75	1.40	7.84	5.10	944.62

**CHAPITRE V : MODÉLISATION DE  
L'ÉROSION SPÉCIFIQUE PAR LA  
MÉTHODE DES RÉSEAUX DE  
NEURONES**

# Chapitre V : Modélisation de l'érosion spécifique par la méthode des réseaux de neurones

## Introduction

De nombreux modèles existent pour simuler les processus physiques déterminant la quantité du transport solide.

La méthodologie adoptée est simple et vise à identifier les facteurs explicatifs de l'envasement et enfin produire une relation régionale et ce, grâce à l'utilisation combinée des outils statistiques paramétriques et non paramétriques. La méthode paramétrique est basée sur la régression multiple ; l'analyse en composantes principales. La méthode non paramétrique est basée sur la méthode des réseaux de neurones, cette approche stochastique permet une représentation relativement meilleure, par rapport aux approches déterministes (modèle de régression), de la réalité d'un phénomène aussi complexe que l'érosion du sol.

## V.1 Méthodes paramétriques

### V.1.1 Application de la régression multiple

L'application de la méthode de régression multiple consiste à déterminer les liens préférentiels entre l'érosion spécifique et les différentes variables quantifiables hydro morphologiques.

La méthode de Régression Linéaire Multiple (RLM) est une technique qui permet de décrire la liaison entre la variable dépendante ou expliquée et un ensemble de variables explicatives. Il s'agit d'une analyse statistique dans un espace à plusieurs dimensions constitue une simple extension de régressions polynomiales et de l'analyse des tendances de surface.

Les méthodes paramétriques consistent à développer un modèle qui lie l'érosion spécifique ( $E_s$ ) aux paramètres hydromorphométriques et climatiques,  $X_i$  de l'ouvrage et de son bassin versant comme suit :

$$E_s = (f(a, b, X_1, X_2, \dots)).$$

$a, b$  sont des paramètres de régression. Ces paramètres sont déterminés par la méthode d'estimation comme la méthode des moindres carrés. Pour qu'elle soit satisfaisante et fiable, cette méthode nécessite une large base de données de développement et des données assez exactes (Djebbar et al, 1998)

L'analyse de la régression permet d'étudier la relation statistique qui existe entre l'érosion spécifique (variables à expliquer) et les paramètres hydromorphométriques et climatiques de chaque site d'ouvrage retenu (variables explicatives).

Les variables explicatives de bases utilisées sont les paramètres hydromorphométriques des bassins de sites d'ouvrages retenus (Surface du bassin ( $S$ ), Périmètre du bassin ( $Per$ ), altitude maximale ( $H_{max}$ ), altitude minimale ( $H_{min}$ ), Pente du bassin ( $I_m$ ), Densité de drainage ( $D$ ), Couvert Végétal  $C_v$ ) ainsi que d'autres paramètres hydroclimatiques (Précipitation ( $P$ ), Lane écoulee ( $Le$ )).

La matrice des coefficients de corrélation est donnée en tableau V.1 :

**Tableau V.1 : Matrice des coefficients de corrélation**

	Es(tonne /Km <sup>2</sup> .an)	S (Km <sup>2</sup> )	Per (Km)	Hmax (m)	Hmin (m)	P(mm)	Le (mm)	D(km/km <sup>2</sup> )	Im (%)	CV(%)
Es(tonne/Km <sup>2</sup> .an)	1.00									
S (Km <sup>2</sup> )	-0.07	1.00								
Per (Km)	-0.10	<b>0.99</b>	1.00							
Hmax (m)	-0.17	0.46	<b>0.53</b>	1.00						
Hmin (m)	-0.10	-0.20	-0.18	<b>0.53</b>	1.00					
P(mm)	0.30	-0.21	-0.21	<b>-0.56</b>	<b>-0.68</b>	1.00				
Le (mm)	0.22	0.10	0.14	-0.05	<b>-0.63</b>	<b>0.64</b>	1.00			
D(km/km <sup>2</sup> )	<b>0.53</b>	-0.17	-0.17	-0.04	0.02	0.15	0.15	1.00		
Im (%)	0.12	-0.04	-0.03	0.02	-0.42	0.28	0.46	0.17	1.00	
CV(%)	0.04	0.03	0.02	-0.36	<b>-0.62</b>	0.49	<b>0.61</b>	-0.05	0.42	1

L'analyse de la matrice des coefficients de corrélation entre les variables montre que la surface du bassin (S), le périmètre (Per), la lame écoulée (Le) et le couvert végétal (Cv) sont bien liés positivement entre eux et de même pour la densité de drainage (D) et l'altitude maximale (H<sub>max</sub>), alors que l'altitude minimale (H<sub>min</sub>) avec la précipitation moyenne (P), la lame écoulée (Le) ainsi que le couvert végétal (Cv) sont bien liés négativement entre eux, au même titre que l'altitude maximale avec la précipitation moyenne.

### V.1.2 Application de la méthode d'Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'application de l'Analyse en composantes principales confirme les résultats trouvés par la régression multiple, la méthode a été appliquée sur 56 individus (sites d'ouvrages retenus) et 9 variables indépendantes (paramètres hydromorphométriques et climatiques).

Les variables utilisées sont : la surface du bassin (S), le périmètre (Per), la densité de drainage (D), l'altitude maximale (H<sub>max</sub>), l'altitude minimale (H<sub>min</sub>), la pente moyenne du bassin (I<sub>m</sub>), la lame écoulée (Le), la précipitation moyenne (P) et le couvert végétal (Cv).

Le tableau V.2 résume les valeurs propres de la matrice des coefficients de corrélation, le pourcentage des la variance expliquée ainsi que celui des variances cumulées par chacun des axes.

**Tableau V.2 : Valeurs propres, pourcentage de variance et cumul**

Axes	C1	C2	C3	C4	C5
Valeurs propres	3.46	2.44	1.48	0.97	0.53
Variances expliquées %	34.56	24.68	14.84	9.70	5.33
Variances cumulées %	34.56	59.24	74.07	83.77	89.10

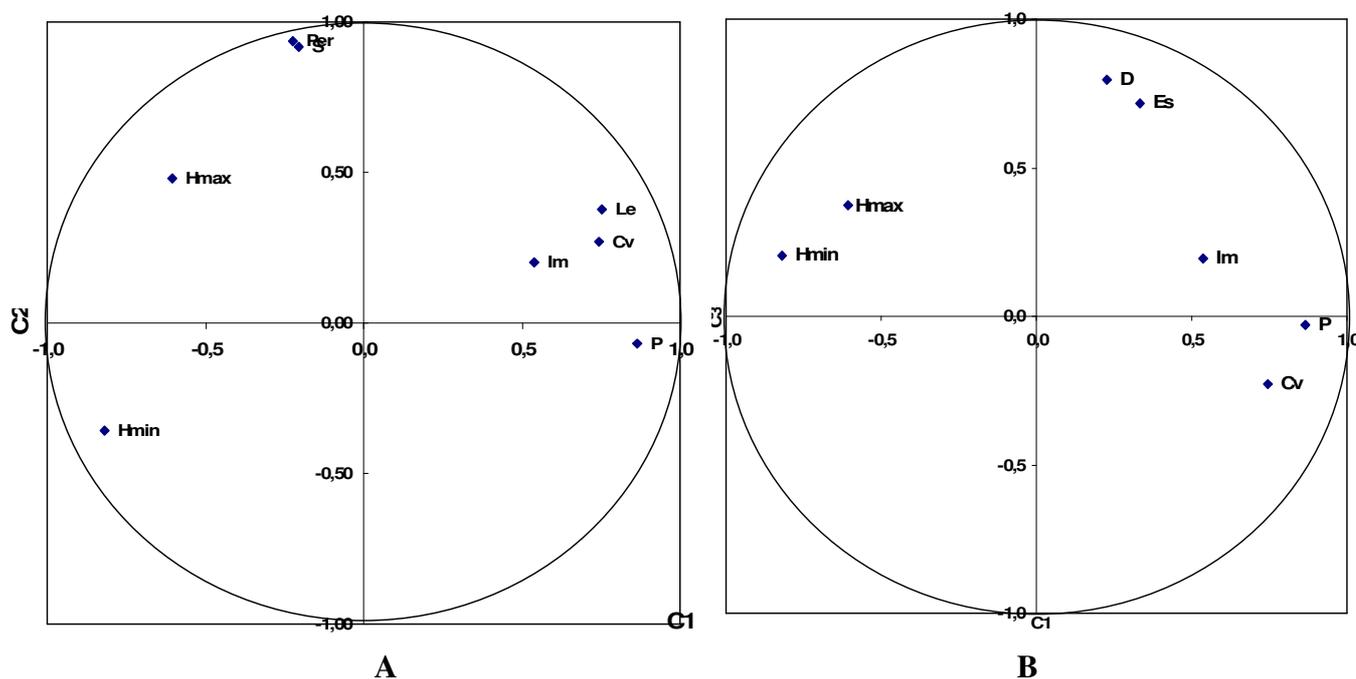
Les trois premières composantes expliquent 74 % de l'information totale : avec 34,56 % pour le premier axe ; 24,68 % pour le deuxième axe, 14,87 % pour le troisième axe.

La projection des variables sur les trois axes principaux est résumée dans le tableau V.4 et illustrée en figure V.1 :

**Tableau V.3** : Projection des variables sur les axes principaux

Axes	C1	C 2	C 3
Erosion spécifique $E_s$ (tonne/ $Km^2$ )	0,33	-0,25	<b>0,72</b>
S du BV ( $Km^2$ )	-0,21	<b>0,92</b>	0,13
P (Km)	-0,22	<b>0,93</b>	0,14
Hmax (m)	<b>-0,61</b>	0,48	0,37
Hmin (m)	<b>-0,82</b>	-0,36	0,21
P(mm)	<b>0,87</b>	-0,07	-0,03
Le (mm)	<b>0,75</b>	0,38	0,16
Densité de drainage $D(km/km^2)$	0,23	-0,27	<b>0,80</b>
pente moyenne $I_m$ (%)	<b>0,54</b>	0,20	0,19
couvert végétal $CV$ (%)	<b>0,74</b>	0,27	-0,23

La corrélation entre les variables et les axes principaux montre que l'axe  $C_1$  est très bien corrélé positivement avec la lame écoulee ( $Le$ ), le couvert végétal ( $Cv$ ), la précipitation moyenne ( $P$ ), aussi assez bien corrélé avec la pente moyenne ( $I_m$ ) et négativement bien corrélé avec l'altitude minimale ( $H_{min}$ ) et maximale ( $H_{max}$ ), par ailleurs, l'axe  $C_2$  est très bien corrélé positivement avec la surface du bassin ( $S$ ) et le périmètre ( $Per$ ) alors que l'axe  $C_3$  est très bien corrélé positivement avec la densité de drainage ( $D$ ) et l'érosion spécifique ( $Es$ ).



**Le cercle A** (59% de l'inertie cumulée)

L'axe  $C_1$  porte positivement la lame écoulee, la pente moyenne, le couvert végétal et la précipitation moyenne, il porte négativement les altitudes minimale et maximale. Par ailleurs, l'axe  $C_2$  porte positivement la superficie et le périmètre, ceci peut exprimer la forme du bassin.

### Le cercle B (48 % de l'inertie cumulée)

L'axe  $C_1$  porte les mêmes significations que précédemment, l'axe  $C_3$  porte positivement la densité de drainage et l'érosion spécifique.

La reconstitution finale de la distribution des bassins des ouvrages a permis de définir les axes principaux responsables de cette distribution et faire ressortir les affinités entre les différents bassins d'ouvrages, pour en déduire les paramètres qui les caractérisent au mieux.

La projection des individus (bassins d'ouvrages) sur les axes principaux  $C_1$  et  $C_2$  est illustrée en Figure V.2 et V.3

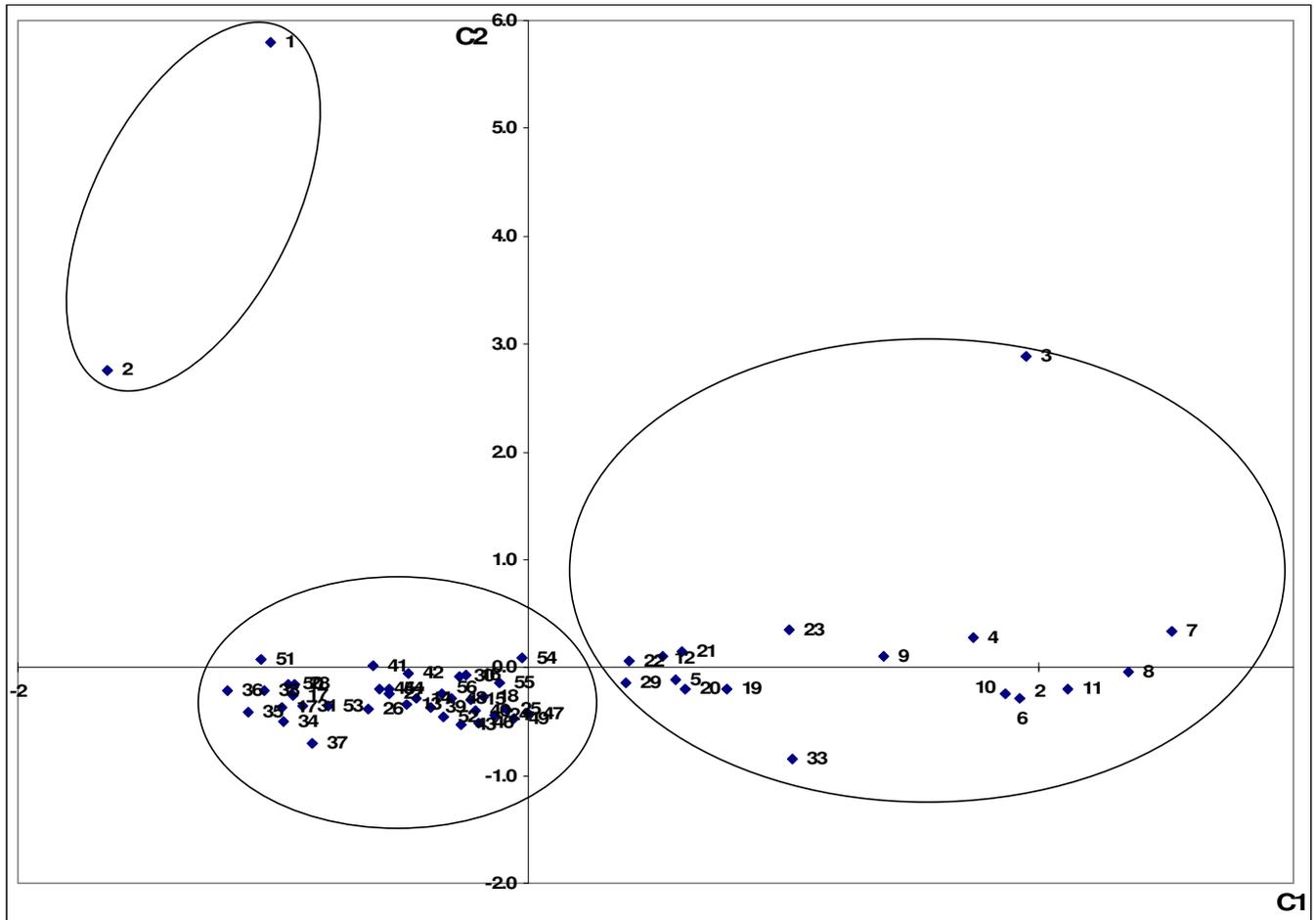


Figure V.2 : Projection des individus sur le plan  $C_1$ -  $C_2$

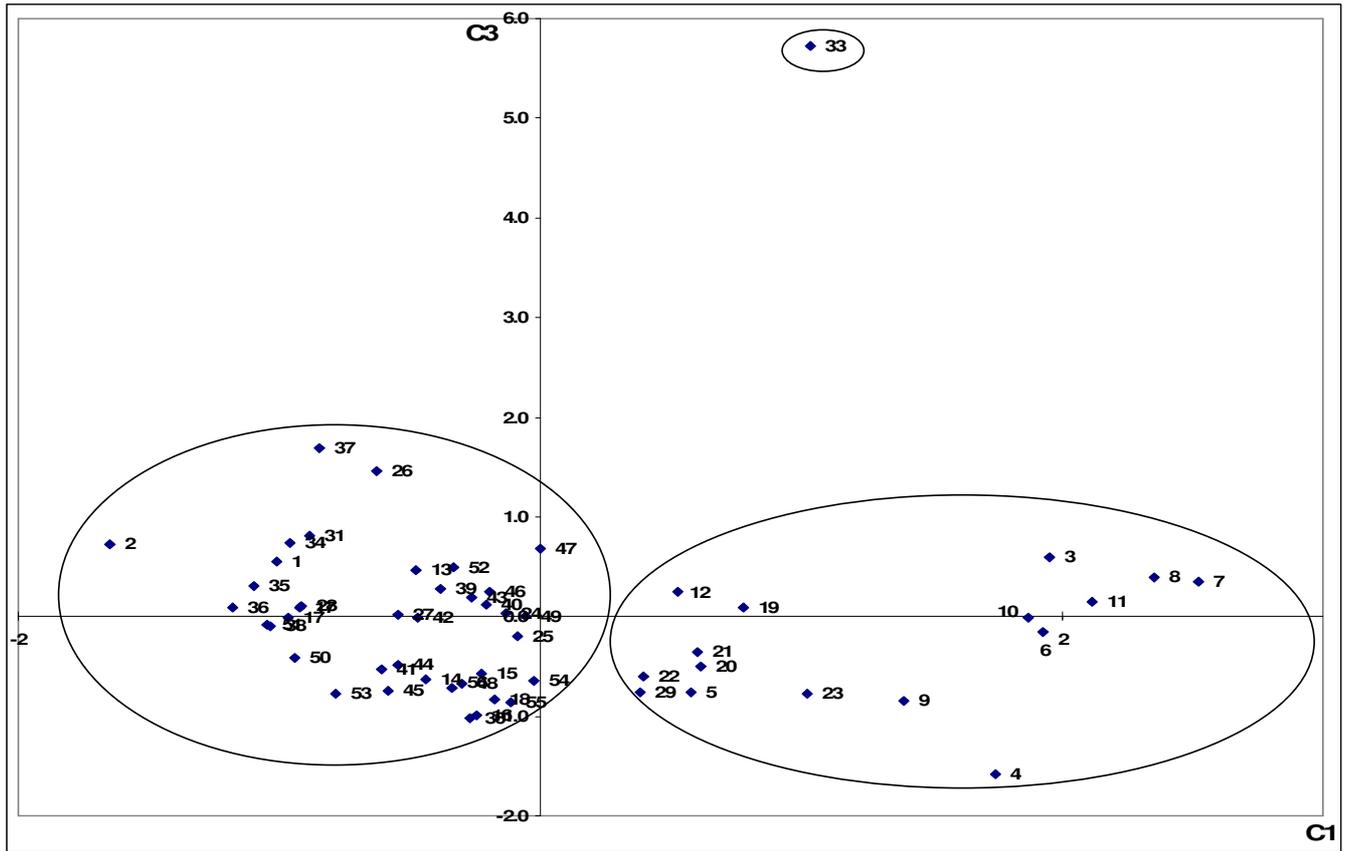


Figure V. 3 : Projection des individus sur le plan  $C_1 - C_3$

Au constat des figures V.2 et V.3, le plan  $C_1 - C_2$  met en valeurs trois groupes :

- Le premier formé par les bassins des ouvrages de : Taksebt (3), Ain Zouaoua (4), Oued Skhouna (5), Fréha (6), DAS Bourahla 1(7), DAS Bourahla 2(8), Kouanine (9), Naciria (10), Sidi Daoud (11), Boussedoum (12), Ighil Libene (19), Chabet Merdja (20), Gominsis (21), Djedala (22), Bouchiouane (23), Bergoug (29) et Draout (33), ce groupe présentant des bassins d'ouvrages ayant des fortes valeurs de précipitation moyenne , de lame écoulee et du couvert végétal.
- Le deuxième groupe formé par les sites de Beni Amrane (1) et Ain Zada (2), représentant des fortes valeurs de surface et de périmètre des bassins par rapport aux autres sous bassins.
- Le troisième groupe formé par les sites restants, représentant des sous bassins ayant de faibles valeurs de lame écoulee.

Le plan  $C_1 - C_3$  également met en évidence trois groupes :

- Le premier formé par les bassins des ouvrages de : Taksebt (3), Ain Zouaoua (4), Oued Skhouna (5), Fréha (6), DAS Bourahla 1(7), DAS Bourahla 2(8), Kouanine (9), Naciria (10), Sidi Daoud (11), Boussedoum (12), Ighil Libene (19), Chabet Merdja (20), Gominsis (21), Djedala (22), Bouchiouane (23) et Bergoug (29), ce groupe présentant des bassins d'ouvrages ayant des fortes valeurs de précipitation moyenne , de lame écoulee et du couvert végétal.
- Le deuxième groupe formé par le bassin de Draout (33), représentant une forte densité de drainage et d'érosion spécifique par rapport à tous les autres bassins.

- Le troisième groupe formé par les sites restants, représentant des sous bassins ayant de faibles valeurs de lame écoulée.

L'Analyse en composantes Principales a permis de déterminer la relation entre les caractéristiques hydromorphométriques et climatiques des sites des ouvrages retenus et d'en déduire les paramètres qui influent le plus.

L'erreur de prédiction de cette méthode, considérée comme faisant partie de méthodes paramétriques reste élevée. Le manque d'une bonne prédiction des méthodes paramétrées est dû aux facteurs suivants :

- 1- La qualité des données ;
- 2- Les données utilisées dans le développement des modèles sont limitées et ne couvrent pas les intervalles d'application pratiques ;
- 3- La limitation des méthodes paramétrées où la forme du modèle doit être connue à priori,
- 4- Le changement naturel de la forme des relations liant les variables dépendantes aux variables indépendantes d'un intervalle à autre.

## V.2 Méthode non paramétrique

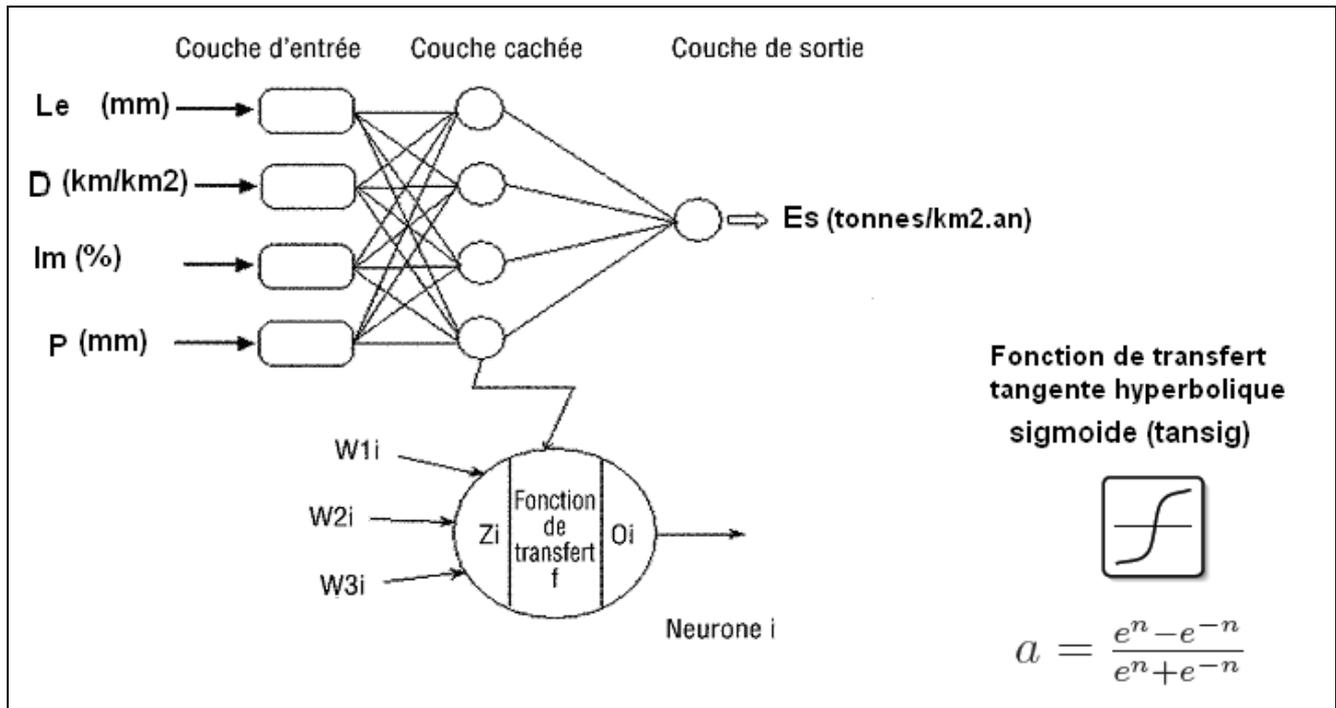
Une deuxième alternative consiste à utiliser une méthode non paramétrique à base des réseaux de neurones. La méthode des réseaux neuronaux résout les problèmes (3) et (4) cités auparavant. Durant les deux dernières décennies, les réseaux de neurones ont montré une performance exceptionnelle comme outils de régression.

### V.2.1 Application de la méthode des Réseaux de neurones (RNA)

Plusieurs modèles de RNA possible ont été établis et examinés dans cette étude, le choix du meilleur modèle est basé sur les paramètres qui se corrèlent le mieux avec l'érosion spécifique et ayant donné le minimum d'erreur quadratique (MSE) et un meilleur coefficient de corrélation.

Dans le cas de notre étude, les quatre variables (paramètres hydromorphométriques et climatiques) utilisées dans la couche d'entrée sont les paramètres les plus explicatifs de l'érosion spécifique constatés qui sont : la lame écoulée ( $L_e$ ), la densité de drainage ( $D$ ), la précipitation moyenne ( $P$ ) et la pente moyenne ( $I_m$ ) pour une variable  $E_s$  (l'érosion spécifique) observée dans la couche de sortie.

Le réseau de neurones retenu dans notre étude est un réseau à trois couches une couche d'entrée qui reçoit les données source utilisées pour l'analyse, quatre neurones des sorties de la couche d'entrée avec la fonction transfert non linéaire de type tangente hyperbolique sigmoïde ont constitué la couche cachée, et une couche de sortie d'un neurone qui donne le résultat obtenu après compilation par le réseau des données entrant dans la première couche avec une fonction de transfert linéaire. La figure V.4 illustre l'architecture du modèle.



**Figure V. 4 : Architecture du modèle RNA**

Le modèle neuronal testé s'appuie sur l'apprentissage du type supervisé, l'algorithme de backpropagation est celui de Levenberg Marquardt (LM) qui possède une meilleure robustesse vis-à-vis de l'initialisation aléatoire des paramètres des réseaux et assure une meilleure convergence avec un minimum d'erreur quadratique, pour les problèmes d'approximation des fonctions (ou régression) où le nombre des poids du réseaux est restreint. Quand le nombre de poids augmente, l'efficacité de l'algorithme LM diminue car la taille de la matrice Hessian augmente et nécessite une très grande place dans la mémoire (Touzet, 1992).

### V.3 Critères de validation

Dans toute modélisation, il est indispensable de passer par la validation des résultats simulés par rapport aux données observées. Les paramètres linéaires (de conclusion) sont ajustés par la méthode des moindres carrés.

#### V.3.1 Le critère de Nash

Ce critère quantifie la fraction de la variance observée qui est prise en compte par le modèle. Il prend des valeurs allant de  $-\infty$  à 1; plus l'efficacité est proche de 1, meilleure est l'accord entre la modélisation et l'observation. Si la valeur du critère de Nash converge vers cent, le modèle est optimisé. Il est défini par la relation :

$$Nash = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\text{mod}} - Y_{i\text{obs}})^2}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i\text{mod}} - \bar{Y}_{obs})^2} \tag{V.1}$$

Où :

- $Y_{i\text{mod}}$  : Est la variable de l'érosion simulée
- $Y_{i\text{obs}}$  : Est la variable de l'érosion observée
- $\bar{Y}_{obs}$  : Est la moyenne de l'érosion observée

$n_{obs}$  : le nombre d'observations

### V.3.2 Erreur sur le bilan

Exprimée en pourcentage, l'erreur sur le bilan est calculée comme suit :

$$E = \frac{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i_{obs}} - Y_{i_{mod}})}{\sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i_{obs}})} \quad (V.2)$$

### V3. 3 L'erreur quadratique moyenne

Ce critère est utilisé pour calculer l'écart entre les valeurs simulées et celles observées, il s'exprime par :

$$RMSE = \sqrt{\left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n_{obs}} (Y_{i_{mod}} - Y_{i_{obs}})^2 \right)} \quad (V.3)$$

## V.4 Résultats et Interprétation

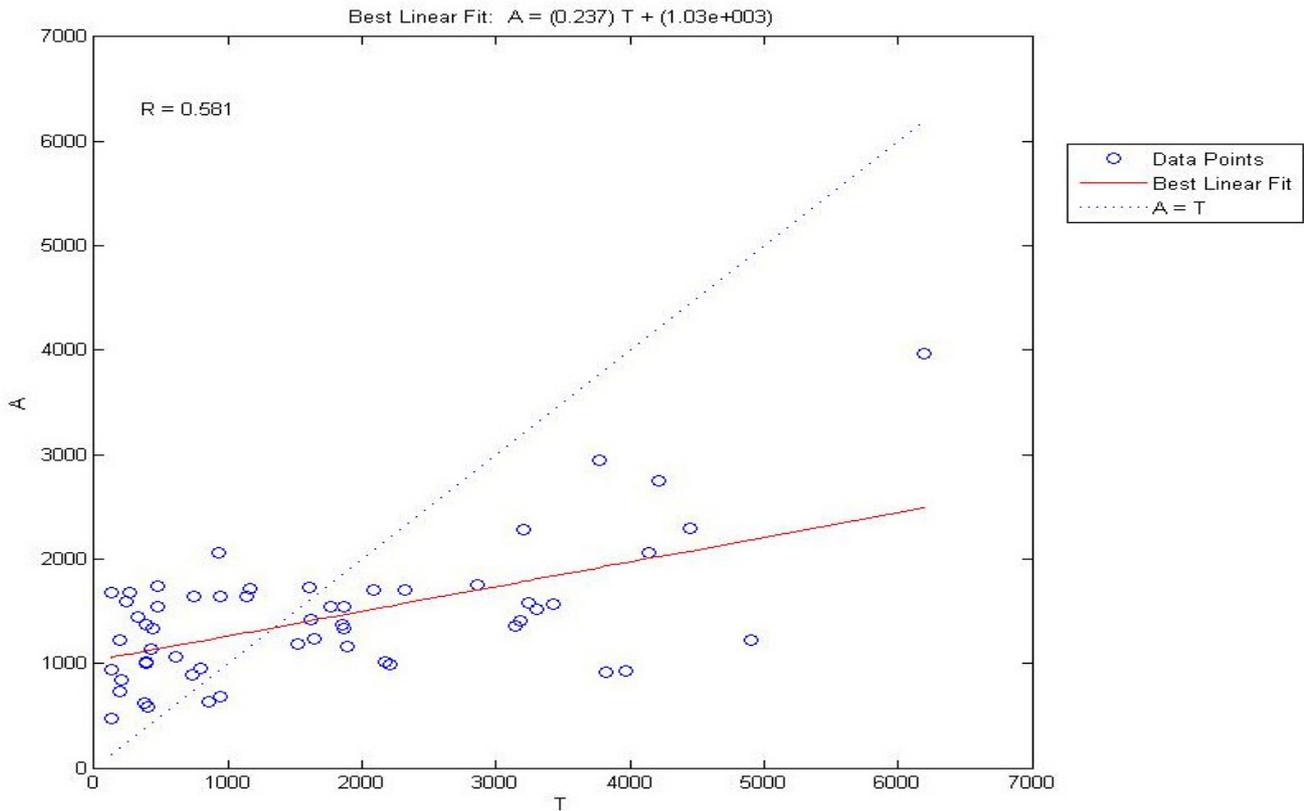
La matrice de donnée est divisée en 3 groupes, le premier réservé au calage du modèle (Apprentissage), le deuxième pour le test et le dernier pour la validation. En effet, 60% des données sont consacrées pour l'apprentissage du modèle, 20% pour le test et les 20% restant pour la validation.

Le nombre de neurones dans la couche cachée est de 4 neurones, 4 neurones dans la couche d'entrée et un neurone dans la couche de sortie qui représente l'érosion spécifique.

La solution du modèle est obtenue sur trois étapes : transformation des données, développement du réseau des mesures d'envasement des 56 ouvrages. Les données de la validation sont composées des mesures qui n'ont pas été utilisées dans l'étape de développement.

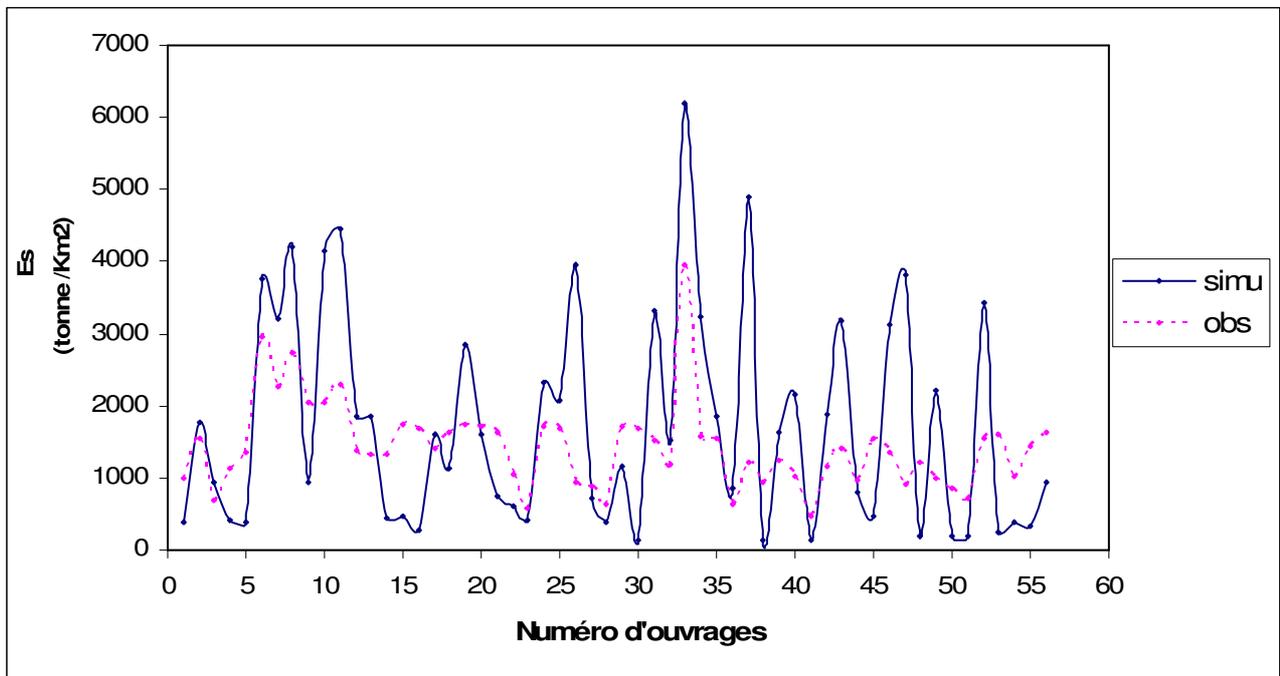
Les données simulées et observées par le modèle forment un nuage de point situé autour de la droite linéaire ( $A = 1,39 * T - 268,32$ ) où A (tonnes/km<sup>2</sup>.an) : représente l'érosion simulée et T(tonnes/km<sup>2</sup>.an) représente l'érosion observée et b : une constante ((Figure V.5).

## Modélisation de l'érosion spécifique par la méthode des RNA



**Figure V.5 :** Erosion simulée - Erosion observée

La variation de l'érosion spécifique observée et simulée est illustrée en figure V.6



**Figure V.6 :** Variation de l'érosion simulée et observée

Les résultats des paramètres de validation du modèle sont donnés dans les tableaux V.4

**Tableau V.4 :** Paramètres de validation du modèle RNA

Nash	Erreur sur le bilan	MSE	R	r (régression)
30%	0,2	0,1	0,58	0,58

Les paramètres statistiques des données simulées et observées sont présentés dans le tableau V.5 :

**Tableau V.5 :** Paramètres statistiques

Paramètres statistiques	Es observée (tonnes/Km <sup>2</sup> )	Es simulée (tonnes/Km <sup>2</sup> )
Moyenne	1435,2	1724,8
Ecart type	609,1	1495,2

Il apparaît clairement du tableau V.4 que l'efficacité de Nash est relativement faible (30%) alors que l'erreur sur le bilan et l'erreur quadratique (MSE) sont faibles, de valeur respectivement (0.2) et (0,1). Le coefficient de corrélation est relativement moyen (0,58) multiple et supérieur au coefficient critique de la table de Fischer, il est identique à celui trouvé par la régression.

En examinant les résultats du tableau V.5 et la figure V.6, les moyennes des séries observées et simulées sont relativement rapprochées, alors que leurs écarts types sont nettement différents.

### Conclusion

La modélisation et la prévision de l'érosion spécifique à partir des entrées : densité de drainage  $D(\text{Km}/\text{Km}^2)$ , la pente moyenne du bassin  $I_m (\%)$ , la précipitation moyenne  $P (\text{mm})$ , la lame écoulee  $L_e (\text{mm})$ , à l'échelle annuelle ou interannuelle en utilisant le modèle neuronal donnent des résultats moyennement bons mais restent insuffisants pour quantifier et prédire correctement de phénomène du transport solide.

Les résultats peuvent être améliorés afin d'affiner ce travail en procédant comme suit :

- Travailler à une échelle plus petite, mensuelle ou journalière pour se rapprocher de plus en plus du phénomène.
  - Intégrer d'autres paramètres (climatiques et liées aux caractéristiques du sol) d'entrées plus explicatifs de l'érosion tel que, les débits de crue, l'humidité du sol, la végétation dans les plus petits bassins d'ouvrages, ...ect.
  - Etaler la série de données pour plus d'observations possible.
- Cette étude pourrait faire l'objet d'une thèse de doctorat.

# Conclusion générale

## Conclusion Générale

L'envasement et le transport solide constituent, par leur importance, un problème majeur en Algérie (dégradation des sols agricoles, alluvionnement des retenues). Les études d'aménagement hydrotechnique butent très souvent sur le problème du manque ou du nombre réduit des données relatives au transport solide.

Le phénomène du transport solide est d'une complexité incontestable, de la part des différents paramètres climatiques et hydrologiques qui ont une influence prépondérante sur le déclenchement du processus de l'érosion. La très forte fluctuation spatiotemporelle de ces paramètres augmente davantage la complexité de ce phénomène et rend, par conséquent, la tâche de modélisation plus difficile. Cette fluctuation caractérise essentiellement notre site d'intérêt qui est l'Algérie du nord.

De ce fait, l'envasement des barrages est la conséquence du phénomène de l'érosion. En effet, la quantification et la prévision de ce phénomène nécessitent l'identification des différents paramètres qui caractérisent ce processus ainsi que leurs lois de variation.

La thématique de l'érosion présente un enjeu environnemental important pour l'agriculture, l'aménagement du territoire et les ressources en eau. Malgré les investissements expérimentaux et intellectuels très importants sur ce sujet, les modèles proposés pour quantifier et prédire l'érosion hydrique à l'échelle des bassins versants sont encore très imparfaits.

Ce travail avait pour objectif, la modélisation du transport solide au niveau des retenues des ouvrages situés dans le bassin d'étude Algérois Hodna Soummam, par la modélisation de l'érosion, et ce, à partir des paramètres hydromorphométriques, climatiques et la couverture végétale. Pour cela, l'analyse a été procédée comme suit :

### 3. Choix des ouvrages

Le choix des ouvrages d'étude a été basé sur un ensemble de barrages, de prises, de petits barrages et des retenues collinaires répartis uniformément sur toute la zone d'étude.

### 2. Paramètres hydrologiques des bassins des ouvrages

- Les paramètres physiographiques, surfaces et périmètres sont variables, assez grandes dans les grands barrages, moyennes pour les bassins de prises et petits barrages, et petites arrivant jusqu'à moins d' $1 \text{ km}^2$  dans les bassins des retenues collinaires.

L'Analyse en Composantes Principales a permis de mettre en évidence deux groupes de bassins, l'un ayant une grande surface représentée par les bassins des barrages de Taksebt et Ain zada, l'autre groupe des ouvrages restant ayant des superficies de valeurs moyennes à petites.

- Le réseau hydrographique des bassins d'ouvrages n'est pas dense, il s'exprime par les valeurs de densité de drainage  $D$  qui ne dépasse pas  $4 \text{ km/km}^2$  à l'exception du bassin de Draout dont la densité dépasse  $25 \text{ Km/Km}^2$ , l'ACP a permis d'aboutir à cette distinction.

- La pente moyenne est assez raide dans l'ensemble des bassins d'ouvrages, dépassant 30% dans quelques uns tel que le bassin de Taksebt.

- Les paramètres climatiques tels que les précipitations moyennes et les lames écoulées sont variables d'un site à un autre. L'Analyse en Composantes Principales a permis de mettre en évidence deux groupes, le premier regroupe les bassins dont les valeurs des précipitations et les lames écoulées sont fortes et le deuxième les bassins dont ces valeurs sont faibles.

- A l'issu du traitement des images satellitaires, le couvert végétal était important dans les bassins situés dans la partie Nord de la région d'étude tels que les bassins de Taksebt, Fréha et Naciria et il s'affaiblit de plus en plus dans les régions intérieures.

### 3. Modélisation

La modélisation de l'érosion par la méthode des Réseaux de Neurones (RNA) s'est basée sur des paramètres d'entrée qui ont été choisis suivant les résultats de la régression multiple, la densité de drainage  $D$  ( $\text{Km}/\text{Km}^2$ ), la pente moyenne du bassin  $I_m$  (%), la précipitation moyenne  $P$  (mm) et la lame écoulée  $Le$  (mm), se sont des paramètres indépendants entre eux, et les plus explicatifs de l'érosion parmi tous les paramètres hydromorphométriques et climatiques présentés dans cette étude.

Les résultats de la modélisation étaient moyennement bons, le coefficient de corrélation trouvé par la méthode des RNA étant similaire à celui trouvé par la régression multiple, l'erreur sur le bilan ainsi que l'erreur quadratique étaient minimales.

Les paramètres choisis pour l'explication de l'érosion ou le transport solide étaient bons mais restent insuffisants pour prédire et quantifier le phénomène de l'érosion.

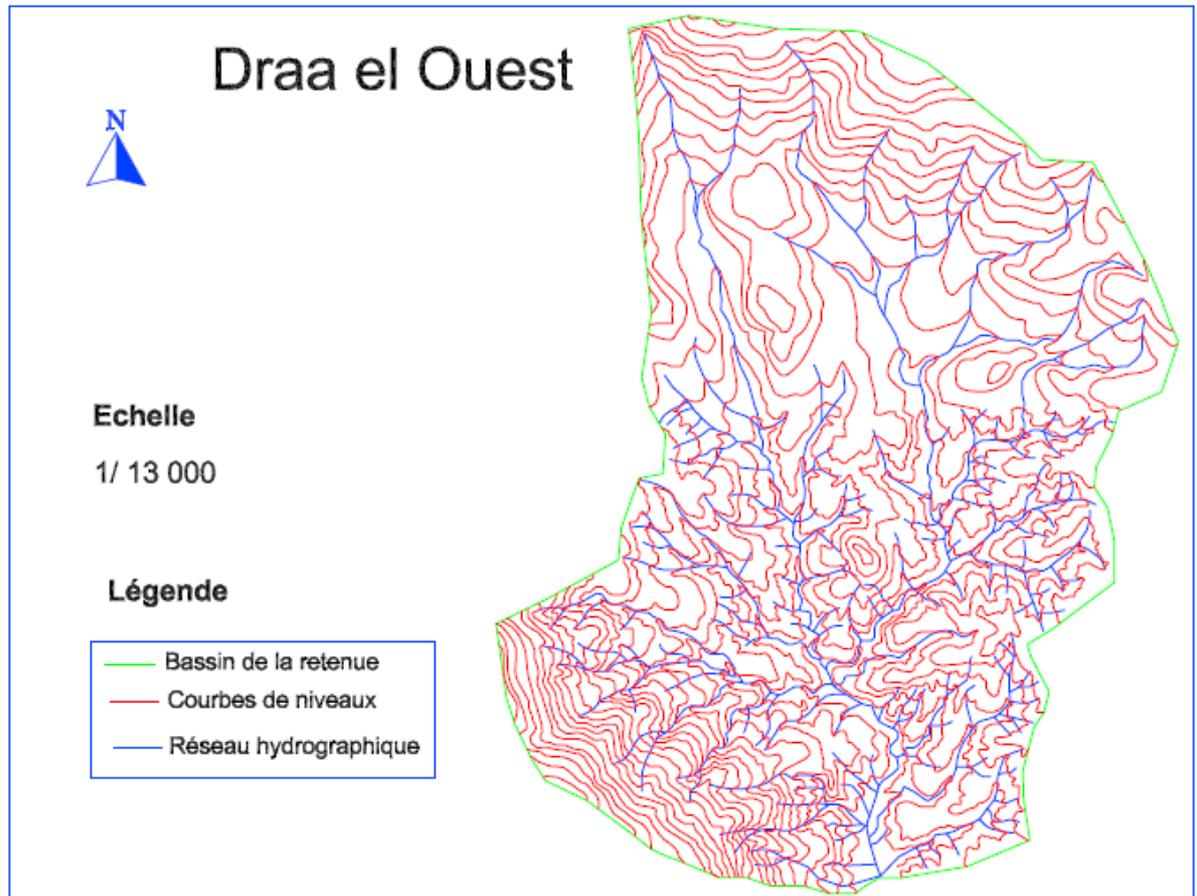
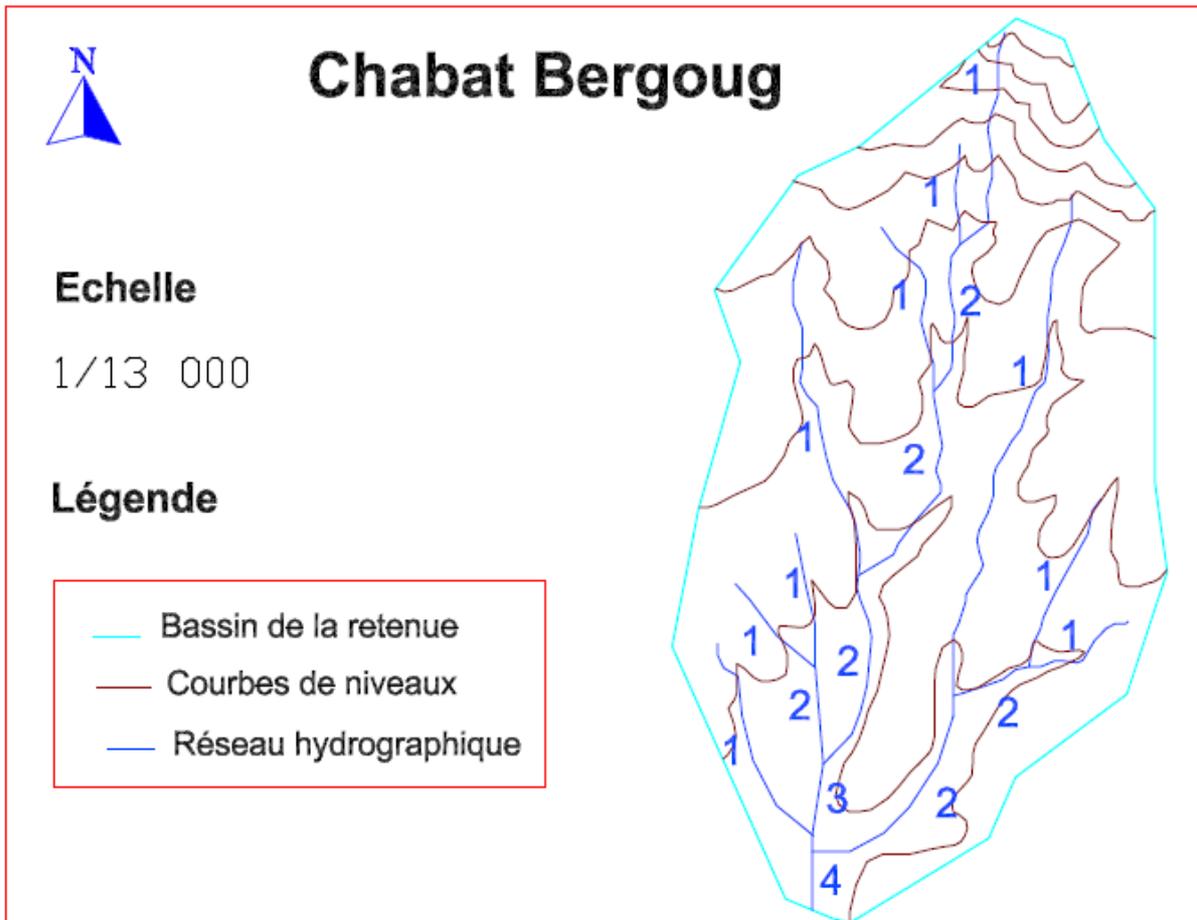
L'évaluation des modèles d'érosion actuels montre que leurs capacités de prédiction sont encore très limitées. Les modèles actuels couplent l'érosion aux écoulements sur le bassin versant en se basant sur l'état des connaissances des processus d'érosion, de transport solide et de dépôt des matériaux à des échelles différentes : échelle locale d'action de l'homme (la parcelle, l'aménagement sur le versant ou dans le réseau hydrographique) et à l'échelle globale de contrôle des ressources et des risques (le bassin versant). Les couplages avec des SIG et le recours aux données de télédétection deviennent dès lors des voies quasiment incontournables. Les modèles basés sur un découpage de l'espace en zones irrégulières constituent une avancée majeure susceptible de faire progresser la modélisation de l'érosion, car ils sont bien adaptés à la prise en compte des activités anthropiques.

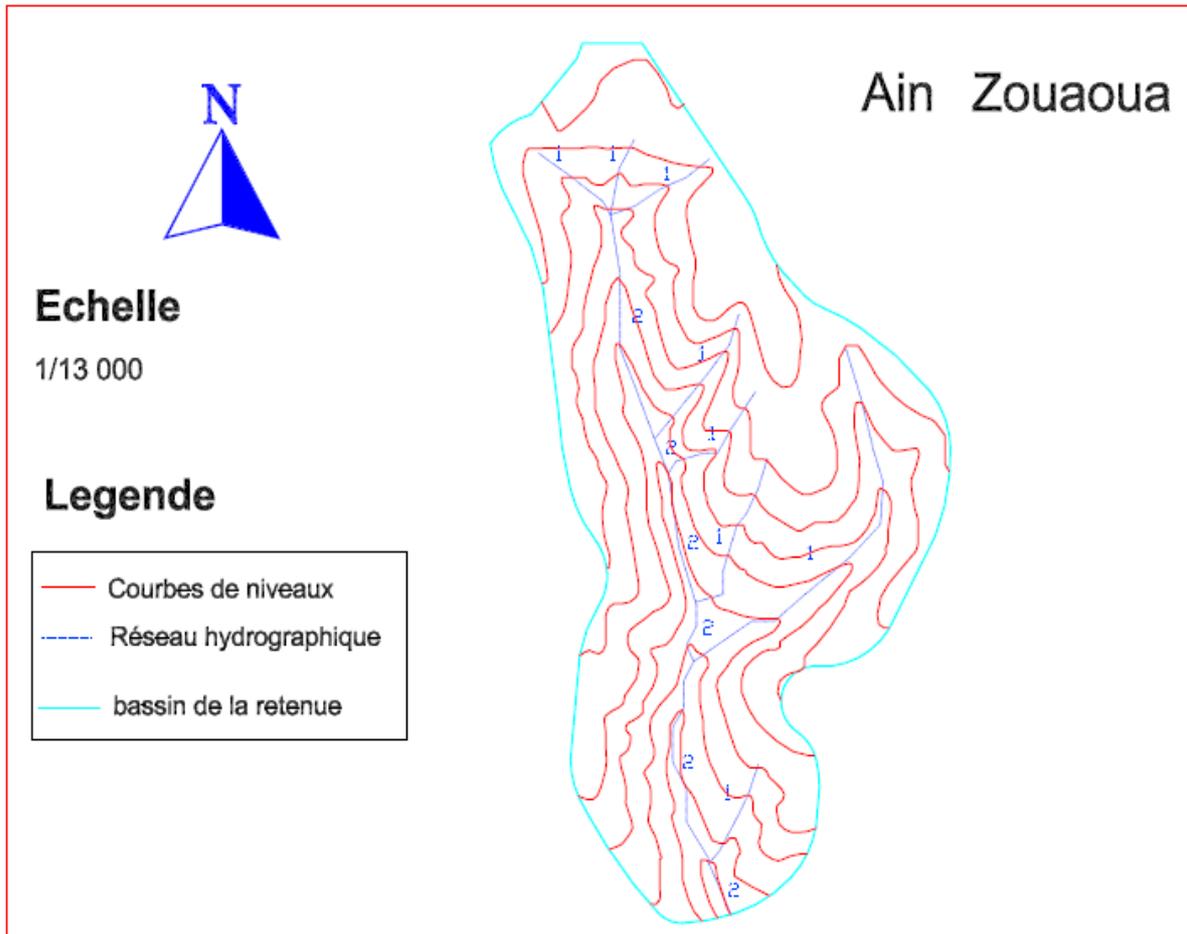
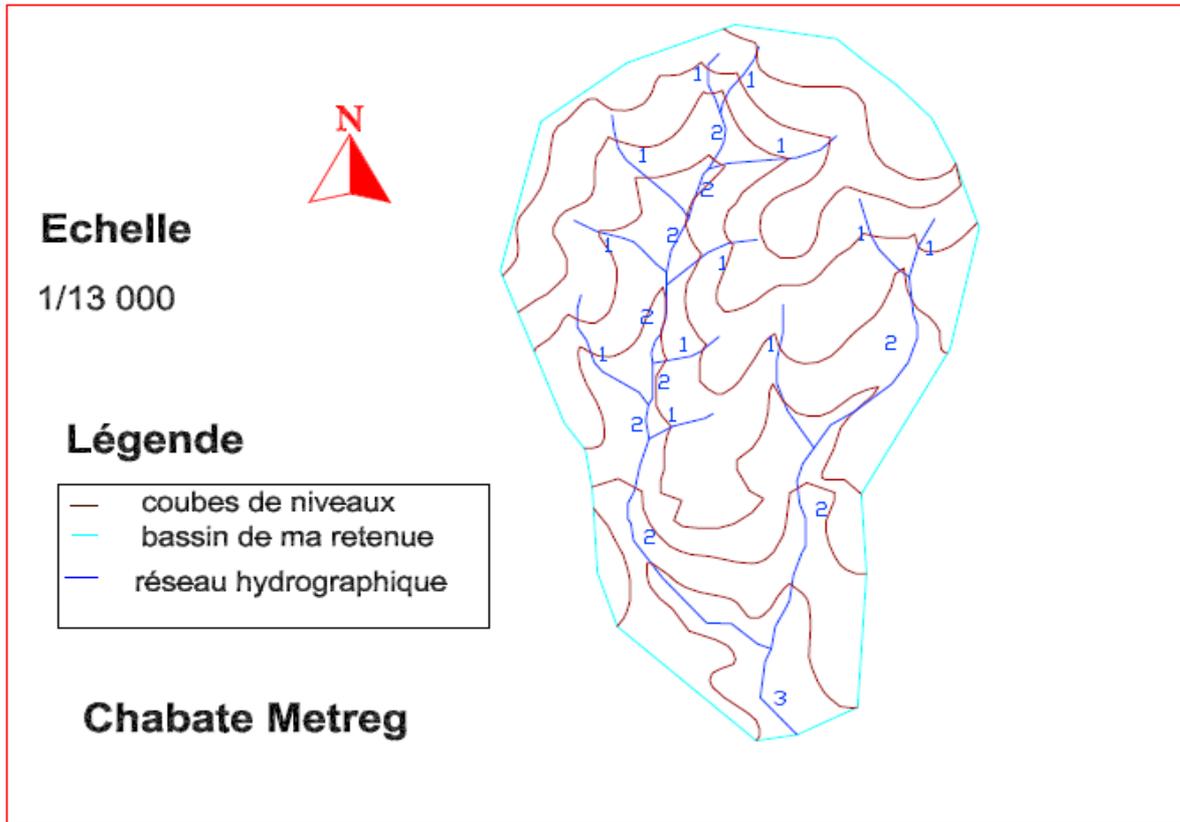
# ANNEXES

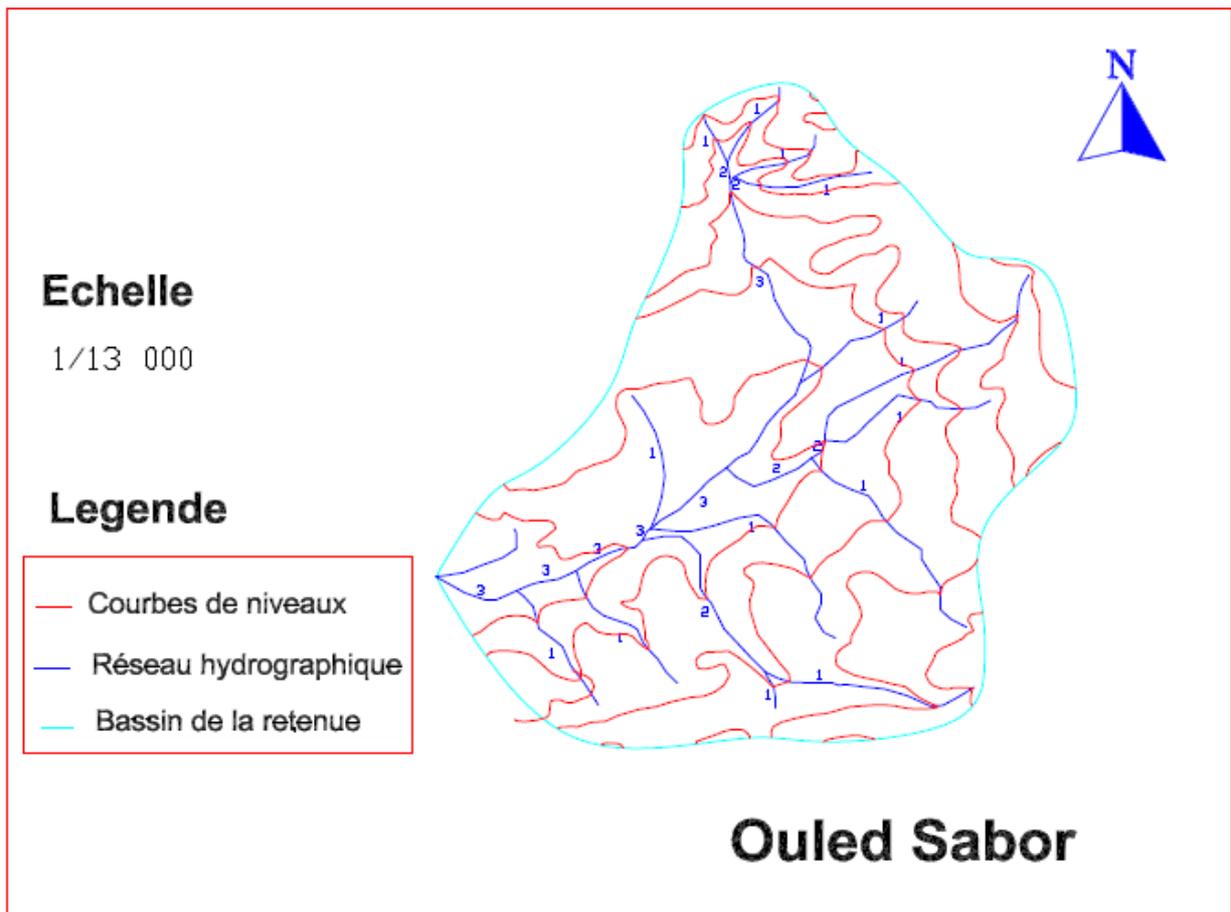
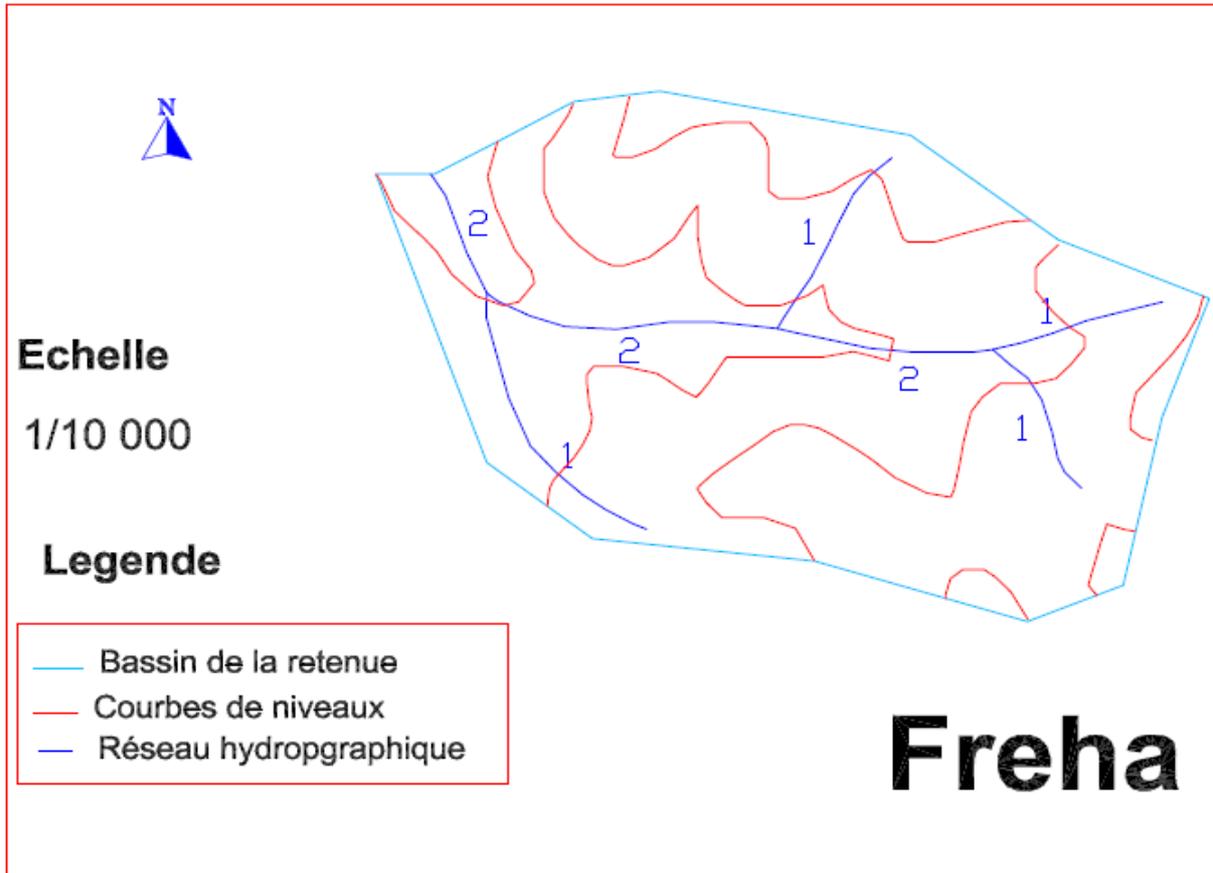
**ANNEXE I**

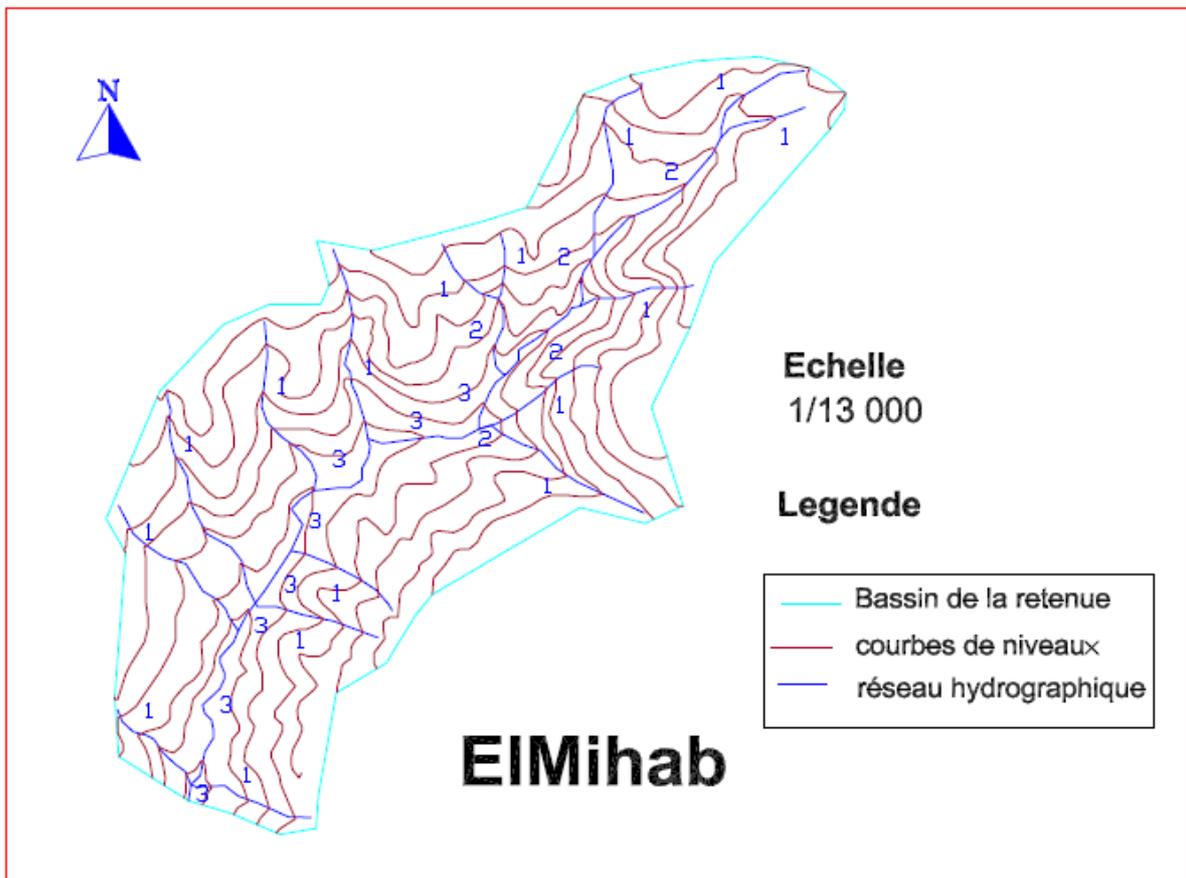
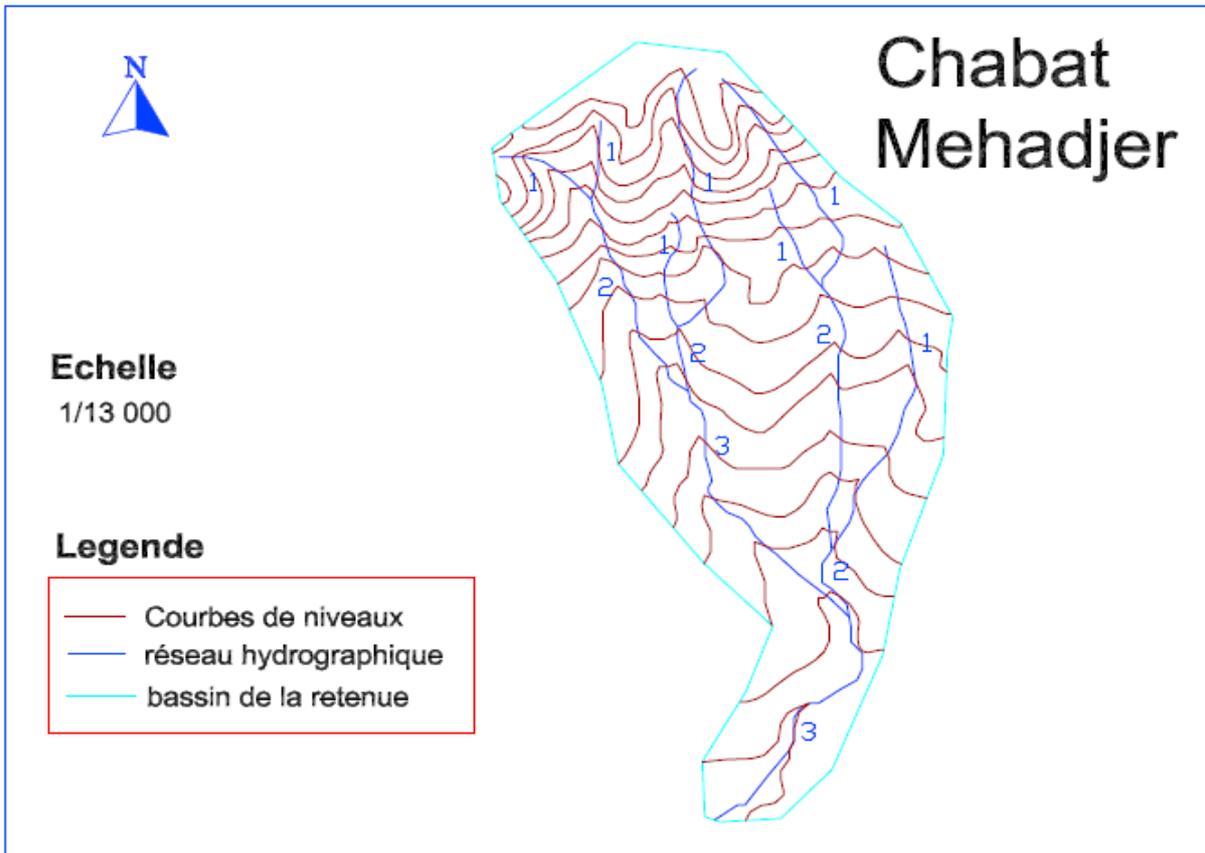
**BASSINS VERSANTS DES RETENUES**

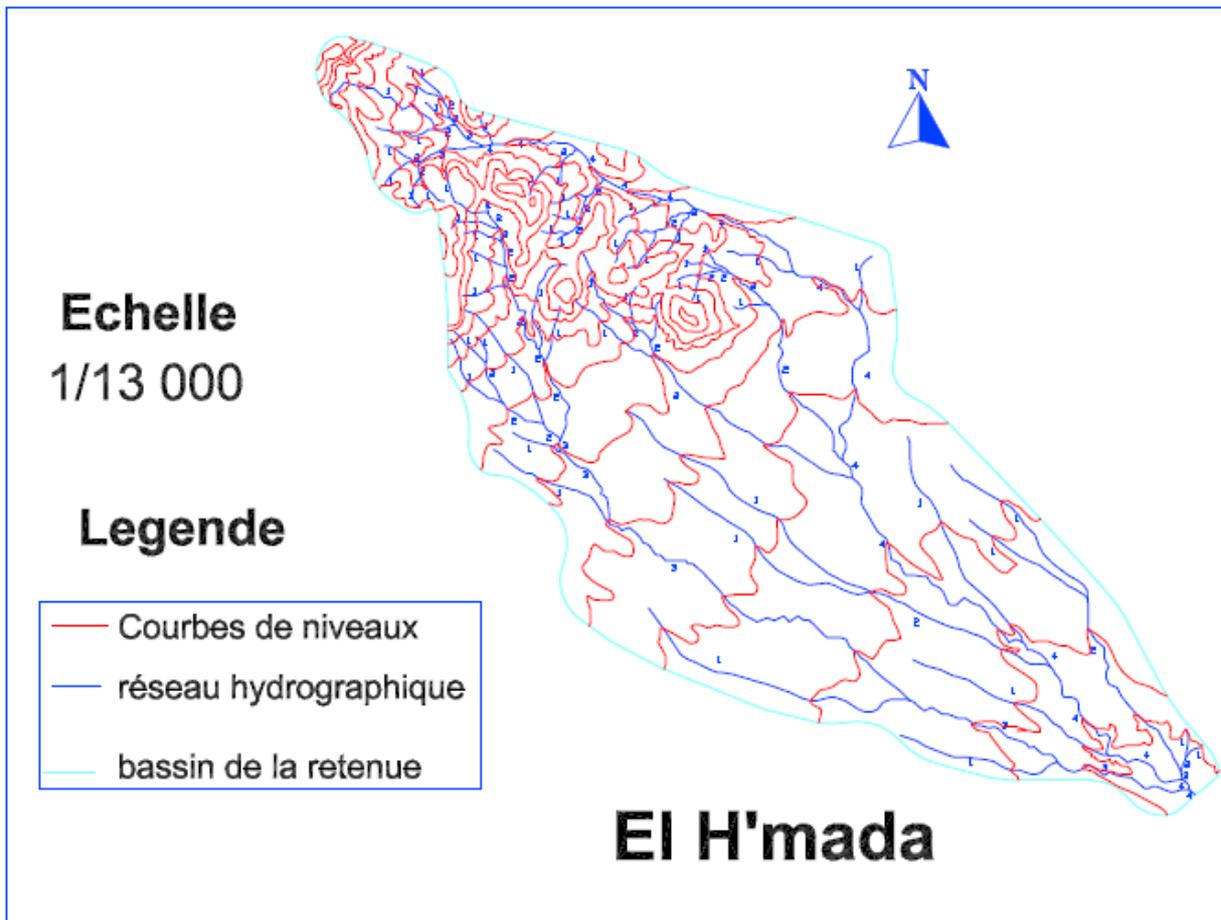
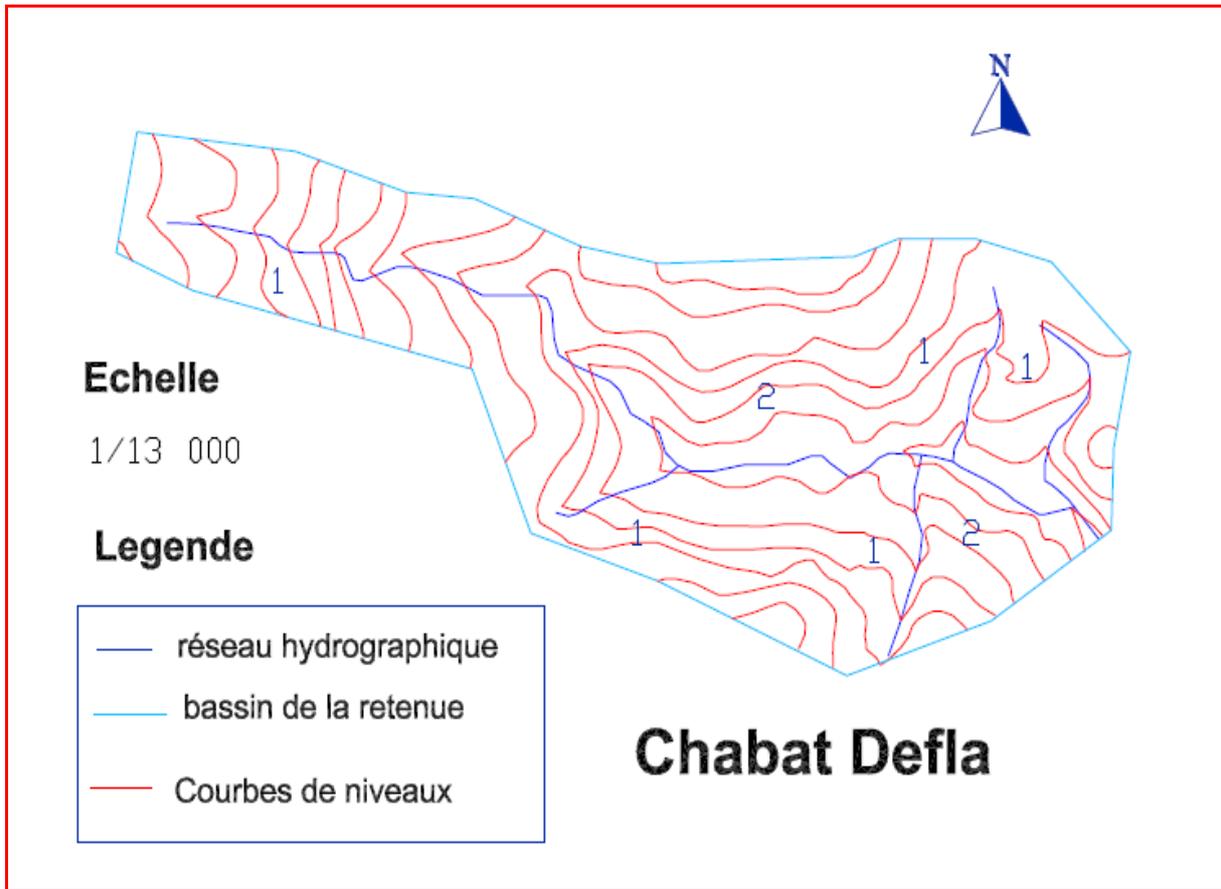
**COLLINAIRES**

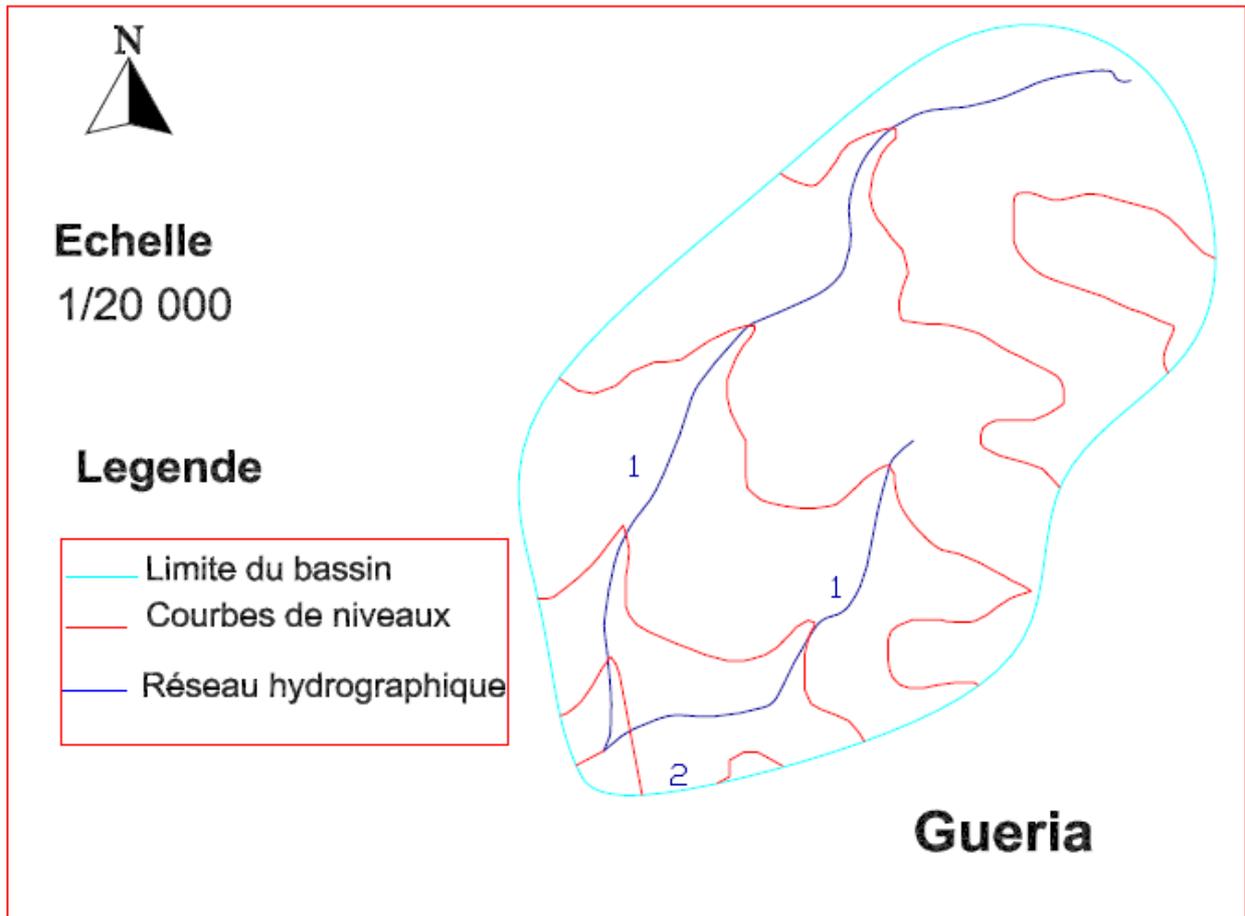
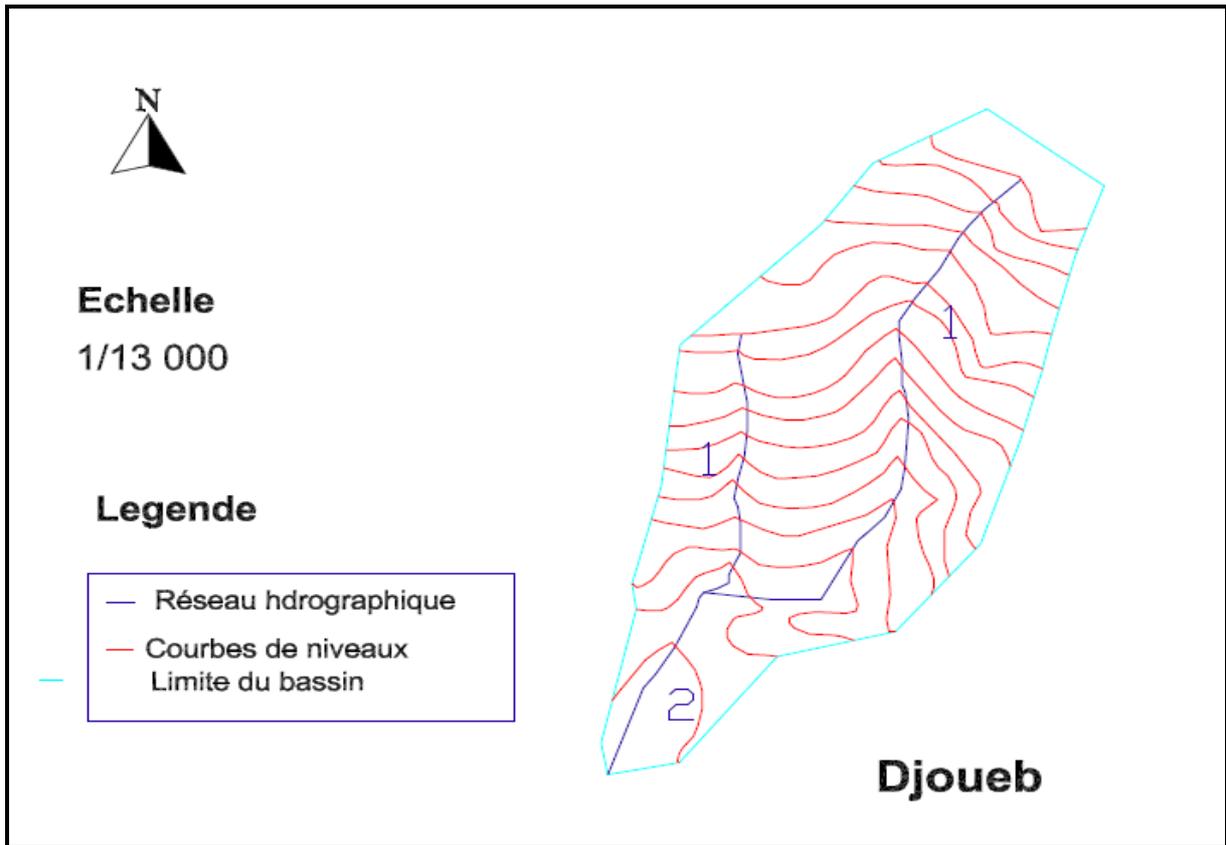












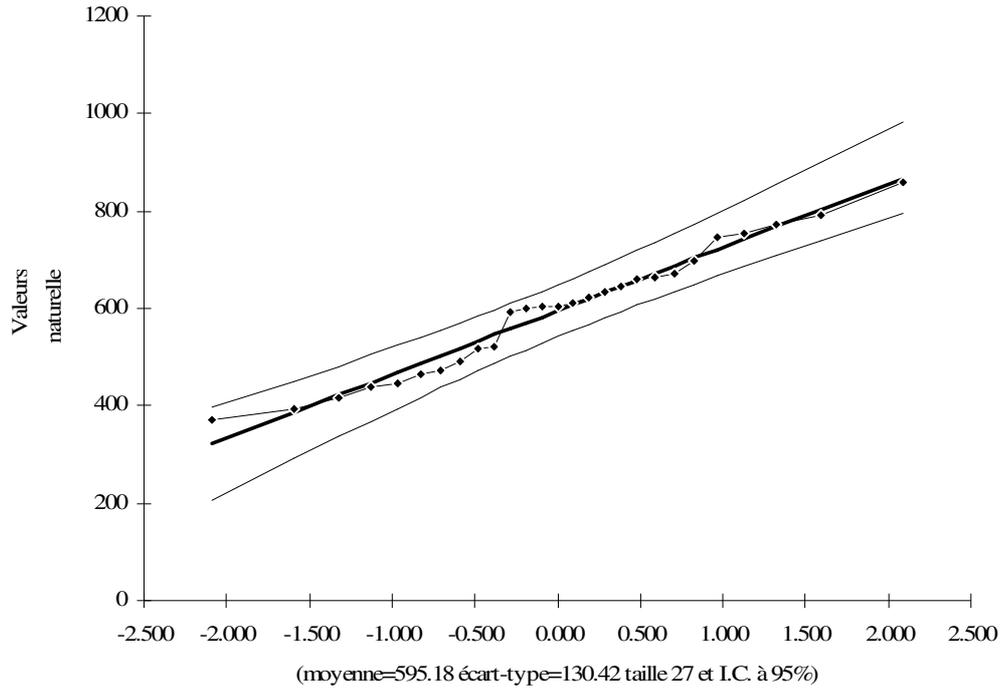
**ANNEXE II**

**AJUSTEMENT DES PRÉCIPITATIONS**

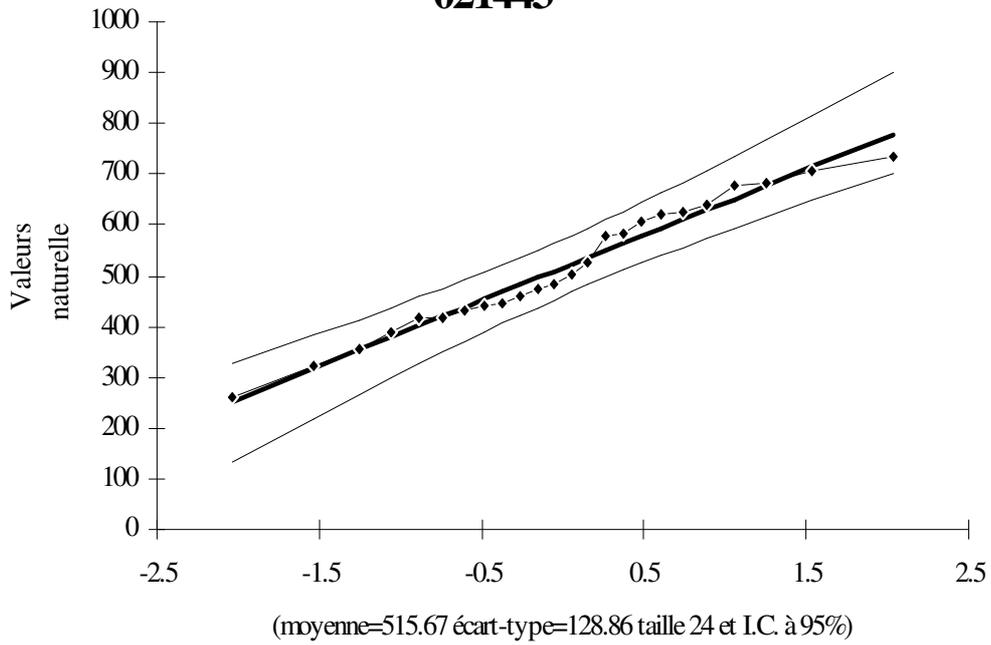
**ANNUELLES**

**1. Ajustement des précipitations annuelles a la loi Normale**

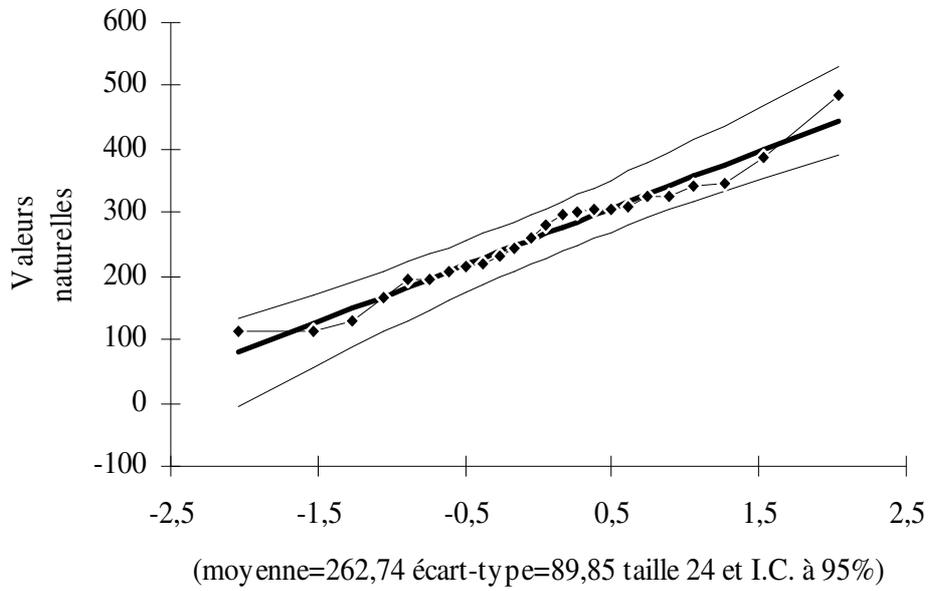
020306



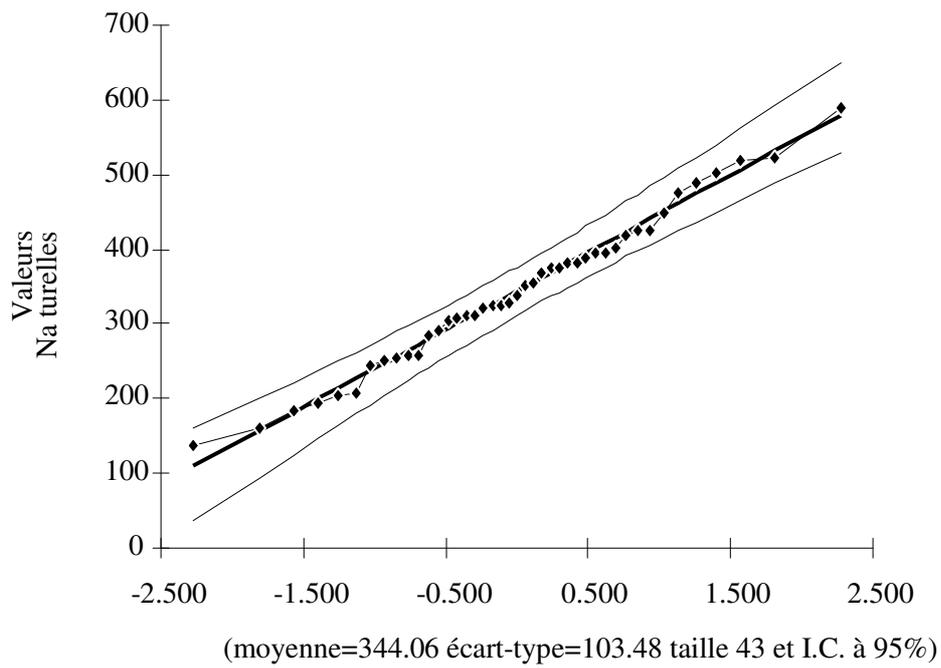
021443



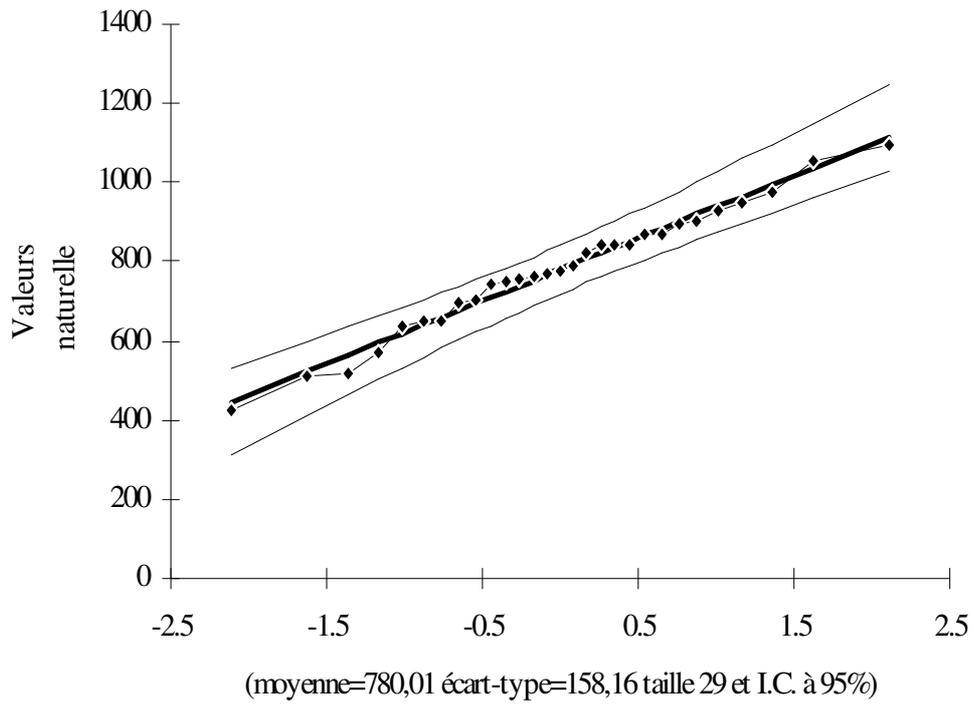
### Station 050102



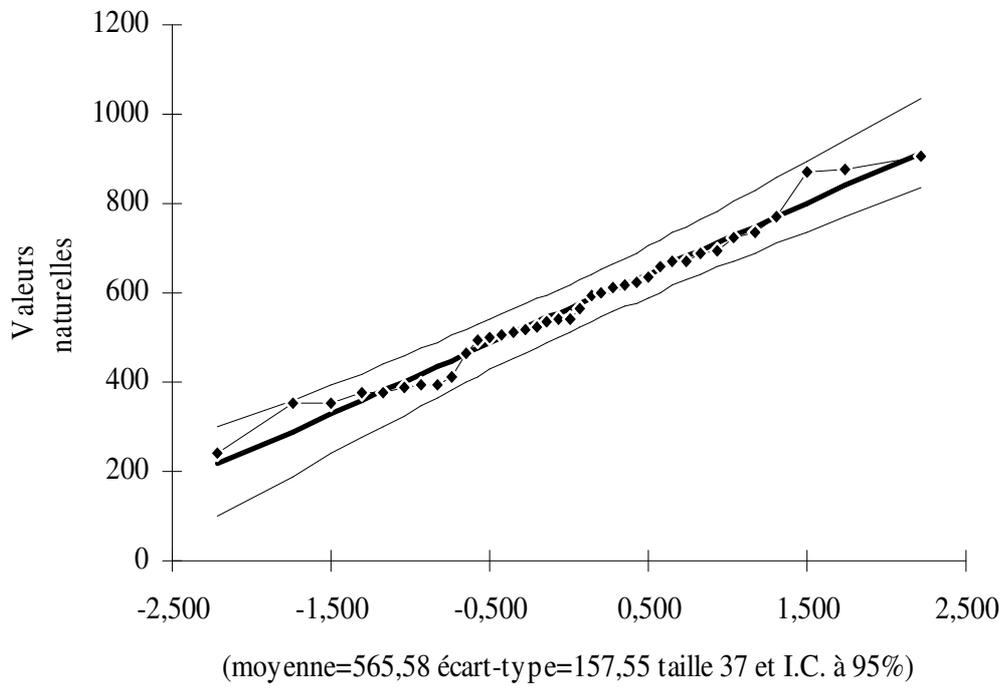
### Station 150607



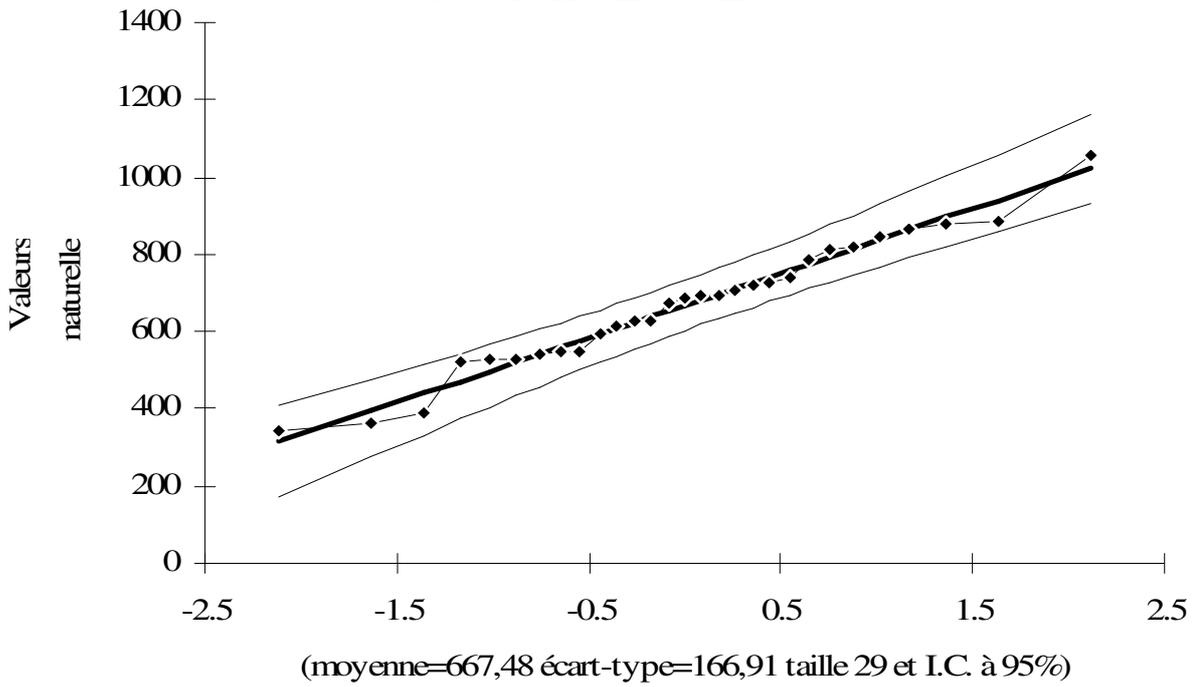
**Station 021020**



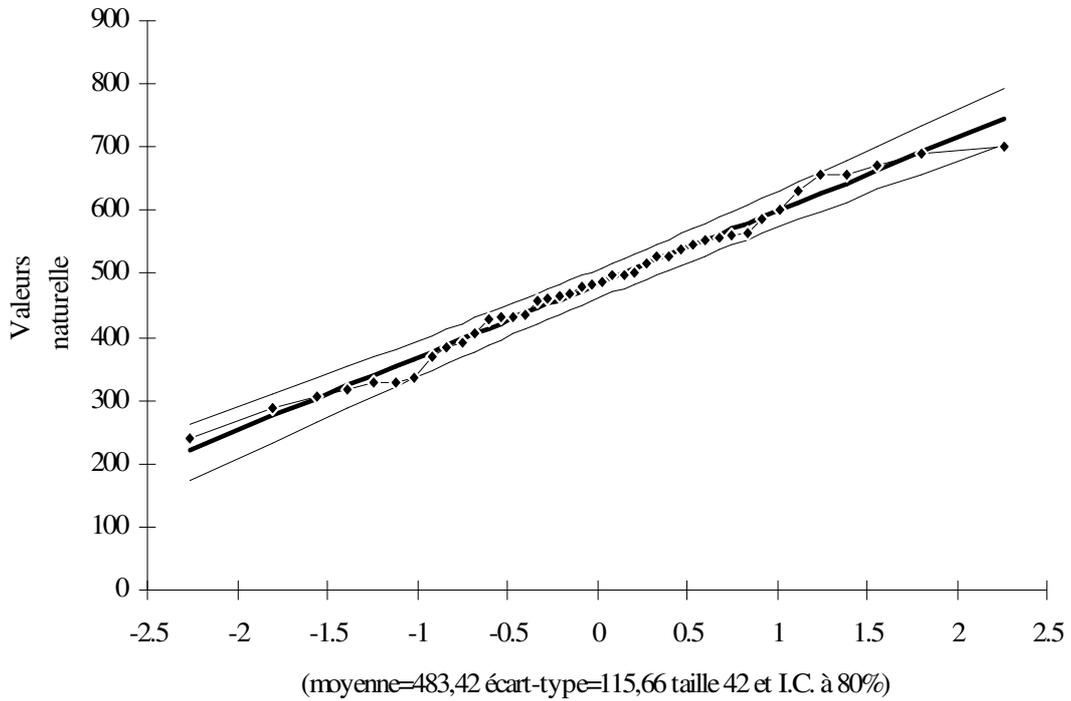
**Station 150703**



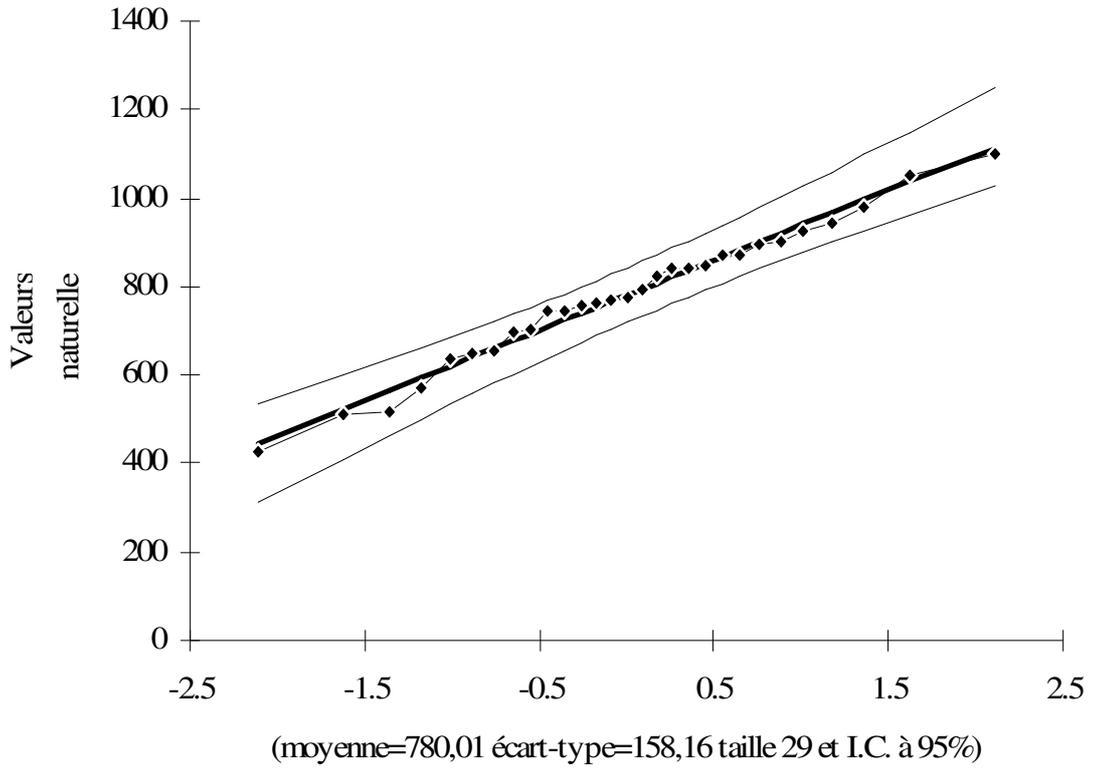
### Station 020602



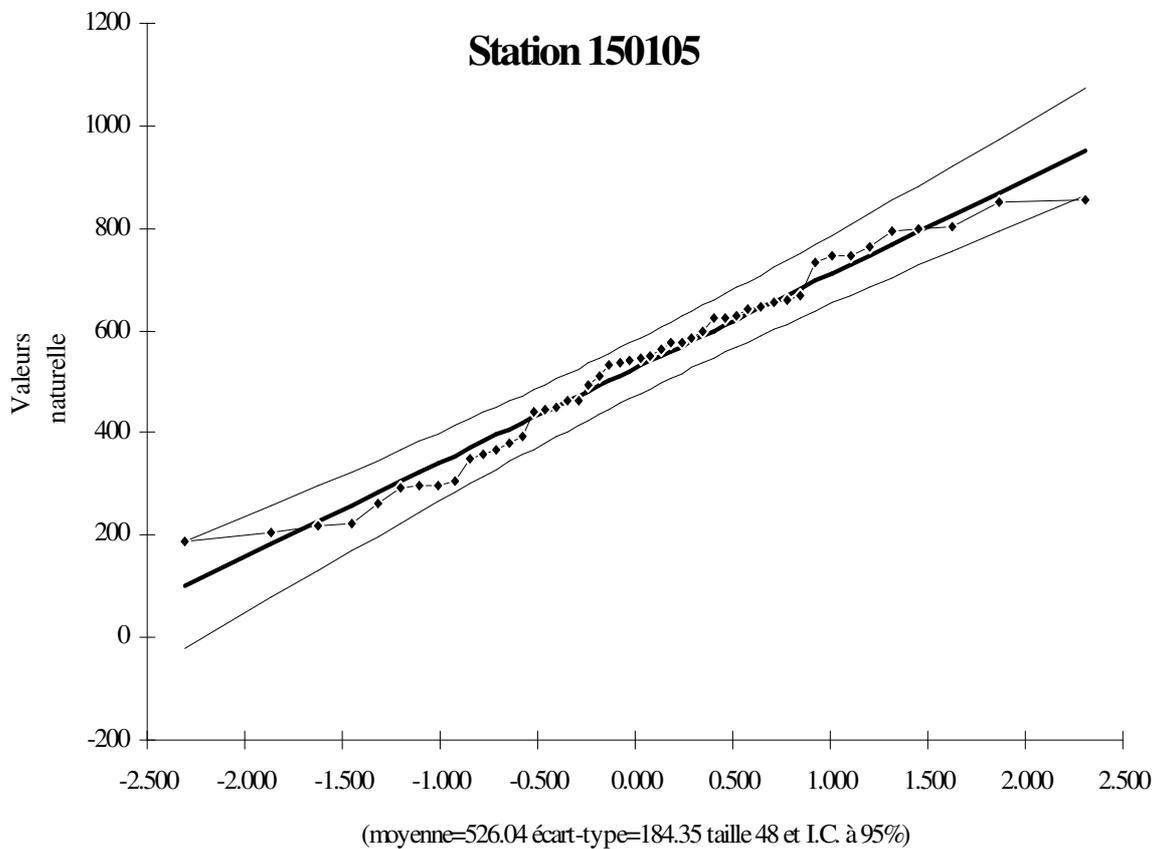
### Station 151002



### Station 020810

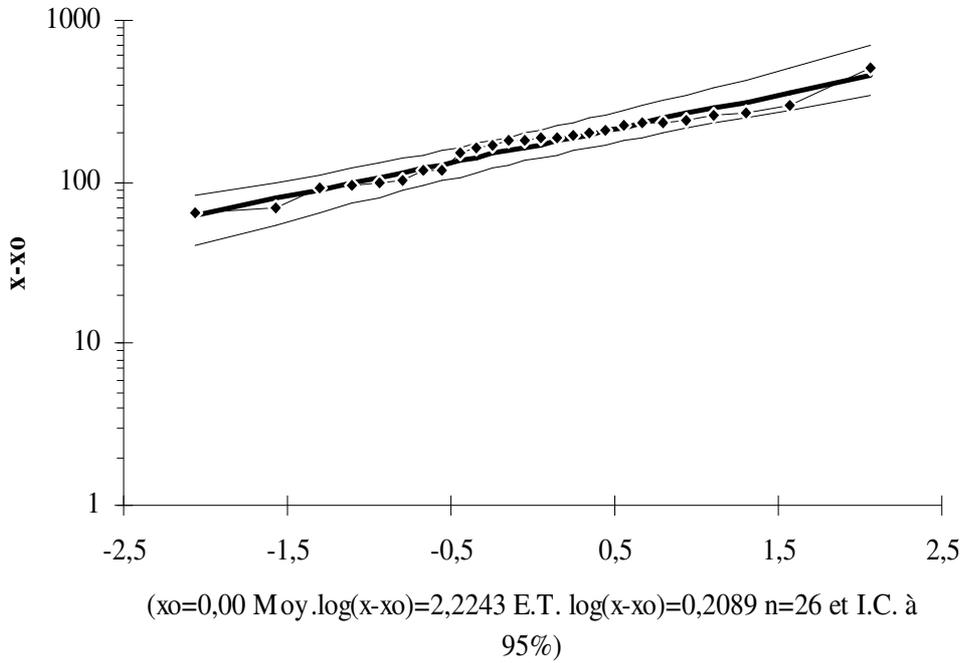


### Station 150105

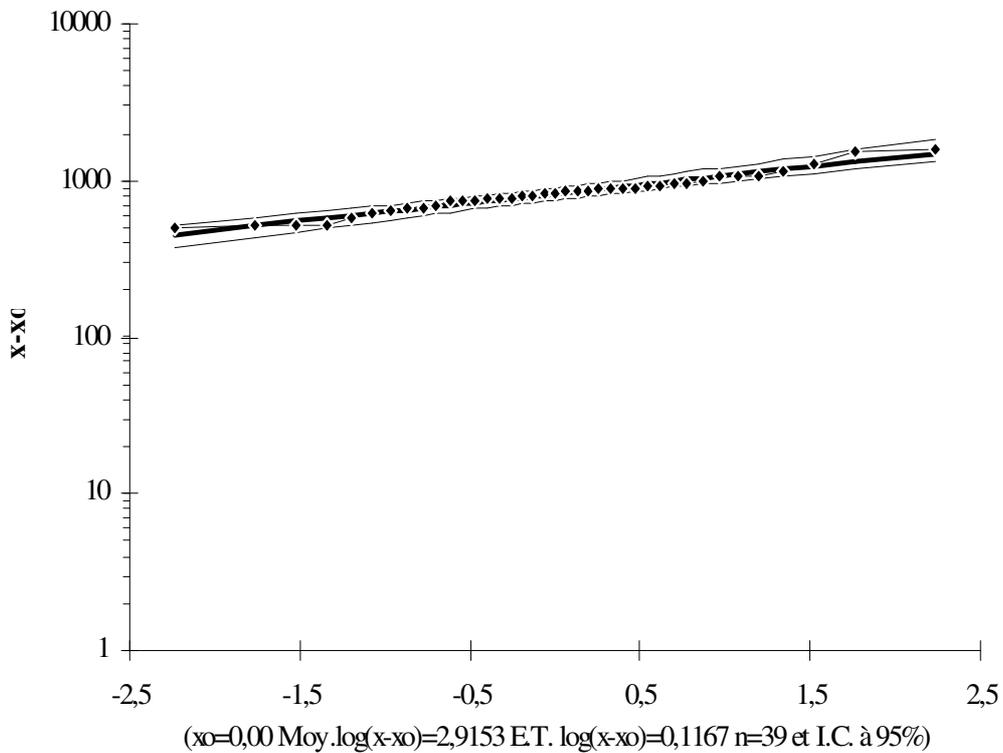


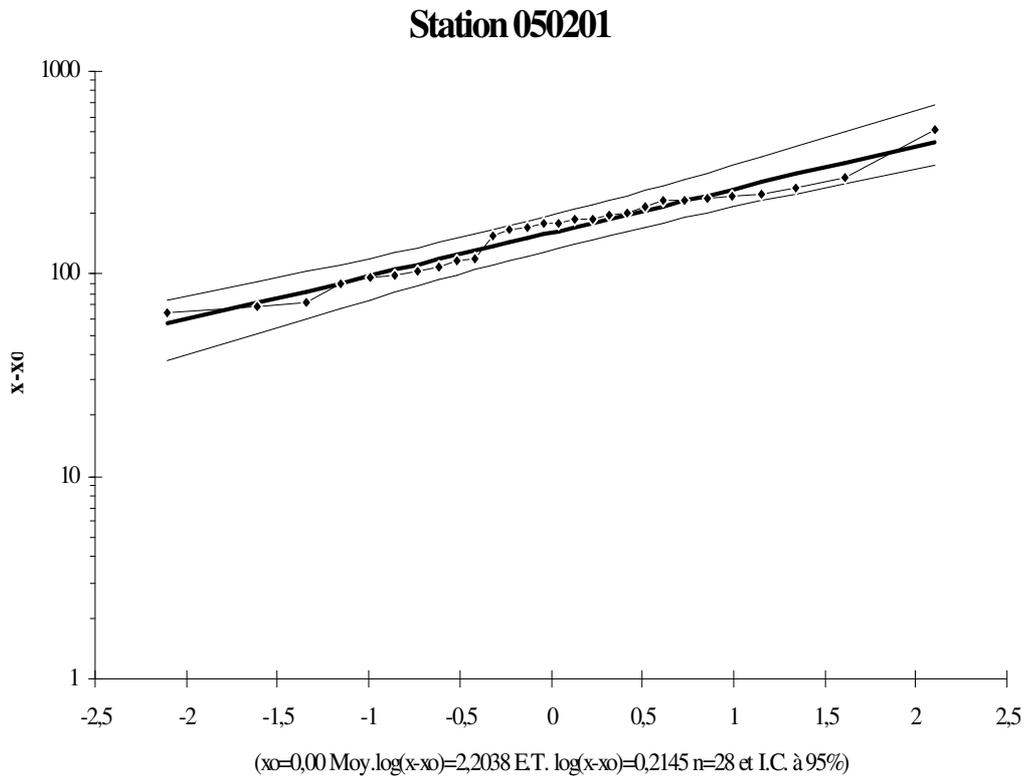
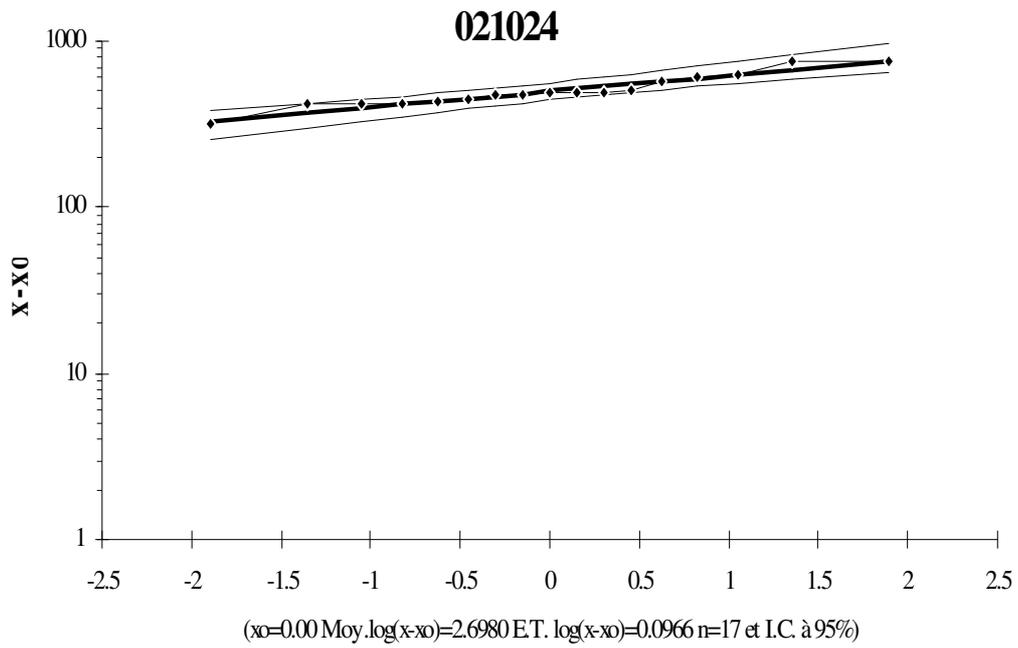
2. Ajustement à la loi Log normal

**Station 090503**

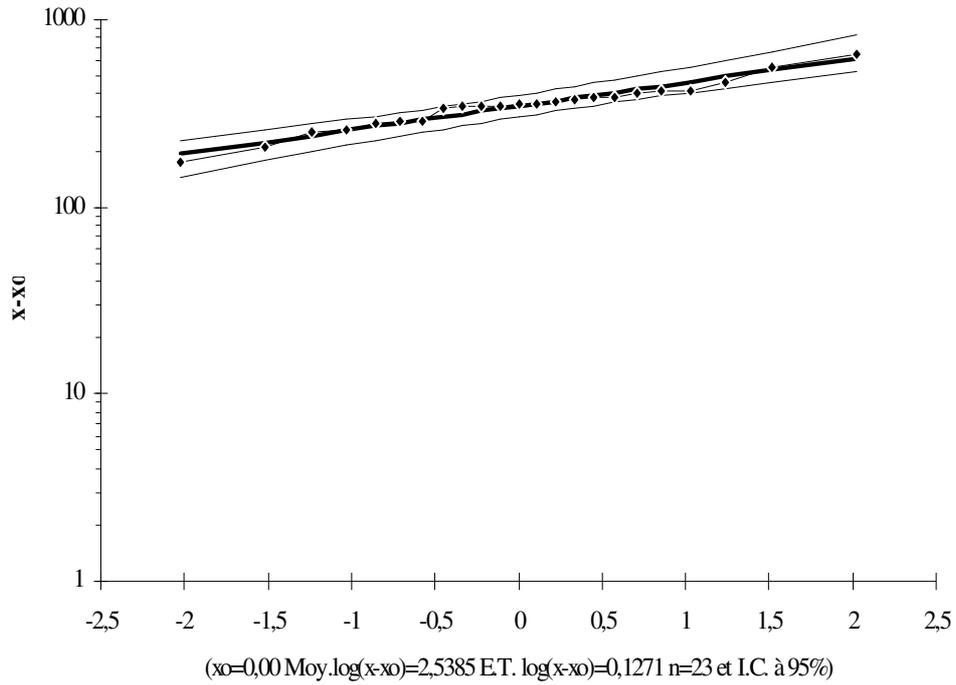


**Station 150101**

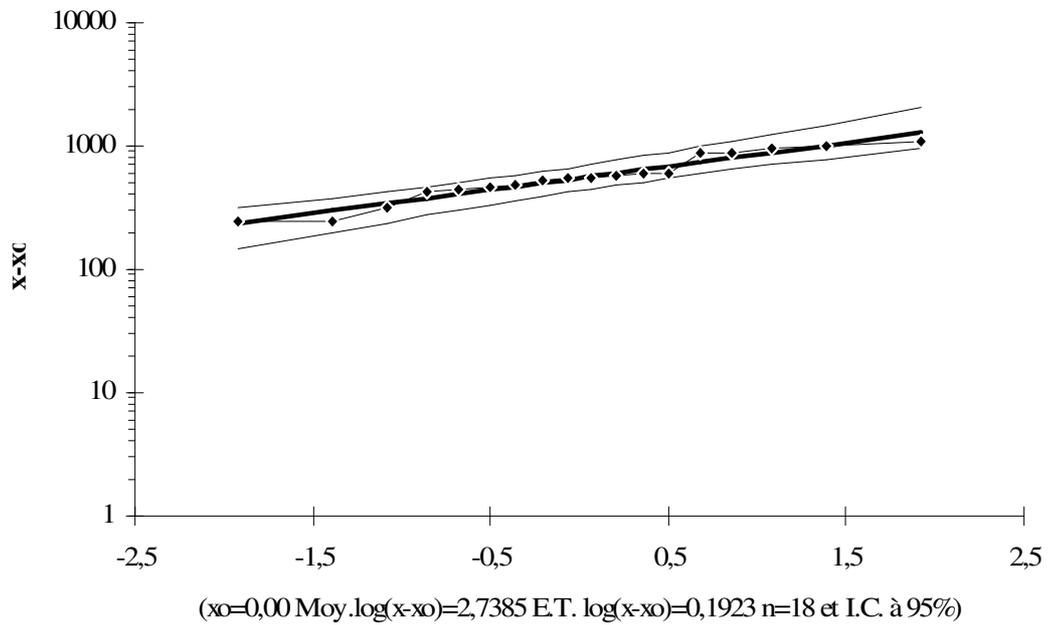




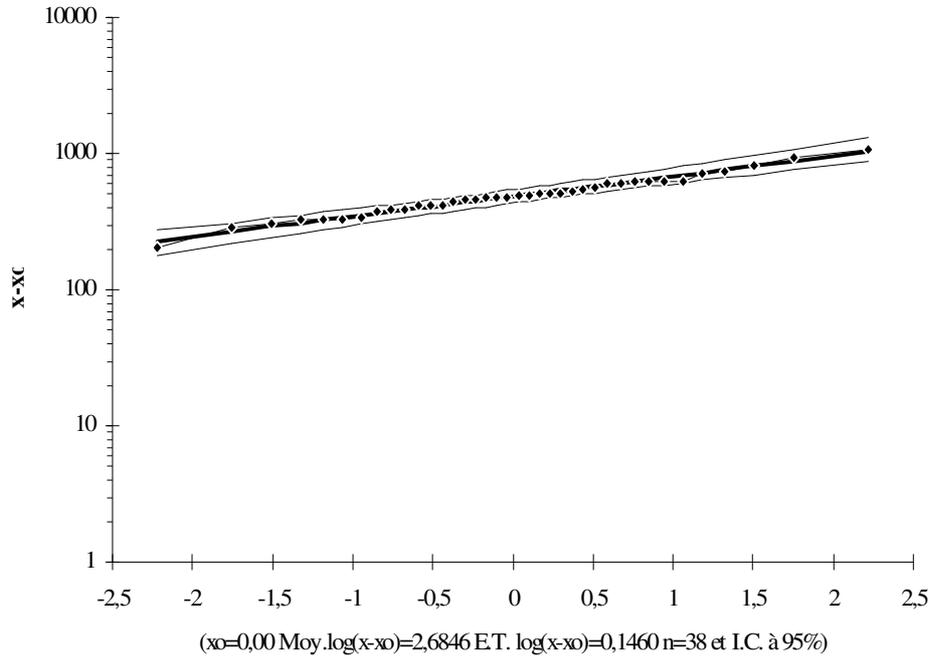
**Station 150103**



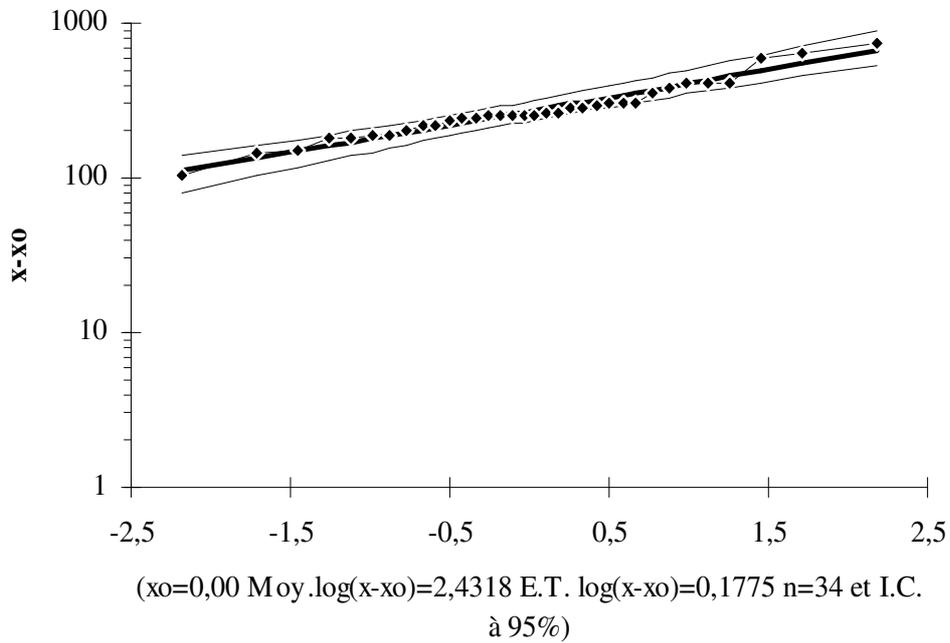
**Station 150111**



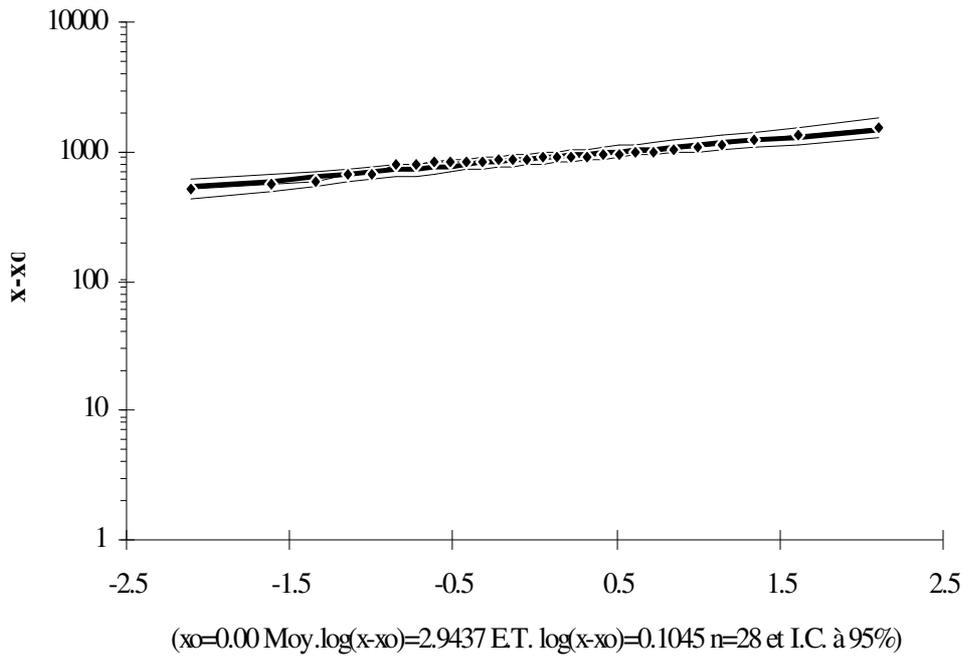
**Station 150102**



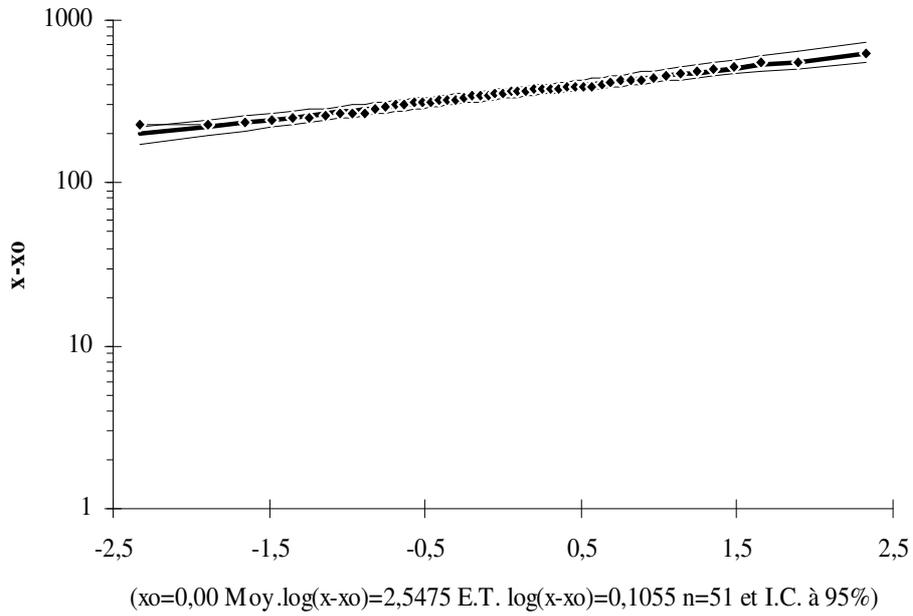
**Station 050402**

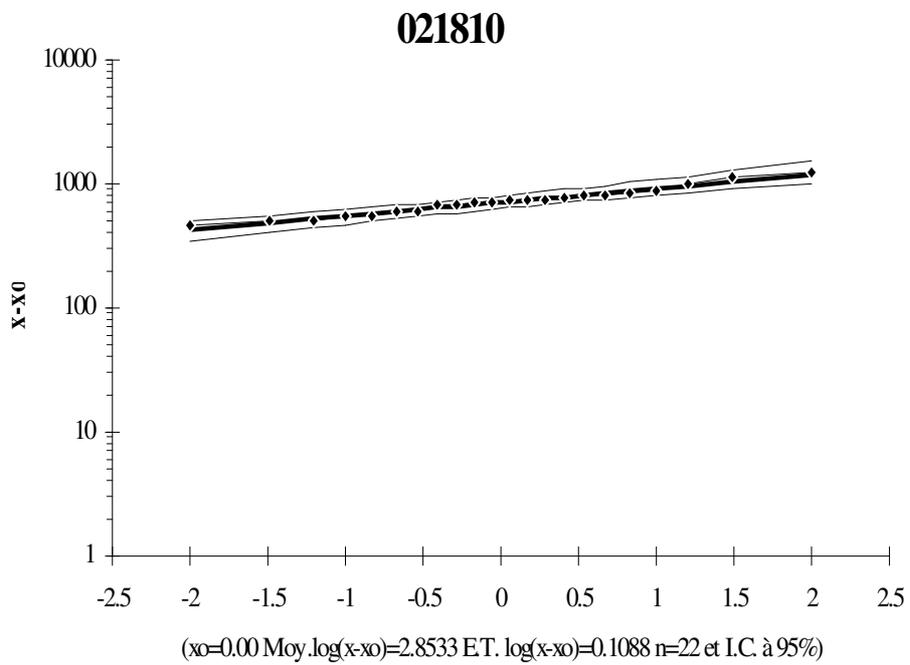
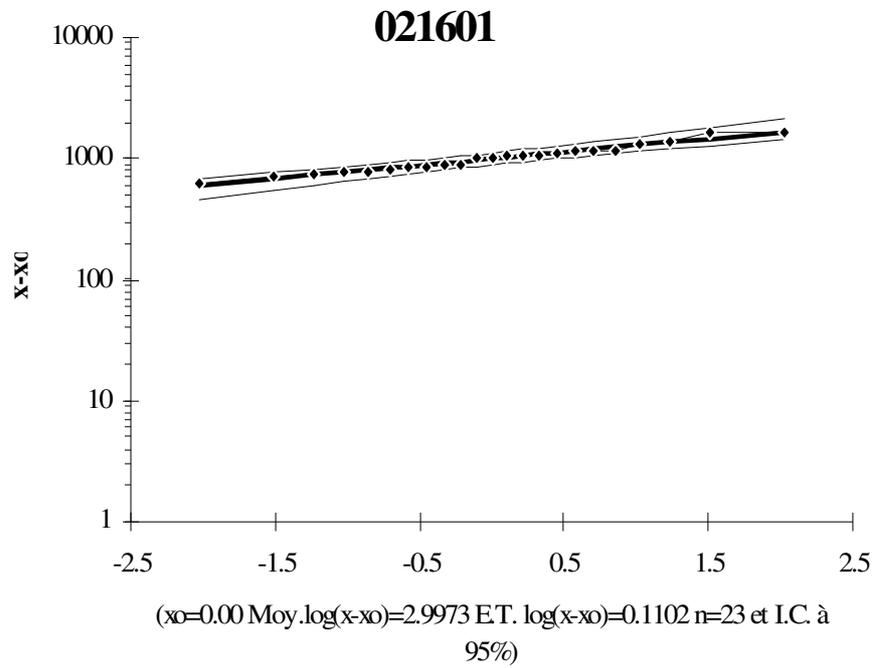


### 021504

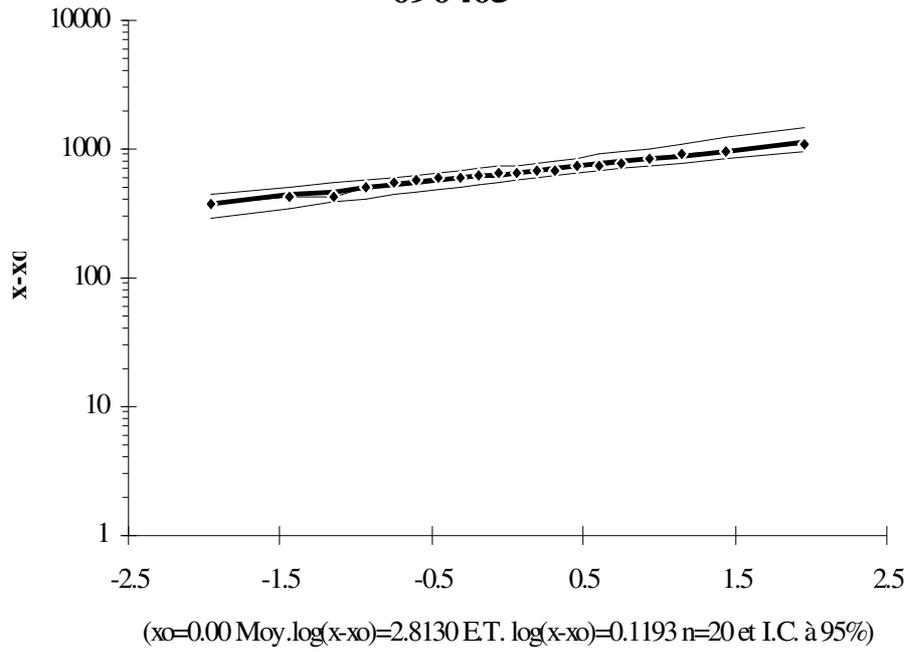


### Station 050905

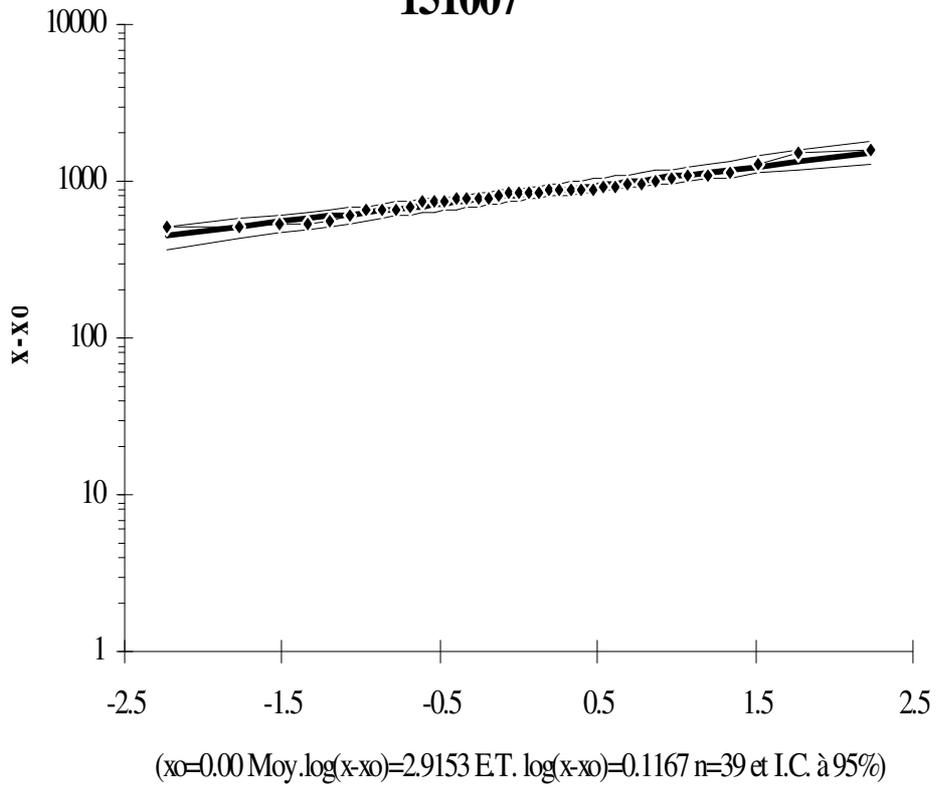




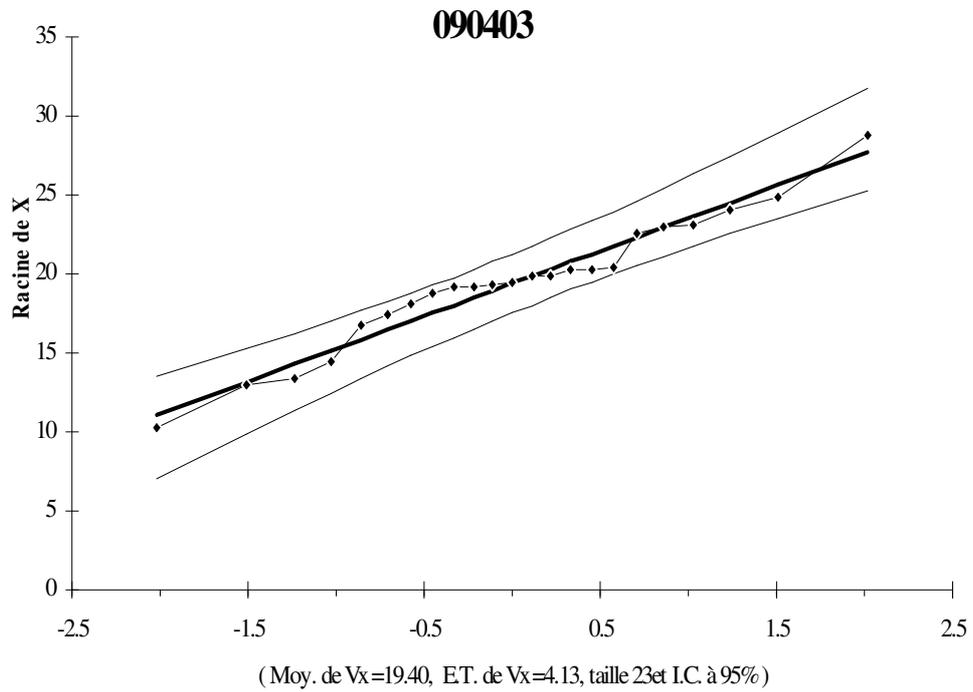
090405



151007



### 3. Ajustement à la loi Racine Normale



# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- Abdellaoui. L** : Quelques aspects environnementaux dans les pays du Maghreb, Chapitre I: érosion et envasement des barrages dans les pays du maghreb. **Agence Nationale des Bassins AHS (2004)** : Elaboration du cadastre hydraulique du bassin hydrographique A-H-S.
- Achite. M & Meddi. M (2004)** : Estimation du transport solide dans le bassin versant de l'oued Haddad (Nord-Ouest algérien). Sécheresse, Vol 15, n° 4, 367- 73, 2004.
- Agence Nationale des Barrages (2002)** : L'envasement des barrages en Algérie, sous le Haut Patronage de Monsieur Aissa Abdellaoui.
- Albergel. J ; Pepin. Y ; Nasri. S & Boufaroua. M (2003)**: Erosion et transport solide dans les petits bassins méditerranéens. Hydrology of the Méditerrananean ans Semiarid Regions IAHS Publ no 278-2003
- Ayadi. I, Abida. H ; Djebbar .Y & Mahdjoub .M (2007)** : Régionalisation de l'envasement des retenues collinaires application aux lacs collinaires de la dorsale tunisienne. 2<sup>ème</sup> colloque international de l'eau.
- BCEOM-BG-SOGREAH (2005)** : Etude d'actualisation et de Finalisation du Plan National de l'Eau, Régions hydrographiques Centre Est, Rapport de Mission 2-Volet 4.
- Bouanani. A (2004)** : Hydrologie, transport solide et modélisation, étude de quelques sous bassin de la Tafna (NW – Algérie), Université Abou Bekr belkaid Tlemcen, thèse de doctorat
- Chadi. A & T. Hadji (1992)** : Erosion des sols et envasement des barrages. Algérie Equipement 5 : 20-25.
- Chih. T, Timohy.J (1998)** : Surface érosion, sediment transport and reservoir sedimentation. IAHS Pub N° 249, 1998.
- Cosini. M (2005)** : Introduction aux réseaux de neurones, Université Victor Segalen France
- Coulibaly. P ; François. A & Bernard. B (1999)** : Prévision Hydrologique par Réseaux de Neurones Artificiels – état de l'art. Can.J.Civ.Eng.26 PP 293-304.
- De Boissezon. J** : Erosion des aménagement amont et envasement des petites retenues au Burkina Faso.
- Dechemi. N ; Benkaci. T & Issoulah. A (2003)** : Modélisation des débits mensuels par les modèles conceptuels et systèmes neuro flous. Rev.Sci.Eeau, 16, 407 – 424.
- Demmak. A (1982)** : Contribution à l'étude de l'érosion et des transports solides en Algérie septentrionale. Thèse de Doctorat, Université Pierre Marie Curie – Paris.
- Demmak. A (1982)** : Contribution à l'étude des écoulements solides des cours d'eau en Algérie, Institut Nationales des Ressources Hydrauliques.
- Demuth. H; Beale. M & Hagan. M** : Neural Network Toolbox 6, MATLAB, The Math Works, Accelerating le pace of engineering and science.
- Dreyfus.G (1998)** : Les réseaux de neurones, Ecole Supérieure de physique et chimie industrielles de Paris (ESPCI), Paris.

- Fabien Moutarde (2003)** : Introduction aux réseaux de neurones et leurs application en automatique
- Fournier. F (1960)** : Climat et érosion. Paris, Presses Universitaires de France.
- Fing. L & Hong. W (2007)** : On Hydrologic calculation using artificial neural networks. Applied Mathematics Letters 21 (2008): 453 -458.
- Gafreg. R (1993)** : Modélisation conceptuelle du transfert des matières en suspension, effet d'échelles spatio temporelles. Thèse de Doctorat, Université Paris 6, CEMAGRAF
- Ghorbel A. & Claude. J (1982)** : Mesure de l'envasement de sept barrages en Tunisie : estimation des transports solides. N° 01932, cote A.
- Hadjrabia Melboucy. N & Bouhadef. M (2007)**: Carte de prévision des zones de dépôt dans une retenue de barrage. Faculté de Génie Civil, UTSHB, Alger.
- Hu T.S ; Lam. K.C & Ng. S.T (2001)**: River flow times series prediction with a range dependent Neural Network. Hydrological Sciences, 46(5), pp 729-745.
- Hydrodragage - CT Systeme (2005)** : Les levés bathymétriques des barrages en exploitation, barrage Ain zada, Boukerdane et hamiz.
- HYDROMED (2001)** : Rapport final du programme de recherche sur les lacs collinaires dans les zones semi arides du pourtour méditerranéen. IRD / INRGREF Tunis
- Kadik. B (1976)** : L'érosion, la conservation et la restauration des sols en Algérie, Ministère de l'Hydraulique, l'Environnement et des Forêts. Institut Nationale de Recherche Forestière.
- Kisi Ozgur ( Aout 2005)** : Suspended sediment estimation using neuro fuzzy and Neural Network approches. Hydrological Sciences, 50 (4): August (2005).
- Kisi Ozgur (octobre 2007)** : Constructing neural network sediment estimation models using data driven algorithm. Mathematics and Computers in Simulation 79 (2008): 94 -103.
- Kisko. B (1992)** : Neurol Networks and fuzzy systems : a dynamical approach to machine intelligence. Prentice Hall Int.
- Le – Huy. H (1998)** : Introduction à MATLAB et simulink, Département de Génie électrique et de génie informatique, université Laval Québec, Canada
- Lefkir. A (2008)** : Modélisation du transport solide par les modèles neuroflous, thèse de doctorat (2009) ENP, Alger.
- Lefkir. A ; Benkaci. T & Dechemi. N (2005)** : Quantification du transport solide par la technique floue, application au barrage de Beni Amrane (Algérie).
- Master 2005- 2006** : Introduction aux réseaux de neurones.
- Mehmet Ardiçlioglu; Ozgur kisi & Tefaruk Haktanir (2007)** : Suspended sediment prediction using two feed forward back propagation algorithms. Can.j.Civ.Eng : 34 : 120 – 125 (2007).

- Meddi. M ; Khaldi. A & Meddi.H (1998) :** Contribution à l'étude du transport solide en Algérie du Nord. IAHS Publ, n° 249, 198.
- Mezenner. N (2008) :** Contribution à la gestion intégrée des ressources en eau dans un bassin hydrographique région de Tipaza, ENSH, Blida.
- Minyoung Kim & John Gilley. E (2008) :** Artificial Neural Network estimation of soil erosion and nutrient concentration in runoff from land application areas. Computers and electronics in agriculture 64 (2008) : 268-275.
- Murat Alp & Kerem Cigizoglu. H (2005) :** Suspended sediment load simulation by two artificial neural networks methods using hydrométéorological data. Environmental Modelling and Software, 22 (2007) : 2-13.
- Norgaaed. M; Ravin. O & Poulsen. N (2000) :** Neural networks for modelling and control of dynamic systems (Springer – Verlag limited) – London – United Kingdom.
- Norgaaed. M (1997) :** Neural network based system identification toolbox version 1.1 for use with MATLAB. (Report No 97 Department of automation) Technical University of Denmark – Lyngby – Denmark, pp 96
- Partal .T & H Cigizoglu. K (2008):** Estimation and Forecasting sediment of daily suspended sediment data using wavelet neural networks. Journal of hydrology (2008) 358, 317-331.
- Paresh Dekan & V.Chandramouli (2005) :**Fuzzy Neural Network of hydrologic Flow Routing. Journal of Hydrology. Vol 10:4(302)
- Paschen. H, Gomer. D & al (1994) :** Ecoulement et érosion dans des petits bassins versants à sol marneux sous climat semi –aride méditerranéen.
- Ramdane. M (1985) :** Cartographie de morphodynamique de l'Oued Isser : Objectifs et intérêts ; Journées techniques de l'étude « Erosion et transports solides en zone semi – aride », Ministère de l'Hydraulique de l'Environnement et des forêts. Institut National des Ressources Hydrauliques.
- Ramdane. M (1989) :** La notion de représentativité dans les études de l'érosion. Application au bassin versant de l'Isser. Revue Eaux et Sols d'Algérie 2 : 40 - 45
- Raveen Rai. K & Mathur. B (2007) :** Event Based sediment Yield Modeling using Artificial Neural Network. Water Resour Manage (2008) 22: 423 -441.
- Raked. H (2007):** Utilisation d'un système d'Information Géographique (SIG) pour une optimisation de la gestion de l'occupation du sol Cas des vignobles de Baghliia (W : Boumerdes), mémoire de magister (2007), USTHB, Faculté des Sciences de la terre.
- Remini. B & Hallouche. W (2005) :** Prévision de l'envasement dans les barrages du Maghreb. Larhyss Journal, ISSN 1112 -2680, n° 04, Juin 2005, pp. 69-80

- Remini. B (2005)** : La problématique de l'eau en Algérie, Collection hydraulique et transport solide. Edition 2005.
- Remini. B (1989)** : Envasement des barrages : Cas du barrage de Oued El Fodda. Algérie Equipement 15 : 18 – 21.
- SARL . W.S (1999)** : Neural network FAQ part 1 of 7 Introduction periodic posting to the use net new group (Neural Nets) - USA
- Touaibia. B & Benlaoukili. B** : Introduction au dimensionnement des retenues collinaires.
- Touaibia. B ; Touibia. M ; Benlaoukli. B ; Bessalem. A ; Fewzi. M & Sidi Moussa (2005)** : impacts des lâchés du barrage El Moustakbal sur l'envasement d'un barrage de prise d'irrigation, Blida, Algérie.
- Touaibia. B & Achite. M (2003)** : Contribution à la cartographie de l'érosion spécifique du bassin versant de l'Oued Mina en zone semi aride de l'Algérie septentrionale. Hydrological Sciences Journal 48(2), avril (2003).
- Touaibia. B ; Dautrebande. S ; Gomer. A & Aidaoui. A (1999)** : Approche quantitative de l'érosion hydrique à différentes échelles spatiales : bassin versant de l'Oued Mina. Hydrological Sciences – Journal des Sciences Hydrologiques 44 (6) : 973 – 987
- Tixeront. J (1960)** : Débit solide des cours d'eau en Algérie et en Tunisie, IAHS. 53 : 26 – 42.
- Yun Mei Zhu; Lu. X.X & Yue Zhu (2006)** : Suspended Sediment Flux modeling with Artificial Neural Network of the Longchuanjiang River in the Upper Yangtze Catchment, China. Geomorphology 84 (2007) : 111- 125.
- Zaibak. I (2008)** : Contribution à l'érosion spécifique dans le bassin de l'oued Cheliff, mémoire de magister (2008), ENSH, Blida
- Zeroual. A (2009)** : Contribution à la modélisation des courbes de tarages : cas du bassin versant du côtiers Algérois), mémoire de magister (2009), ENSH, Blida.