



Faculté des Sciences et Techniques  
Marrakech



Direction de la Météorologie  
Nationale - Casablanca

Département des Sciences de la Terre

Master Eau et Environnement

2013-2014



Mémoire de Stage de Fin d'Etudes :

**Evolutions et changements des extrêmes pluviométriques  
au niveau de la zone Souss-Massa-Draa (Maroc):  
L'aspect sécheresse**

**Souad Ed-Daoudi**

Encadrée par :

Mohamed El Mehdi **SAIDI** (Faculté des Sciences et Techniques)

Fatima **DRIOUECH** (Direction de la Météorologie Nationale)

Soutenu le 25/06/2014 devant la commission d'examen composée de :

- **Mr SAIDI M. E.** Professeur, FST Marrakech (Encadrant)
- **Mr AGOUSSINE M.** Professeur, ENSA Agadir (Examineur)
- **Mr TOUIL A.** Professeur, FST Marrakech (Examineur)

## *Remerciements*

*Ce n'est pas parce que la tradition l'exige que j'ai mi cette page dans mon rapport, mais parce que les personnes auxquelles on dédie nos remerciements les méritent vraiment.*

*Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance à **Mme. F. DRIOUECH**, pour la qualité de son encadrement, l'expérience enrichissante et pleine d'intérêt qu'elle m'a fait vivre ainsi que la pédagogie dont elle a fait preuve.*

*Ma gratitude va également à mon encadrant pédagogique **Mr. Mohamed El Mehdi SAIDI**, pour ses qualités d'enseignant, son coté humaine, son soutien et ses recommandations qui m'ont été indispensables pour finaliser mon travail. Qu'il soit assuré de mes vifs remerciements*

*Mes remerciements s'adressent aussi à **Mme W. Badi** pour sa relecture notamment de la partie I.*

*Mes sincères remerciements vont à ma famille et tout particulièrement mon mari **TAOUFIQ** qui m'a continuellement soutenu et encouragé.*

*Enfin je tiens à remercier les personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire, et dont les noms ne figurent pas dans ce document. Que ces personnes me pardonnent et trouvent ici l'expression de ma grande gratitude et mon plus grand respect.*

# Sommaire

Liste des principaux acronymes.....	5
Liste des figures .....	6
Liste des tableaux.....	7
Introduction générale.....	8
Objectif de l'étude.....	10
<b>PARTIE I : ETUDE DES EXTREMES PLUVIOMETRIQUES (SECHERESSE) AU NIVEAU DE LA ZONE SOUSS-MASSA-DRAA .....</b>	<b>11</b>
Présentation de la zone d'étude :.....	12
<b>I. Localisation géographique :.....</b>	<b>12</b>
<b>II. Découpage administratif :.....</b>	<b>12</b>
<b>III. Le contexte climatique de la région : .....</b>	<b>13</b>
Bases de données utilisées pour l'étude (Partie I) :.....	14
<b>I. Données pluviométriques : .....</b>	<b>14</b>
<b>II. Séries chronologiques des modes de téléconnection :.....</b>	<b>15</b>
Chapitre 1 : Analyse des cumuls pluviométriques de la région Souss-Massa-Draa.....	16
<b>I. Evolution et tendance de la pluviométrie au niveau des trois stations :.....</b>	<b>16</b>
1. Station Agadir (AGD) :.....	16
2. Station Ouarzazate (ORZ) :.....	18
3. Station de Sidi Ifni (IFN) :.....	19
Chapitre 2 : Etude de la sécheresse météorologique au bassin versant Souss-Massa-Draa :.....	21
<b>I. Notion de la sécheresse : .....</b>	<b>21</b>
<b>II. Types de sécheresse :.....</b>	<b>21</b>
1. La sécheresse agricole :.....	21
2. La sécheresse hydrologique :.....	22
3. La sécheresse socio-économique :.....	22
4. La sécheresse météorologique : .....	23
<b>III. Les indicateurs de sécheresse :.....</b>	<b>23</b>
<b>IV. Comparaison des principaux indices de sécheresse météorologique: .....</b>	<b>24</b>
1. Pourcentage de la normale :.....	24

2.	Indice de sécheresse de Palmer :.....	25
3.	Indice d'humidité des cultures :.....	26
4.	Indice de l'approvisionnement en eau de surface :.....	26
5.	Indice de réclamation de sécheresse :.....	27
6.	Les déciles : .....	27
7.	Indice de précipitations standardisé :.....	28
<b>III.</b>	<b>Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps au niveau de Souss-Massa-Draa par SPI (Standardized Precipitation Index) :.....</b>	<b>31</b>
1.	Justifications du choix de l'indice :.....	31
2.	Analyse des évolutions observées de l'indice SPI pour les trois stations (Agadir, Ouarzazate et Sidi Ifni : 31	
	<b>Conclusion :.....</b>	<b>38</b>
<b>IV.</b>	<b>Comparaison des évolutions de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques avec celle de l'SPI : 38</b>	
1.	Comparaison des évolutions de l'indice SPI avec celles de la VCR des cumuls pluviométriques pour la saison d'hiver des trois stations :.....	38
2.	Comparaison des évolutions de l'indice SPI avec celles de la VCR des cumuls pluviométriques pour la saison du printemps des trois stations : .....	40
3.	Comparaison des évolutions de l'indice SPI avec celles de la VCR des cumuls pluviométriques pour la saison d'automne des trois stations : .....	41
4.	Comparaison des évolutions de l'indice SPI avec celles de la VCR des cumuls pluviométriques pour les trois stations à l'échelle annuelle :.....	42
5.	Analyse et discussion :.....	43
	Chapitre 3 : Corrélations des modes de téléconnection de l'Hémisphère Nord avec l'indice de précipitations standardisé (SPI) pour les trois stations au cours de la période d'étude :.....	44
<b>I.</b>	<b>Notion des modes de téléconnection et leurs influences sur le climat du Maroc : .....</b>	<b>44</b>
1.	Contexte général.....	44
2.	Modes de téléconnexion étudiés :.....	45
<b>II.</b>	<b>Corrélations de l'indice SPI avec le mode NAO (l'Oscillation Nord Atlantique) pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle. ....</b>	<b>47</b>
<b>III.</b>	<b>Corrélations de l'indice SPI avec le mode SCAND (mode Scandinavien) pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle. ....</b>	<b>48</b>
<b>IV.</b>	<b>Corrélations de l'indice SPI avec le mode TNH (mode Tropical / Hémisphère Nord) pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle. ....</b>	<b>49</b>

<b>V. Analyse de composites :</b> .....	<b>50</b>
<b>PARTIE II : IMPACTS DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE SUR LES RESSOURCES EN EAU AU BASSIN VERSANT SOUSS-MASSA.....</b>	
<b>54</b>	
Chapitre 1 : Vulnérabilité des eaux de surfaces face aux extrêmes pluviométriques (sécheresse).....	55
<b>I. Les ressources en eau de la région et problématique posée :</b> .....	<b>55</b>
1. Problématique hydrique de Souss Massa:.....	55
2. Les ressources en eau superficielle :.....	57
<b>II. Étude hydro-morphologique des bassins versants de Souss et Massa :</b> .....	<b>59</b>
1. Morphologie du bassin versant de Souss :.....	59
2. Analyse des débits et le régime hydrologique du bassin :.....	63
3. Morphologie du bassin versant de Massa : .....	65
4. Analyse des débits du bassin et le régime hydrologique:.....	68
Chapitre 2 : Dynamique des réservoirs d’eaux souterraines de la région face à la sécheresse :.....	70
<b>I. Les ressources en eau souterraines du bassin Souss-Massa-Draa:.....</b>	<b>70</b>
1. La nappe du Souss.....	70
2. Nappe des Chtouka .....	70
3. Nappe de Tiznit .....	70
4. Nappe de Sidi Ifni .....	71
5. Situation actuelle des ressources en eau souterraine :.....	71
<b>II. Les stratégies d’adaptation proposée pour la sauvegarde des ressources hydriques :</b> .....	<b>82</b>
1. La mobilisation des eaux de surface : .....	83
2. L’économie de l’eau d’irrigation : .....	83
3. La réutilisation des eaux usées traitées des grandes agglomérations :.....	83
4. Le développement et la mobilisation des ressources en eau souterraines :.....	83
Conclusion générale .....	84
Références bibliographies .....	86
Annexes .....	89

## Liste des principaux acronymes

- *ABHSM: Agence du bassin hydraulique de Souss-Massa.*
- *AGD : Agadir.*
- *AR4: 4<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC*
- *AR5: 5<sup>ème</sup> rapport d'évaluation du GIEC, 2013*
- *AWC : la teneur en eau disponible dans le sol.*
- *CC : Changement Climatique*
- *CMI: Crop Moisture Index*
- *CPC : Climate Prediction Centre*
- *DMN : Direction de la Météorologie Nationale.*
- *ET: évapotranspiration.*
- *ETP: évapotranspiration potentielle*
- *GIEC : Groupe d'Experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat.*
- *IFN : Sidi Ifni.*
- *ISSP : Indice de Sécheresse de Palmer*
- *NAO+ : Phase positive de NAO*
- *NAO- : Phase négative de NAO*
- *OMM : Organisation de la Météorologie Mondiale.*
- *ONA: l'Oscillation Nord Atlantique.*
- *ORZ : Ouarzazate.*
- *PDAIRE: Plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau.*
- *PDSI : Palmer Drought Severity Index*
- *RDI : Indice de Réclamation de Sécheresse*
- *SCAND : le mode Scandinavian.*
- *SMD: Souss-Massa-Draa.*
- *SPI : Standardised Precipitation Index*
- *SWSI: Surface Water Supply Index*
- *TNH : Tropical / Hémisphère Nord*
- *VCR : Valeur Centrée Réduite.*
-

## Liste des figures

Figure 1 : Localisation géographique de la région Souss Massa Drâa .....	12
Figure 2 : Provinces et préfectures de la région Souss-Massa-Draa (Conseil Régional Souss Massa Draa) .....	12
Figure 3: Valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques saisonniers et annuels de la station Agadir, Période 1960-2010..	17
Figure 4: Valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques saisonniers et annuels de la station Ouarzazate, Période 1960 2010 .....	19
Figure 5: Valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques saisonniers et annuels de la station Sidi Ifni, Période 1975-2010.	20
Figure 6: Relations entre les différents types de sécheresse (météorologique, agricole, hydrologique et socioéconomique). (Basé sur l'illustration du Centre national de lutte contre la sécheresse, Université du Nebraska–Lincoln, USA) .....	23
Figure 7: Evolution de l'indice SPI des trois stations pour la saison d'hiver (DJF) .....	32
Figure 8: Evolution de l'indice SPI des trois stations pour la saison d'automne (SON) .....	34
Figure 9: Evolution de l'indice SPI des trois stations pour la saison du printemps (MAM) .....	35
Figure 10: Evolution de l'indice SPI des trois stations à l'échelle annuelle.....	36
Figure 11: Evolution de l'indice SPI et de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques des trois stations pour la saison d'hiver. ....	39
Figure 12: Evolution de l'indice SPI et de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques des trois stations pour la saison du printemps. ....	40
Figure 13: Evolution de l'indice SPI et de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques des trois stations pour la saison d'automne. ....	41
Figure 14 : Evolution de l'indice SPI et des cumuls pluviométriques des trois stations à l'échelle annuelle .....	42
Figure 15: Représentation schématique des conditions météorologiques associées aux phases positive et négative de l'Oscillation Nord-Atlantique source ( <a href="http://ldeo.columbia.edu/NAO/">http://ldeo.columbia.edu/NAO/</a> ) .....	46
Figure 16: Evolutions des indices NAO et SCAND avec l'indice SPI des précipitations d'Agadir pour la saison d'hiver au cours de la période de 1960-2010 .....	51
Figure 17: Evolutions des indices de NAO et SCAND avec l'indice SPI des précipitations d'Agadir à l'échelle annuelle au cours de la période de 1960-2010 .....	51
Figure 18 : Evolutions des indices NAO et SCAND avec l'indice SPI des précipitations de Sidi Ifni pour la saison d'hiver au cours de la période 1975-2010. ....	52
Figure 19 : Evolutions des indices de NAO et SCAND avec l'indice SPI des précipitations de Sidi Ifni à l'échelle annuelle pour la période de 1975-2010.....	53
Figure 20: situation hydrique de Souss Massa Draa (ABHSM).....	56
Figure 21: Carte des bassins versants: Souss et Massa .....	59
Figure 22: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de souss à l'embouchure.....	60
Figure 23: Carte hypsométrique du bassin versant de Souss .....	61
Figure 24: Carte des pentes (en degrés) du bassin versant de Souss .....	62
Figure 25 : Débits moyens mensuels (interannuels) au niveau du bassin versant de Souss.....	63
Figure 27 : Débits moyens annuels au niveau du bassin versant de Souss .....	64
Figure 26 : Débits moyens saisonniers (interannuels) au niveau du bassin versant de Souss .....	64
Figure 28 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Massa à l'embouchure.....	65
Figure 29 : Carte des pentes (en degrés) du bassin versant de Massa .....	66
Figure 30: Carte hypsométrique du bassin versant de Massa .....	67
Figure 31: Débits moyens mensuels (interannuels) au niveau du bassin de Massa .....	68
Figure 32: Débits moyens saisonniers au niveau du bassin versant de Massa .....	69
Figure 33: Débits moyens annuels au niveau du bassin versant de Massa.....	69
Figure 34: Carte des nappes du bassin versant de Souss Massa (ABHSM) .....	71
Figure 35 : Carte de situation du réseau piézométrique de la nappe de Souss. ....	73
Figure 36 : Carte piézométrique de la nappe de Souss (2001).....	74
Figure 37 : Carte piézométrique de la nappe de Souss (2002).....	74
Figure 38 : Carte piézométrique de la nappe de Souss (2006).....	75
Figure 39 : Carte piézométrique de la nappe de Souss (2008).....	75
Figure 40: Carte piézométrique de la nappe de Souss (2010).....	76
Figure 41: Carte de situation du réseau piézométrique de la nappe Chtouka. ....	77
Figure 42: Carte piézométrique de la nappe de Chtouka (2005). ....	78
Figure 43: Carte piézométrique de la nappe de Chtouka (2006). ....	79
Figure 44: Carte piézométrique de la nappe de Chtouka (2008). ....	80
Figure 45 : Carte piézométrique de la nappe de Chtouka (2010). ....	81

## Liste des tableaux

Tableau 1: La région Souss-Massa-Draa en chiffres.....	13
Tableau 2: Stations météorologiques retenus pour l'étude (Partie I).....	14
Tableau 3: Caractéristiques statistiques des cumuls pluviométriques annuelles.....	14
Tableau 4: Valeurs de l'indice ISP (Indice de Palmer) et types de sécheresse correspondants .....	26
Tableau 5: Valeurs de l'indice RDI et types de sécheresse correspondants. ....	27
Tableau 6 : Valeurs de l'indice des déciles et types de sécheresse correspondants. ....	28
Tableau 7: Valeurs de l'indice SPI et types de sécheresse correspondants.....	29
Tableau 8: Hivers secs repérés par l'indice SP des trois stations sur la période d'étude. ....	33
Tableau 9: Fréquences des hivers modérément secs et très secs des trois stations au cours de période d'étude...33	
Tableau 10: Episodes de sécheresse détecté par l'indice SPI au niveau des trois stations au cours de la période d'étude.....	37
Tableau 11 : intensités et classement des épisodes de sécheresse détecté par SPI au niveau de la station d'Agadir .....	37
Tableau 12 : intensités et classement des épisodes de sécheresse détecté par SPI au niveau de la station d'Ouarzazate .....	37
Tableau 13 : intensités et classement des épisodes de sécheresse détecté par SPI au niveau de la station de Sidi Ifni.....	38
Tableau 14: Fréquences des classes de sécheresse pour les trois stations au cours de la période 1960- 2010.....	38
Tableau 15 : Corrélations de l'indice SPI avec le mode NAO à l'échelle saisonnière et annuelle pour les trois stations au cours de la période d'étude. ....	48
Tableau 16: Corrélations de l'indice SPI avec le mode SAND pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle au cours de période d'étude.....	49
Tableau 17: Corrélations de l'indice SPI avec le mode TNH pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle au cours de la période d'étude. ....	50
Tableau 18: Répartition des apports en eau de surface par bassin (ABHSM).....	58

## Introduction générale

La terre, depuis ses origines, a toujours connu des évolutions cycliques de climat : des périodes glaciaires alternant avec des périodes plus chaudes. La terre a donc déjà été dépourvue de calottes glaciaires (*changement-climatique.fr*). Mais le rythme de l'augmentation de la température moyenne observée semble méconnu. En outre, on constate la multiplication de catastrophes naturelles provoquées d'origine météorologique (ouragans, inondations, etc), qui est une autre manifestation du changement climatique. L'élévation du niveau de la mer en conséquence de la fonte des glaces en est une autre. Ces changements climatiques sont devenus aujourd'hui un domaine d'études et de recherches prioritaire à l'échelle internationale vu leurs impacts étendus sur les différents secteurs socio-économiques des pays.

Selon les différents rapports du GIEC (TAR, AR4, FAR, SAR, AR5), ce changement, dont le monde est aujourd'hui témoin à différentes échelles, que l'on vive au nord ou au sud, s'amplifierait dans les prochaines décennies. La planète connaîtrait une augmentation des températures, des sécheresses dans certaines zones, des précipitations intenses et des inondations dans d'autres, une recrudescence des phénomènes climatiques de grande ampleur, tels que les cyclones, une augmentation du niveau de la mer, accompagnée d'une salinisation des eaux douces et des phénomènes d'érosion accru (IPCC, 2013).

Le Maroc, de par sa situation géographique, dispose d'une diversité de types de climats avec des combinaisons diverses selon les lieux. Soumis aux influences méditerranéennes au Nord, océaniques à l'Ouest, continentales au centre, puis sahariennes à mesure que l'on descend vers le Sud et le Sud-est. Le climat du Maroc est principalement caractérisé par un été chaud et sec où les précipitations sont quasiment absentes dans la plupart des régions et l'évaporation particulièrement forte, et un hiver doux sur la bande littorale, froid à l'intérieur du pays, sur les chaînes de l'Atlas, du Rif et sur les hauts plateaux de l'Oriental.

Le Maroc qui fait partie des pays de la rive sud méditerranéenne, n'échappe pas au changement climatique (CC) global et à ses impacts (Knippertz et al. 2003 ; Driouech. 2010, Sebbar et al. 2012). Il est situé dans une région dont les données climatiques, écologiques et socio-économiques actuelles et les projections futures indiquent une forte vulnérabilité aux changements de climat. Selon les différents modèles climatiques et différentes études d'impacts, le Maroc devrait en effet s'attendre à un réchauffement et une baisse des précipitations touchant une grande partie de son territoire, avec les conséquences associées sur les secteurs économiques clés.

Différentes études antérieures ont montré que le Maroc subit des sécheresses de plus en plus récurrentes et sévères conjuguées à une demande en eau de plus en plus croissante. Cette situation a engendré en général une diminution sensible de la production agricole en zones bour, une réduction des

apports fourragers des parcours et une baisse des disponibilités en eaux superficielle et souterraine. Elle a eu également des conséquences sur l'offre d'emploi et sur les revenus des agriculteurs des zones bour. Outre ces impacts directs, l'importante baisse de l'activité du secteur agricole au cours des années sèches, entraîne en général des problèmes relativement sérieux pour les autres secteurs d'activité, en raison des liens du secteur agricole avec les autres secteurs de l'économie nationale.

A l'instar d'autres régions du Maroc, la région Souss-Massa-Draa (SMD), représentant 10% de la superficie nationale, est soumise à des conditions naturelles et climatiques généralement assez sévères. La majeure partie de son territoire étant situé dans des zones bioclimatiques difficiles. Son climat, semi aride à aride, est influencé par trois principaux facteurs : le relief, la côte océanique et le Sahara. Dans cette région, le changement climatique se fait sentir depuis des années. Il se manifeste par des sécheresses plus fréquentes et plus longues et par des précipitations de plus en plus irrégulières par rapport à des observations de longue date (Gräbener. J, 2009).

Par ailleurs, la région de Souss-Massa-Draa, connaît, depuis plusieurs décennies, un développement démographique et agricole accrue. Il y a alors une forte augmentation de la demande et de la consommation de l'eau. Cette ressource représente un défi majeur pour le développement économique de la région, qui est pourvoyeur de richesses diverses au reste du pays (Agrumes, primeurs, pêche, minerais ...etc.). Face à cette pression agricole et sociodémographique, le recours à la surexploitation de la nappe phréatique au delà des capacités de recharge est constaté. Il en résulte des chutes des niveaux piézométriques et même l'assèchement de certaines sources et des puits peu profonds. Ajouté à cela des évolutions climatiques défavorables, notamment des hausses des températures moyennes et des baisses globales de la pluviosité annuelle, la situation empire et devient critique au point de menacer le développement durable en générale et agricole en particulier.

L'occurrence de la sécheresse au niveau de Souss-Massa-Draa est devenue incontestablement un phénomène structurel qu'il s'agira d'intégrer davantage dans les programmes habituels du développement agricole et rural. Par conséquent, il faut élaborer une stratégie à moyen et long terme de lutte structurelle contre les effets de la sécheresse.

C'est pourquoi l'étude des extrêmes pluviométriques comme la sécheresse revêt, une importance, outre scientifique, socio-économique et humaine. Pour mieux cerner le phénomène de la sécheresse et son évolution spatiotemporelle. Egalement pour dégager les tendances climatiques à partir de données climatologiques et éventuellement des projections futures.

## Objectif de l'étude

Depuis plus de trente ans, le Maroc subit des déficits pluviométriques importants, se traduisant par des sécheresses sévères. Celles-ci ont particulièrement touché la partie sud du pays (région Souss-Massa-Draa) avec des conséquences dramatiques liées aux déséquilibres importants des ressources en eau.

La présente étude a pour objet d'étudier les évolutions du régime pluviométrique au niveau de la zone Souss-Massa-Draa et son impact sur l'amplification de la sécheresse météorologique. Elle s'agit de détecter les périodes sèches au cours de la période de mesure 1960-2010, en utilisant des traitements statistiques recommandés par l'Organisation météorologique mondiale (OMM) sur des relevés mensuels précipitations. Par ailleurs, on va diagnostiquer les années sèches et non sèches par l'application de l'indice pluviométrique standardisé (SPI) et on va faire une comparaison entre les tendances des cumuls pluviométriques et l'indice SPI, afin de valider l'efficacité de cet indice dans l'évaluation de la sécheresse météorologique. Enfin, on va étudier l'impact de ces périodes sèches sur les ressources hydriques de la région pour la sauvegarder.

Le schéma général de ce mémoire comprend cinq chapitres organisés selon deux grandes parties:

- La première partie sera une étude des extrêmes pluviométriques (sécheresse) au niveau de région Souss-Massa-Draa. Cette partie se subdivise en trois chapitres ; le premier chapitre sera une analyse des cumuls pluviométriques de la région Souss-Massa-Draa. Le deuxième chapitre est consacré à l'étude de la sécheresse météorologique dans le bassin versant Souss-Massa-Draa par l'indice SPI. Le dernier chapitre de cette partie sera consacré aux corrélations de l'indice SPI avec les modes de téléconnection afin d'évaluer l'influence de ces modes de circulations atmosphérique sur les extrêmes pluviométriques au Maroc.
- La deuxième partie est une évaluation de la vulnérabilité des ressources hydriques du bassin Souss-Massa-Draa face à la sécheresse météorologique. Cette partie est organisée en deux chapitres ; le premier chapitre est réservé pour l'évaluation de la vulnérabilité des eaux de surface à la sécheresse météorologique. Le deuxième chapitre est une suivie de la dynamique des réservoirs d'eaux souterraines face à la sécheresse. Enfin de cette partie seront présentés les différents plans d'actions proposés pour la sauvegarde des ressources hydriques de La région.
- la conclusion générale synthétisera les principaux résultats de cette étude.

**PARTIE I : ETUDE DES EXTREMES  
PLUVIOMETRIQUES (SECHERESSE)  
AU NIVEAU DE LA ZONE  
SOUSS-MASSA-DRAA**

## Présentation de la zone d'étude :

### I. Localisation géographique :

La région Souss-Massa-Drâa, véritable ceinture allant de l'Océan Atlantique à la frontière algérienne, divise le pays en deux parties. Cette position lui confère un rôle de relais d'où transitent tous les flux Nord-Sud et par conséquent un rôle stratégique sur les plans économique et socio culturel. La région couvre une superficie 70 880 km<sup>2</sup>, soit 10 % du territoire national, et dispose d'une côte de 320 km.

Elle est limitée :

- ✓ Au Nord, par la région de Marrakech Tensift Al Haouz
- ✓ Au Sud, par la région de Guélmim Es Semara,
- ✓ A l'Est, par la région de Mekhnès Tafilalet
- ✓ A l'Ouest, par l'Océan Atlantique.



Figure 1: Localisation géographique de la région Souss Massa Drâa

### II. Découpage administratif :

La région est composée de deux préfectures (Agadir - Ida Ouatane et Inezgane - Ait Melloul) et 7 provinces (Chtouka - Ait Baha, Taroudant, Tiznit, Ouarzazate, Zagora, Tinghir et Sidi Ifni).

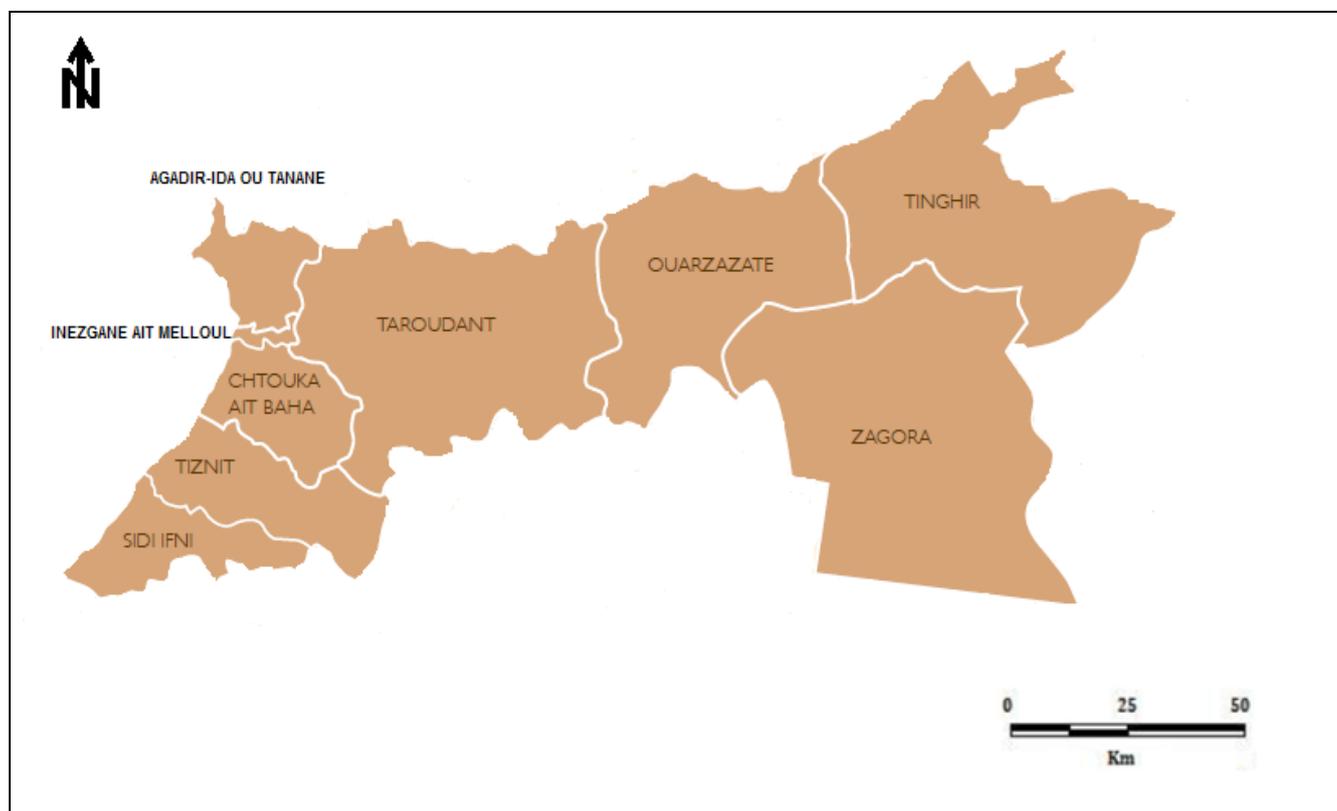


Figure 2: Provinces et préfectures de la région Souss-Massa-Drâa (Conseil Régional Souss Massa Draa).

Le tableau1 donne quelques chiffres généraux et les compare au niveau national.

Tableau 1:La région Souss-Massa-Draa en chiffres.

Population	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 3,3 millions (10% de la population nationale)</li> <li>- 60 % de ruraux</li> <li>- Plus de 50% entre 15 et 59 ans</li> </ul>
Superficie	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 72 506 km<sup>2</sup> (10% du territoire national)</li> </ul>
Produit intérieur brut (2008)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 34 milliards de dirhams – approximation. 3 milliards d’Euros</li> </ul>
Rang de la Région	<ul style="list-style-type: none"> <li>- première région exportatrice de produits agricoles au Maroc</li> <li>- 2ème région économique du Maroc</li> <li>- Fortement engagée dans le développement durable</li> </ul>
Superficie agricole utilisable	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 616.512 ha dont 185.225 ha en irrigué</li> </ul>
Production	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Arganier, cactus, palmier dattier, safran, rose, miel, henné, caroubier, câprier</li> </ul>

Sources :

- USAID, *Profil économique régional SMD, 2000*
- HCP, *Monographie Région SMD, 2006*
- Site web officiel de la région SMD

### III. Le contexte climatique de la région :

La région est soumise à un climat aride à semi aride, L'intensité de l'aridité augmente au fur et à mesure que l'on se déplace de l'ouest vers l'est. En fait Le climat est influencé par trois facteurs à savoir : le relief, la côte océanique et le Sahara. Ainsi le nord de la région dominé par l'Atlas est caractérisé par un climat humide à semi-aride en progressant vers la plaine, cette dernière qui occupe le contrebas du relief de l'Atlas ainsi que les bassins de Souss et de Massa, connaît un climat aride. Enfin, la partie sud et sud-est de la région qui compose le côté nord du Sahara est couverte par un climat désertique (Union régionale de la CGEM SOUSS MASSA DRAA)

- Précipitations moyennes : 250 mm
- Températures :
  - Moyenne : 19 °C
  - Moyenne max : 27 °C
  - Moyenne min : 11°C
- Ensoleillement : 3000 heures /an.

## Bases de données utilisées pour l'étude :

### I. Données pluviométriques :

Les données pluviométriques de base de cette étude (Partie I) sont constituées de cumuls pluviométriques mensuels provenant de trois stations météorologiques (Tableau 2) de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN). Elles sont utilisées pour le calcul de l'indice de sécheresse (SPI) et sa tendance ainsi que pour le calcul des cumuls saisonniers et annuels.

Les données des 2 stations Agadir (AGD) et Ouarzazate (ORZ) couvrent une période de 1961-2010, alors que pour la station de Sidi-Ifni (IFN) elles couvrent la période 1975-2010. Outre leur appartenance à la zone d'étude, le choix de ces stations est également effectué tenant compte du critère de la disponibilité et la continuité des séries de données qui couvrent une période chronologique importante (50 ans de mesures pour AGD et ORZ et 35 ans pour IFN). Les séries de données n'ont aucun manque et sont homogènes.

Tableau 2: Stations météorologiques retenus pour l'étude

Station	Latitude (°)	Longitude (°)	Altitude (m)	Période
Agadir (AGD)	30,383333	9,566667	23	1960-2010
Ouarzazate (ORZ)	30,933333	6,9	1136	1960-2010
Sidi Ifni (IFN)	29,366667	10,183333	50	1975-2010

Les principales caractéristiques des séries de données pluviométriques des stations étudiées sont récapitulées dans le tableau 3.

Tableau 3: Caractéristiques statistiques des cumuls pluviométriques annuelles.

Stations	Agadir (AGD)	Ouarzazate (ORZ)	Sidi Ifni (IFN)
<b>Période</b>	1960-2010	1960-2010	1975-2010
<b>Moyenne (mm)</b>	257,7	116,4	144,2
<b>Médiane (mm)</b>	224,2	114,1	140,0
<b>Minimum (mm)</b>	45,7	18,1	32,9
<b>Maximum (mm)</b>	670,0	284,4	344,0
<b>Ecart type (mm)</b>	136,2	56,3	70,3
<b>Coefficient d'asymétrie</b>	1,4	0,7	1,0
<b>Etendue (mm)</b>	624,3	266,3	311,1
<b>coefficient de variation (%)</b>	52,85	48,36	48,56

L'analyse des caractéristiques statistiques de ces séries pluviométriques montre qu'elles sont relativement dissymétriques. On note une légère différence entre les paramètres de position (moyenne, médiane) pour les deux stations Ouarzazate et Sidi Ifni. Alors que pour la station d'Agadir on remarque que ces deux paramètres sont bien différents montrant des cumuls pluviométriques généralement plus élevés. 50% des cumuls pluviométriques d'Agadir sont supérieurs à 224,2 (mm) alors que 50% des cumuls pluviométriques de Ouarzazate et Sidi-Ifni sont inférieurs respectivement à 114 et 140 mm. L'écart entre les cumuls minimum et le maximum (étendue) est globalement très important, à titre d'exemple pour la station Agadir l'écart entre le minimum et le maximum est de l'ordre de 624,3 (mm). Le coefficient de variation annuelle (rapport de l'écart-type à la moyenne) permet d'apprécier le degré de variabilité dans une série et la dispersion des valeurs par rapport à la moyenne. Ce paramètre est assez fort pour les trois stations (environ 52% pour Agadir et 48% pour les deux autres stations) et reflète bien le caractère très variable des précipitations dans le temps.

## **II. Séries chronologiques des modes de téléconnection :**

Ce sont des séries de données constituées d'archives historiques des indices mensuels de trois modes de téléconnection ; L'oscillation Nord Atlantique (NAO), le mode Scandinavien (SCAND) et le mode Tropical / Hémisphère Nord (TNH).

Ces données sont disponibles en téléchargement sur le site Web du centre CPC (Climate Prediction Centre) (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>). Les trois indices étudiés sont disponibles pour tous les mois de l'année, sans discontinuité à partir de 1950, ce qui permet de reconstituer des événements climatiques et monter l'influence de ces modes de téléconnection sur le climat du Maroc et notamment sur le régime pluviométrique en termes de sécheresse.

# Chapitre 1 : Analyse des cumuls pluviométriques de la région Souss-Massa-Draa

L'objectif de ce chapitre est d'étudier l'évolution générale du régime pluviométrique de Souss-Massa-Draa et d'analyser les éventuelles tendances sur les séries de mesures des trois stations (Agadir, Ouarzazate et Sidi Ifni). L'analyse de l'évolution de la pluviométrie s'appuie sur des calculs statistiques permettant d'apprécier les irrégularités pluviométriques de la région et identifier les périodes sèches et humides. Les résultats de cette analyse seront diagnostiqués, par la suite, par le calcul de l'indice pluviométrique standardisé (SPI), ce qui va permettre de repérer et déterminer les différentes sécheresses ayant survenues au niveau de la zone étudiée.

## I. Evolution et tendance de la pluviométrie au niveau des trois stations :

Afin d'avoir une idée plus précise sur la variabilité saisonnière et annuelle des précipitations, et pour faciliter la comparaison des variations des précipitations des trois stations, on a calculé la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques des trois stations sur la période d'étude.

La formule mathématique de la valeur centrée réduite est la suivante :

$$VCR = (P_i - P_m) / \sigma$$

Avec :

$P_i$  : Précipitation de l'année  $i$

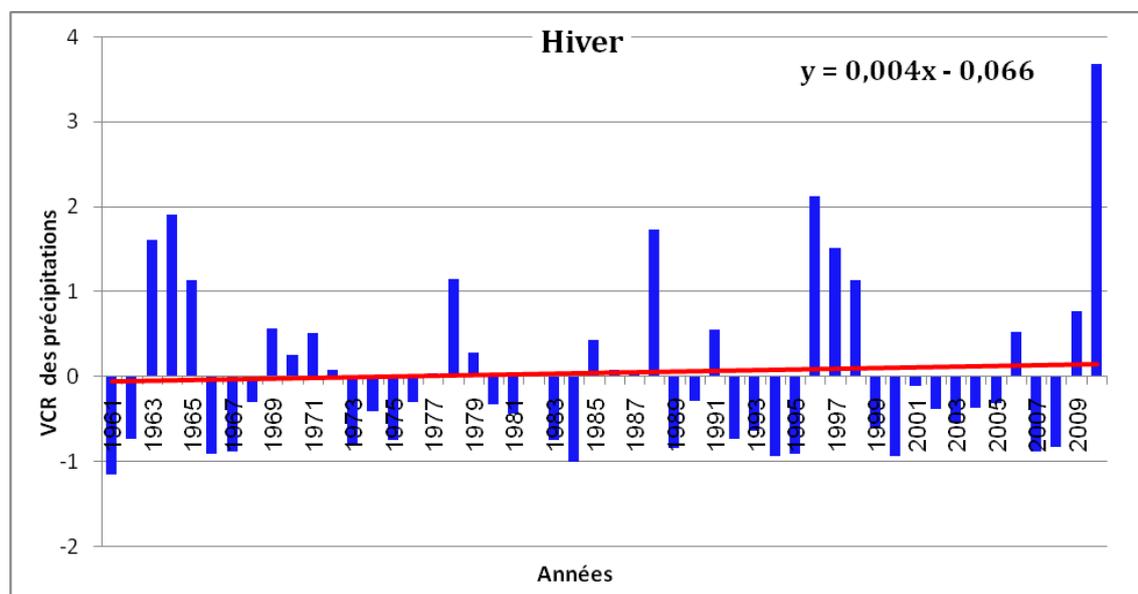
$P_m$  : Précipitation moyenne (normale)

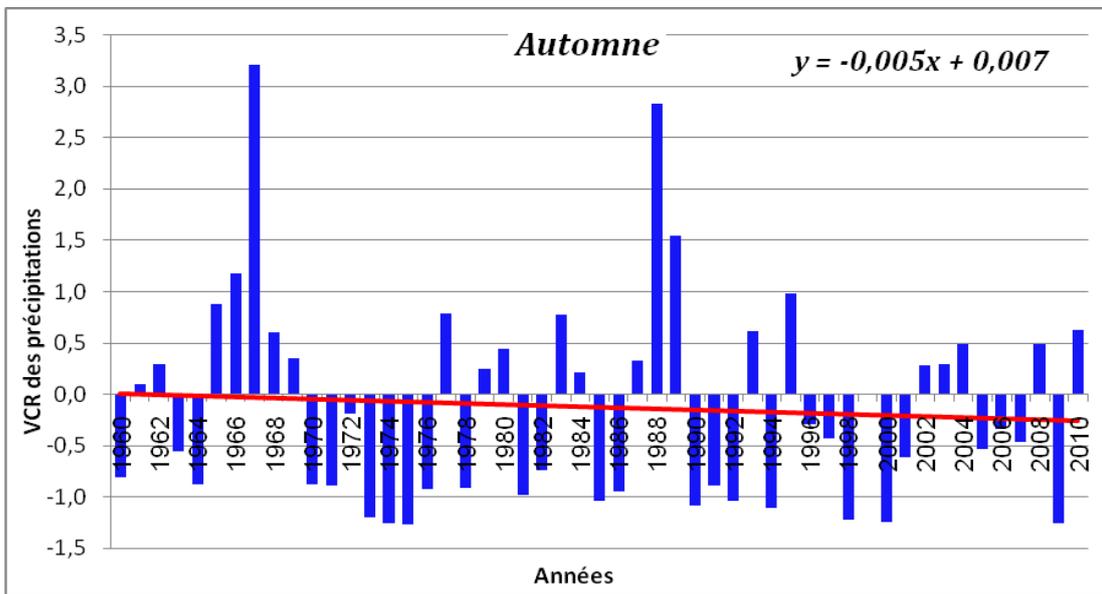
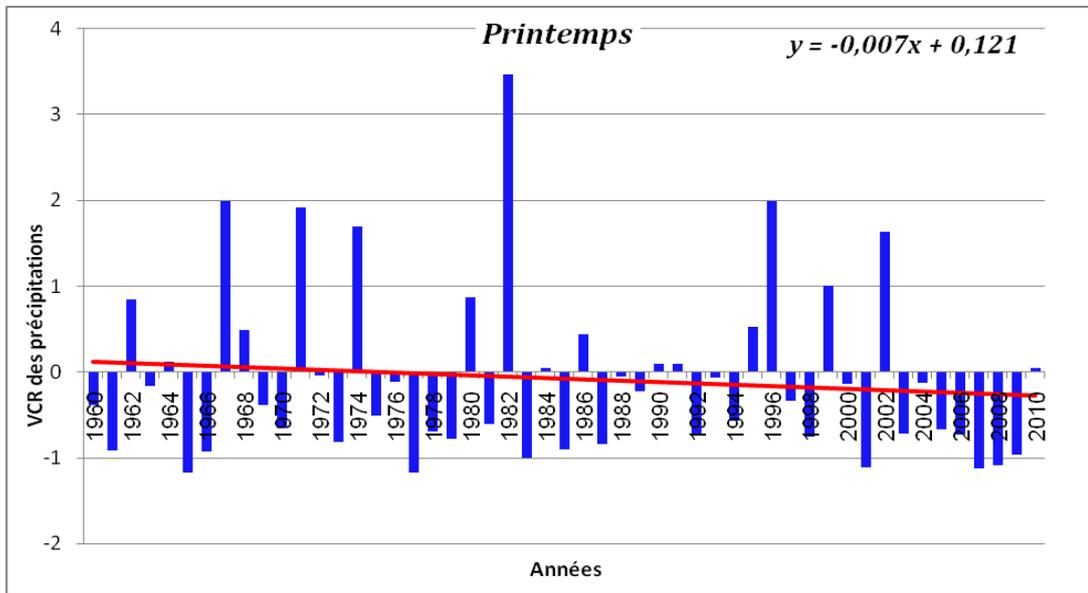
$\sigma$  : Ecart type

Le calcul de la valeur centrée réduite va nous donner une idée sur les périodes déficitaires (valeur négative, intensité dépasse -1) et les périodes excédentaires (valeur positive).

### 1. Station Agadir (AGD) :

a. Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls saisonniers :





b. Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls annuels :

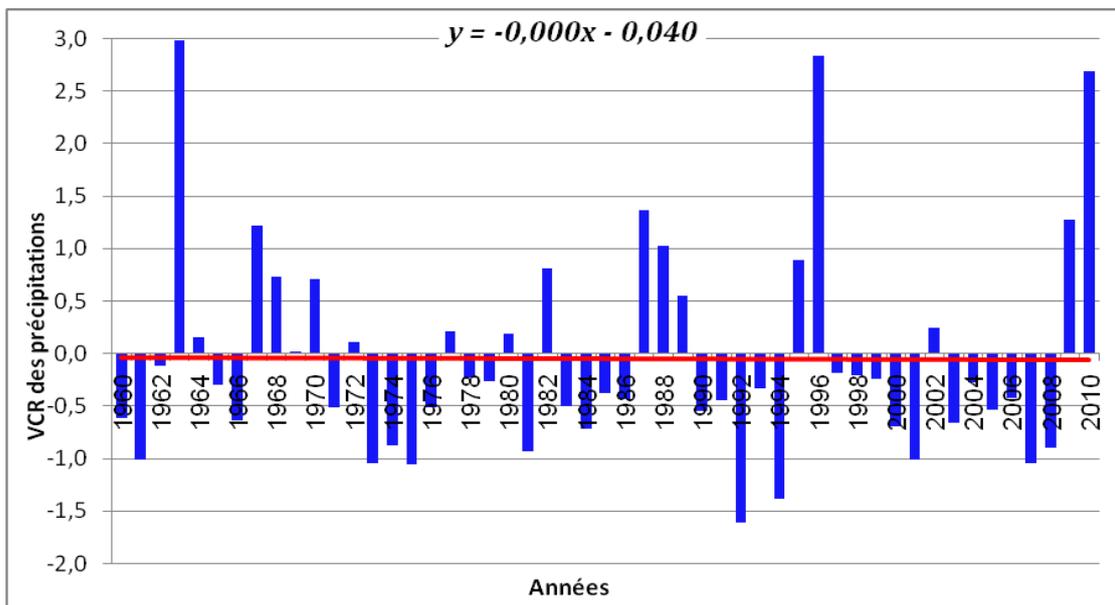
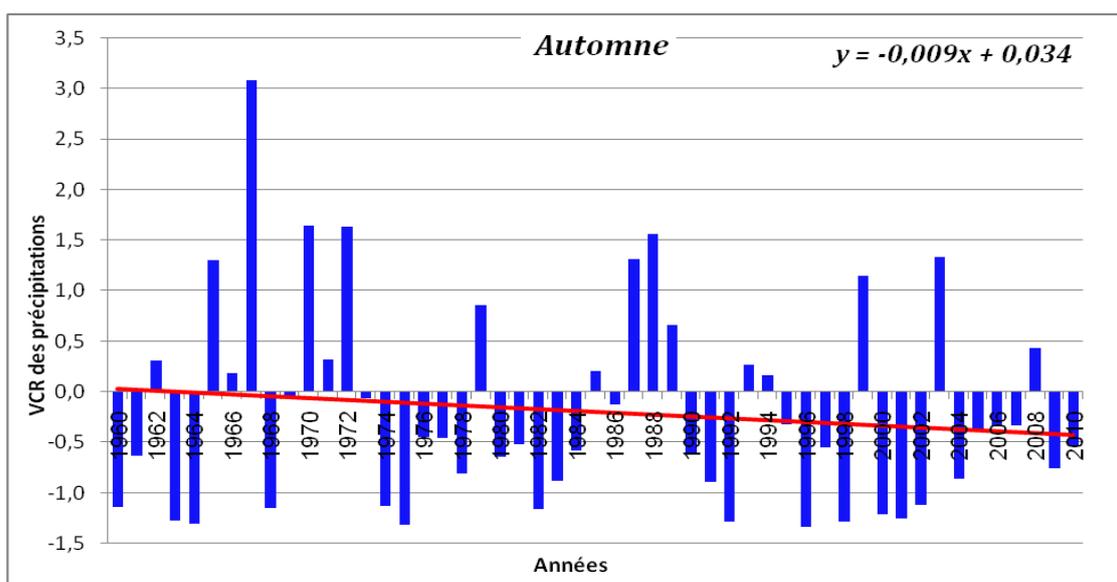
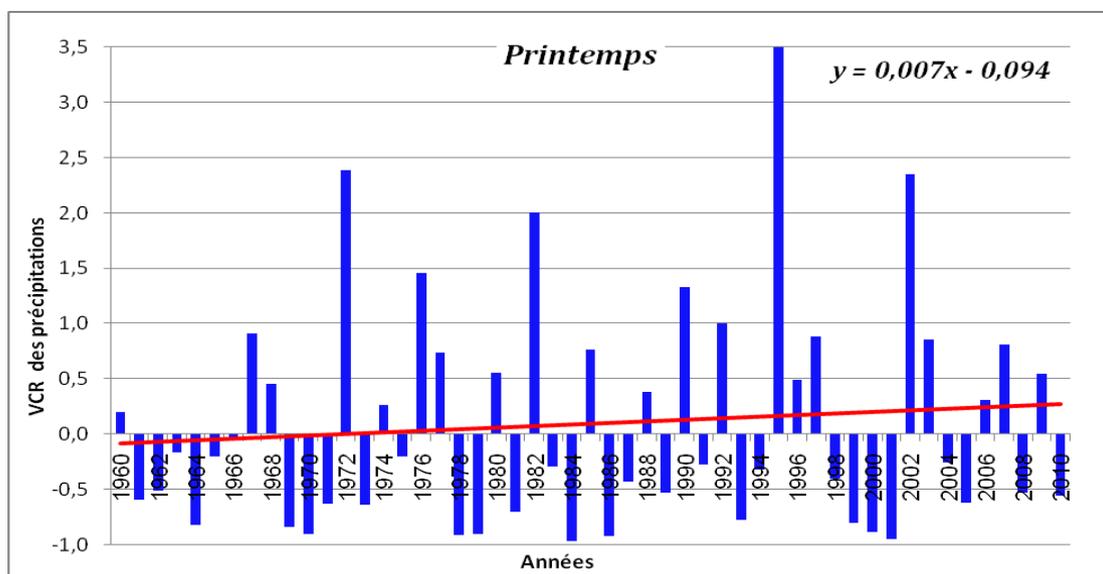
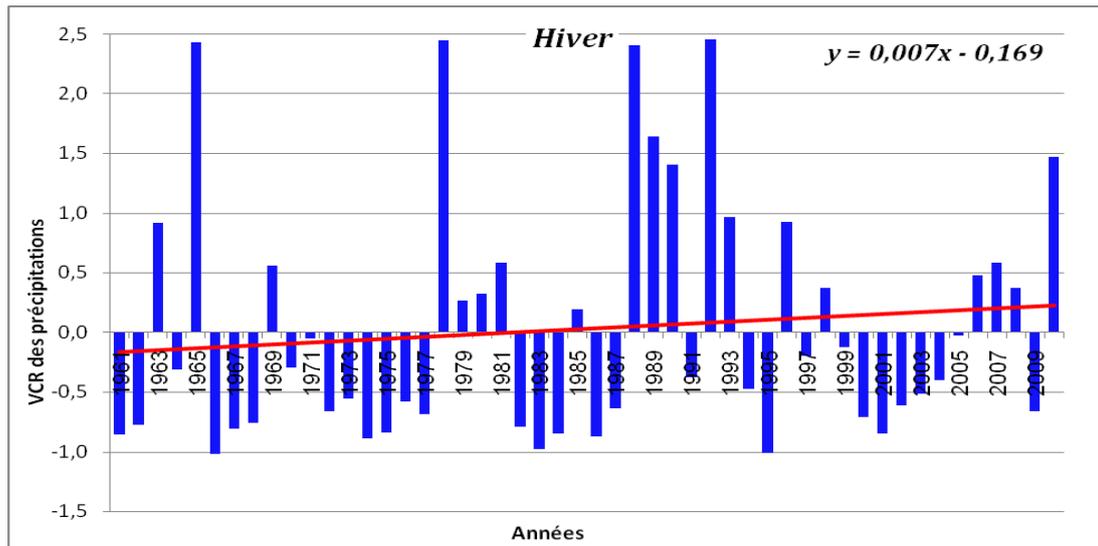


Figure 3: valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques saisonniers et annuels de la station Agadir, Période 1960-2010.

## 2. Station Ouarzazate (ORZ) :

a. Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls saisonniers :



b. Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls annuels :

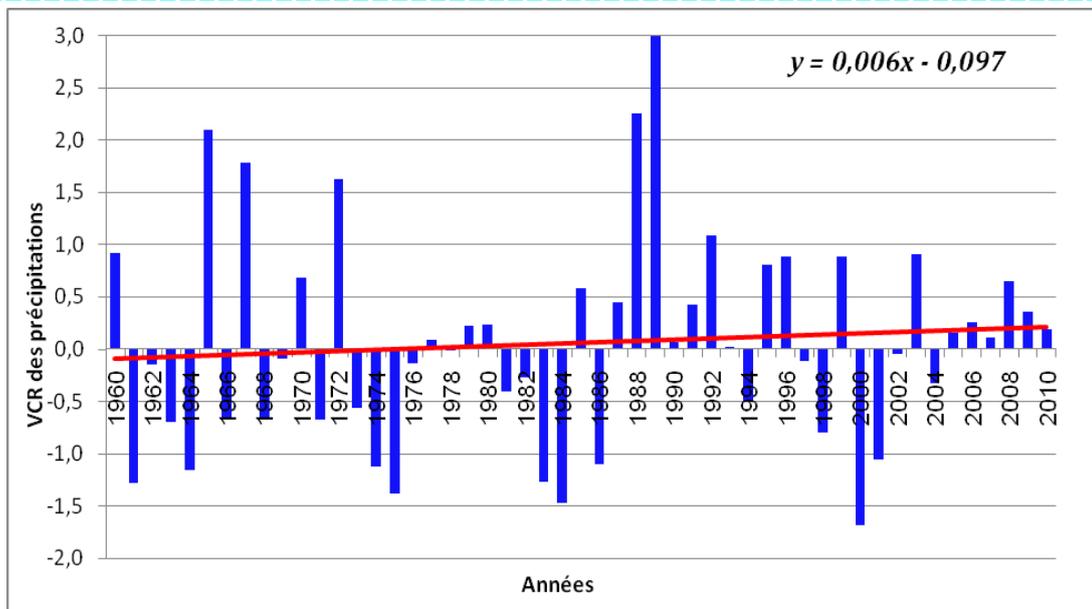
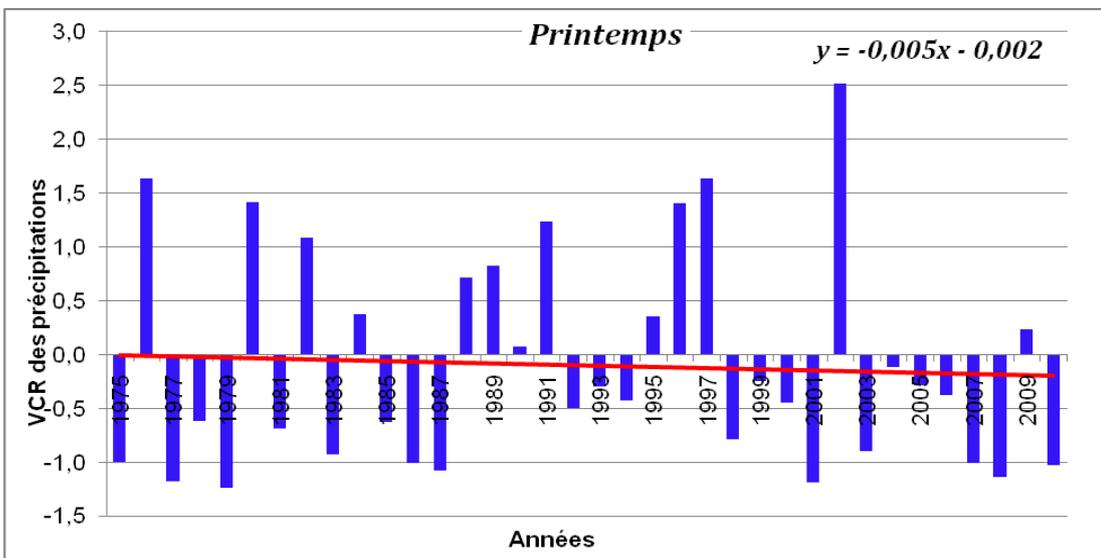
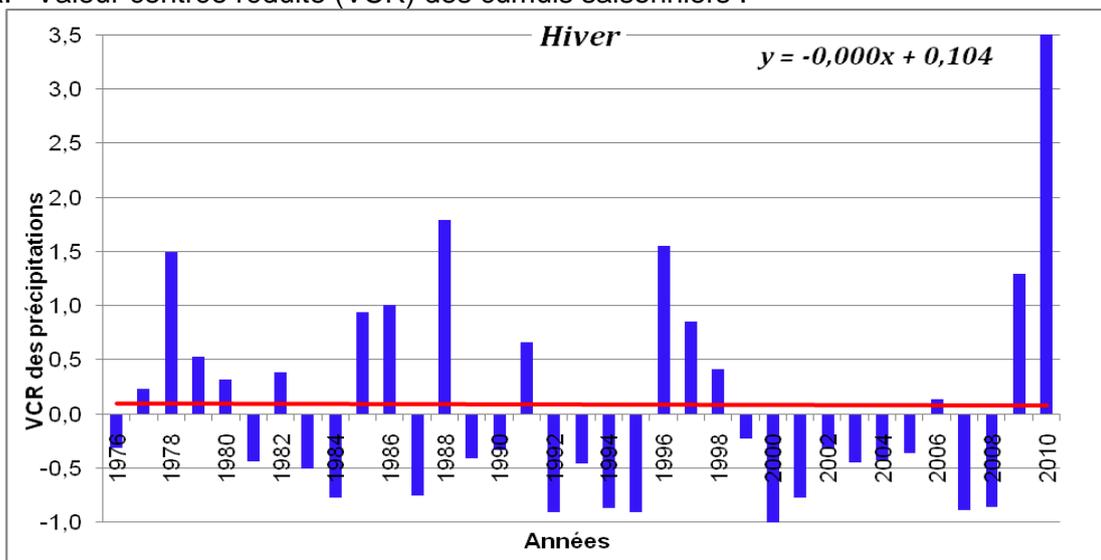
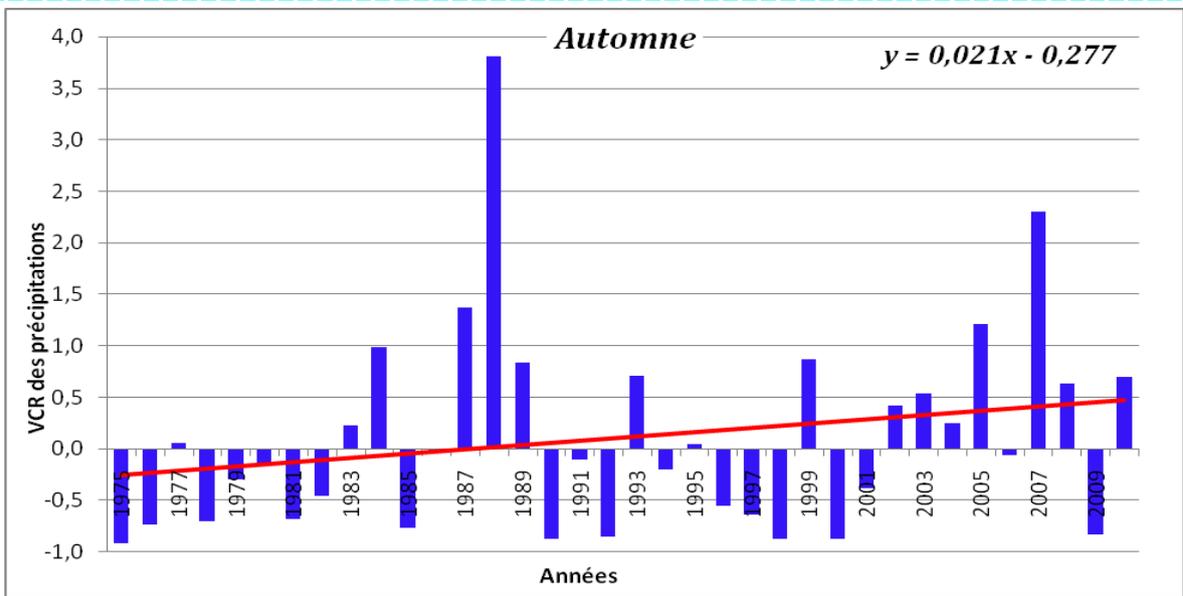


Figure 4: valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques saisonniers et annuels de la station Ouarzazate, Période 1960-2010.

### 3. Station de Sidi Ifni (IFN) :

a. Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls saisonniers :





b. Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls annuels :

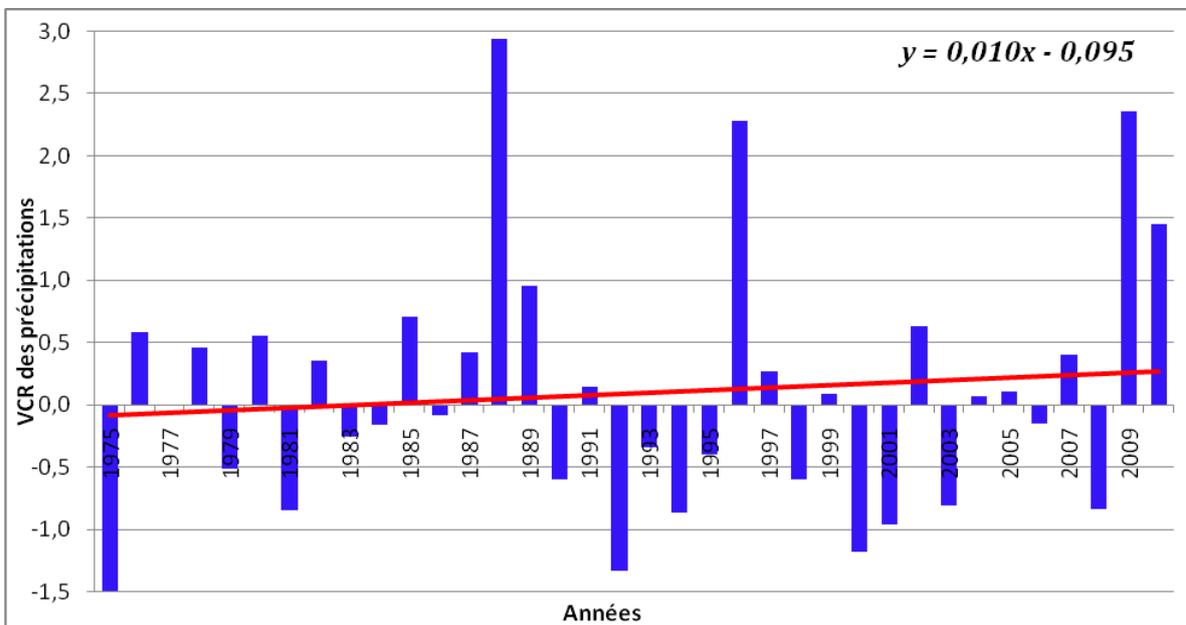


Figure 5: Valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques saisonniers et annuels de la station Sidi Ifni, Période 1975-2010.

L'analyse de fluctuations pluviométriques saisonnières (été et saison pluvieuse en annexes) et annuelles des trois stations, Agadir, Ouarzazate et Sidi Ifni indiquent une dominance des saisons et des années déficitaires s'étalant sur toute la période d'étude (1960-2010). Alors que les saisons et les années excédentaires sont moins nombreuses. Ces variations ne semblent suivre aucune loi, elles ont une distribution aléatoire dans le temps. L'intensité des déficits hivernaux est très variable pour les trois stations et dépasse rarement la valeur (-1) ; ce qui montre, selon cet indice, que les hivers secs de la région ont été modérément secs. Les déficits annuels maximaux, enregistré au niveau des trois stations, ont eu plus fréquemment des valeurs comprises entre (-1) et (-1,5), ce qui reflète un régime pluviométrique modéré à très sec de la région. Les années déficitaires sont pas les mêmes pour toutes les stations (pour Agadir le maximum de déficit est enregistré en 1992, alors que pour Ouarzazate il est enregistré en 2000).

## **Chapitre 2 : Etude de la sécheresse météorologique au bassin versant Souss-Massa-Draa :**

### **I. Notion de la sécheresse :**

La sécheresse est un risque insidieux de la nature. Il est souvent désigné comme un «phénomène rampant» et ses impacts varient d'une région à l'autre. Il est difficile à définir, parce que ce qui peut être considéré comme une sécheresse, par exemple, Bali en Indonésie (six jours sans pluie) ne serait certainement pas être considérée comme une période de sécheresse en Libye (précipitations annuelles inférieures à 180 mm). Dans le sens le plus général, la sécheresse provient d'un déficit de précipitations sur une période de temps prolongée, habituellement une saison ou plus, qui a provoqué une pénurie d'eau pour une activité, un groupe ou un secteur de l'environnement. Ses impacts résultent de l'interaction entre l'événement naturel (moins de précipitations que prévu) et la demande en eau des activités humaines. Parce que la sécheresse ne peut pas être considérée seulement comme un phénomène physique, il est généralement considéré à la fois conceptuel et opérationnel (<http://drought.unl.edu>).

La sécheresse est un phénomène qui touche les différents secteurs de l'économie nationale, entrave le développement agricole et rural et ralentit la croissance économique du pays. Sa gestion nécessite de mettre à la disposition des différents décideurs les informations nécessaires pour la suivre et la détecter au moment opportun et, par conséquent, déclencher les mesures d'atténuation et les programmes de réponses qui permettent de minimiser ses impacts agricole, économique, environnemental et social. D'où la nécessité d'élaborer et de mettre en place un système efficace d'alerte précoce à la sécheresse.

La sécheresse est une caractéristique normale et fréquente du climat. Elle touche l'ensemble des zones climatiques. Mais ses caractéristiques varient significativement d'une région à l'autre. La sécheresse ne doit pas être confondue avec l'aridité. La sécheresse se manifeste dans le temps tandis que l'aridité est un phénomène spatial (elle est limitée dans les régions à faible précipitation).

La sécheresse n'a pas une définition universelle, il y a autant de définitions de la sécheresse qu'il y a d'utilisation de l'eau. Mais, on peut dire que la sécheresse est un déficit des disponibilités en eau par rapport à une situation considérée comme normale pour une période donnée et une région déterminée (<http://drought.unl.edu/MonitoringTools.aspx>).

### **II. Types de sécheresse :**

Il existe plusieurs types de sécheresse, la sécheresse météorologique, hydrologique, agricole et socio économique ([www.drought.unl.edu/DroughtBasics/TypesofDrought.aspx](http://www.drought.unl.edu/DroughtBasics/TypesofDrought.aspx)).

#### **1. La sécheresse agricole :**

Elle fait un rapport entre les sécheresses météorologiques ou hydrologiques et les impacts sur le milieu agricole. Elles portent sur l'insuffisance des précipitations, la différence entre l'évapotranspiration réelle et potentielle, et le déficit d'eau des sols et des réserves hydriques. Ces sécheresses dépendent

grandement des conditions climatiques, des caractéristiques biologiques des cultures ainsi que des propriétés physiques et biologiques des sols. Une bonne définition de la sécheresse agricole devrait être en mesure de rendre compte de la sensibilité variable de cultures au cours des différentes étapes du développement de la culture, de la levée à la maturité. L'insuffisance de l'humidité de la couche arable peut entraver la germination, menant à des populations de plantes faibles à l'hectare et une réduction du rendement final.

## **2. La sécheresse hydrologique :**

La sécheresse hydrologique est associée à des effets de périodes de pénurie de précipitations sur les eaux superficielles et souterraines. La fréquence et la sévérité de la sécheresse hydrologique sont souvent définies sur une échelle du bassin versant. Bien que toutes les sécheresses proviennent d'une carence de précipitations, les hydrologues sont plus préoccupés par la façon dont cette carence joue dans le système hydrologique. Les sécheresses hydrologiques sont généralement en phase avec l'apparition de sécheresses météorologiques et agricoles. Il faut plus de temps pour les insuffisances de précipitations à se manifester dans les composants du système hydrologique telles que les niveaux d'humidité du sol, l'écoulement fluvial et souterrain et les réservoirs. En conséquence, ces impacts sont en opposition de phase avec des effets dans d'autres secteurs économiques. Par exemple, un déficit de précipitations peut entraîner un épuisement rapide de l'humidité du sol qui est presque immédiatement perceptible pour les agriculteurs, mais l'impact de cette carence sur le niveau des réservoirs ne peut pas affecter la production d'énergie hydroélectrique pendant de nombreux mois. En outre, l'eau dans les systèmes de stockage hydrologiques (les réservoirs, rivières) est souvent utilisée pour de multiples et concurrentes fins (par exemple, le contrôle des inondations, l'irrigation, les loisirs, la navigation, l'hydroélectricité, l'habitat de la faune), ce qui complique encore la séquence et la quantification des impacts. La concurrence pour l'eau dans ces systèmes de stockage dégénère en période de sécheresse et les conflits entre usagers de l'eau augmentent de manière significative.

## **3. La sécheresse socio-économique :**

Elle associe l'offre et la demande d'un bien économique avec des éléments de la sécheresse météorologique, hydrologique et agricole. Elle se distingue des types de sécheresse susmentionnés parce que sa présence dépend des procédés de temps et d'espace de l'offre et de la demande pour identifier ou classer les sécheresses. La fourniture de nombreux biens économiques, tels que l'eau, le fourrage, céréales, poissons, et l'énergie hydroélectrique, dépend de la météo. En raison de la variabilité naturelle du climat, l'approvisionnement en eau est suffisant dans quelques années, mais incapable de satisfaire les besoins humains et environnementaux dans d'autres années. La sécheresse socio-économique se produit lorsque la demande pour un bien économique est supérieure à l'offre en raison d'un manque à gagner lié à la météo dans l'approvisionnement en eau. Par exemple, en Uruguay, en 1988-1989, la sécheresse a réduit considérablement la production d'énergie hydroélectrique, car les centrales étaient dépendantes du débit plutôt que du stockage pour la production d'électricité.

#### 4. La sécheresse météorologique :

La définition de la sécheresse météorologique est basée sur le degré d'aridité d'une période sèche par rapport à la normale (médiane ou moyenne) et sur la durée de cette période sèche. Ces définitions doivent être considérées spécifiques à une région ; puisque les conditions météorologiques normales changent grandement d'une région à l'autre. Par exemple, certaines définitions de la sécheresse météorologique identifient les périodes de sécheresse, sur la base du nombre de jours de précipitations inférieur à un certain seuil spécifié. Cette mesure est seulement appropriée pour les régions caractérisées par un régime de précipitations toute l'année, comme une forêt tropicale humide, le climat subtropical ou le climat humide aux latitudes moyennes. Également pour d'autres régimes climatiques caractérisés par une pluviométrie saisonnière, comme le centre des États-Unis, le nord-est du Brésil, l'Afrique de l'Ouest et le nord de l'Australie. Les longues périodes sans précipitations sont fréquentes à Omaha, Nebraska (États-Unis); Fortaleza (Brésil), et Darwin, Territoire du Nord-Ouest (Australie). D'autres définitions peuvent concerner des départs de précipitations réelles que les montants moyens des échelles mensuelles, saisonnières ou annuelles temps. (Wilhite, DA; et MH Glantz. 1985)

Vue les relations qui existent entre les différents types de sécheresse, dans la présente étude on est intéressé à étudier la sécheresse météorologique du faite que ce type de sécheresse est le déclencheur des autres types.

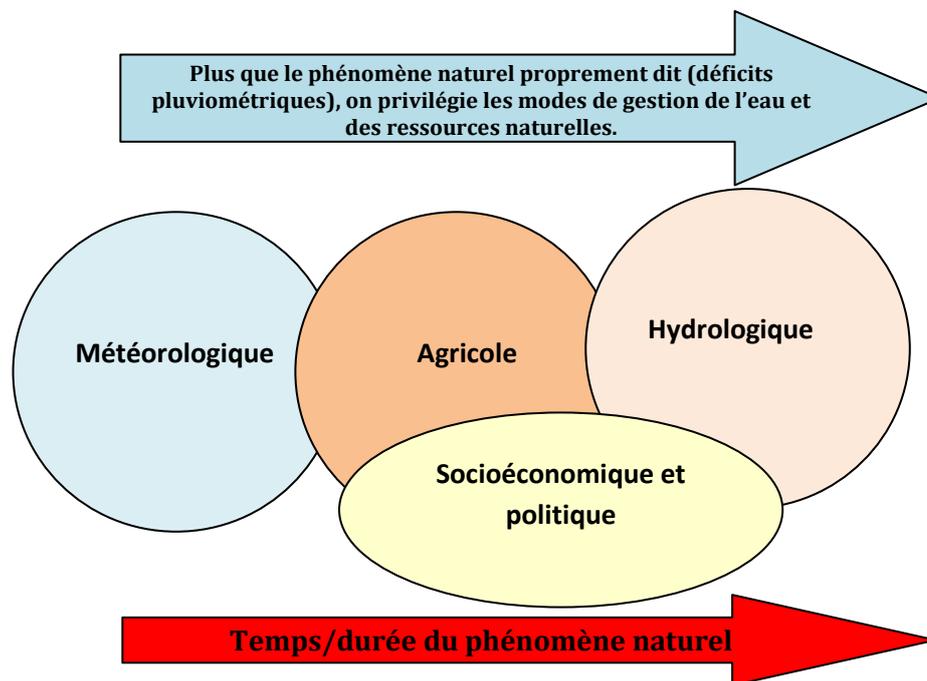


Figure 6: Relations entre les différents types de sécheresse (météorologique, agricole, hydrologique et socioéconomique). (Basé sur l'illustration du Centre national de lutte contre la sécheresse, Université du Nebraska-Lincoln, USA)

#### III. Les indicateurs de sécheresse :

La difficulté de définir la sécheresse pousse les chercheurs à définir des indicateurs de ce phénomène. Ces indicateurs permettent de déterminer d'une façon scientifique le seuil indiquant la sécheresse à différentes échelles de temps et de définir des classes d'appartenance à cet événement en fonction de sa sévérité et de sa position. Ils assurent également le suivi de la sécheresse et la détection à différents

stades de son évolution. Ces indices constituent également un bon moyen de communication avec le public et un outil de décision pour le gouvernement.

#### **IV. Comparaison des principaux indices de sécheresse météorologique:**

Les indices de sécheresse incorporent des milliers de données sur les précipitations, le manteau neigeux, les débits, et d'autres indicateurs de l'offre de l'eau dans une grande image compréhensible. Une valeur de l'indice de sécheresse est habituellement un numéro unique, bien plus utile que les données brutes pour la prise de décision.

Il y a plusieurs indices qui mesurent la quantité de précipitation pour une période de temps donnée qui a dévié de normes historiquement établies. Bien qu'aucun des principaux indices ne sont intrinsèquement supérieur aux autres en toutes circonstances, certains indices sont mieux adaptés que d'autres pour certaines utilisations. Par exemple, l'indice de sécheresse de Palmer a été largement utilisé par le ministère de l'Agriculture des États-Unis pour déterminer l'accord d'une aide d'urgence de sécheresse, mais le Palmer est mieux quand on travaille avec de grandes zones à topographie uniforme. Les Etats occidentaux, avec un terrain montagneux et les microclimats régionaux complexes, jugent utile de compléter les valeurs de Palmer avec d'autres indices tels que SWSI (Indice d'approvisionnement des eaux de surface), qui prend en considération le manteau neigeux et d'autres conditions particulières.

##### **1. Pourcentage de la normale :**

Le pourcentage de la normale est un calcul simple et bien adapté aux besoins des présentateurs de météo de la télévision et le grand public. Il est l'une des mesures les plus simples de précipitation pour un emplacement. Les analyses fondées sur le pourcentage de la normale sont très efficaces lorsqu'ils sont utilisés pour une seule région ou une seule saison. Cet indice est facilement mal compris et donne des indications différentes des conditions, selon le lieu et la saison. Il est calculé en divisant la précipitation réelle par précipitation normale, généralement considéré comme un moyen de 30 ans et en multipliant par 100%. Ceci peut être calculé pour une variété d'échelles de temps. Habituellement, ces échelles de temps allant d'un mois à un groupe de mois représentant une saison particulière. Les précipitations normales pour un emplacement spécifique sont considérées comme 100% (Willeke et al, 1994).

- Avantages : très efficace pour comparer les précipitations d'une seule région ou de la saison
- Inconvénients : l'un des inconvénients de l'utilisation du pourcentage des précipitations normales est que la moyenne de la précipitation n'est souvent pas la même que la précipitation médiane, qui est une valeur dépassée par 50% des occurrences de précipitation dans un enregistrement climatique à long terme. La raison de ceci est que la précipitation de l'échelle mensuelle ou saisonnière ne possède pas une distribution normale. L'utilisation de la comparaison des pourcentages de la normale implique une distribution normale où la moyenne et le médiane sont considérés comme étant les mêmes.

## 2. Indice de sécheresse de Palmer :

Le Palmer est un algorithme de l'humidité du sol calibré pour les régions relativement homogènes. En 1965, WC Palmer a développé un indice pour mesurer le départ de l'apport d'humidité (Palmer, 1965). Palmer a fondé son indice sur le concept de l'offre et de la demande de l'équation d'équilibre de l'eau, en tenant compte plus que le déficit de précipitations à des endroits précis. L'objectif de l'indice de sécheresse de Palmer (ISP) était de fournir des mesures des conditions d'humidité qui ont été normalisés de sorte que les comparaisons à l'aide de l'indice pourraient être faites entre les sites et entre les mois (Palmer 1965).

L'ISP est un indice de sécheresse météorologique. Il répond aux conditions météorologiques qui ont été anormalement sec ou humide. Lorsque les conditions changent de sec à la normale ou humide, par exemple, la sécheresse mesurée par l'ISP se termine sans prendre en compte les débits, des lacs et des réservoirs et autres impacts hydrologiques à long terme (Karl 1985). L'ISP est calculé en fonction des précipitations et de la température, ainsi que la teneur en eau disponible (AWC) dans le sol.

- Avantages: le premier indice de sécheresse globale développée aux États-Unis. Avec des Moindres valeurs Palmer peut tirer de sécheresses émergentes de plusieurs mois.

Il ya des limites considérables lors de l'utilisation de l'indice Palmer. Les inconvénients de l'indice Palmer comprennent :

- L'indice de Palmer est sensible à la AWC d'un type de sol. Ainsi, l'application de l'indice pour une division climatique peut être trop générale.
- Les deux couches de sol dans les calculs du bilan hydrique sont simplifiées et peuvent ne pas être exactement représentatif d'un emplacement.
- Les chutes de neige, la couverture de neige et des sols gelés ne sont pas inclus dans l'indice. Toutes les précipitations sont traitées sous forme de pluie, de sorte que le calendrier des valeurs de précipitation peut être inexact dans l'hiver et au printemps dans les régions où la neige se produit.
- Le décalage naturel entre le moment où les précipitations tombent et les eaux de ruissellement résultant n'est pas considéré. En outre, pas de ruissellement est autorisé à prendre place dans le modèle jusqu'à ce que la capacité en eau des couches superficielles et le sous-sol soit plein, ce qui conduit à une sous-estimation de ruissellement.

L'indice Palmer varie à peu près entre -6,0 et +6,0. Palmer arbitrairement choisi l'échelle de classification des conditions d'humidité sur la base de ses zones d'étude originaux dans le centre de l'Iowa et l'ouest du Kansas (Palmer, 1965).

Tableau 4: Valeurs de l'indice ISP (Indice de Palmer) et types de sécheresse correspondants

4,0 ou plus	extrêmement humide
3,0 à 3,99	très humide
2,0 à 2,99	modérément humide
1,0 à 1,99	légèrement humide
de 0,5 à 0,99	humide naissante
0,49 à -0,49	près de la normale
-0,5 À -0,99	sécheresse naissante
-1,0 À -1,99	la sécheresse légère
-2,0 À -2,99	sécheresse modérée
-3,0 À -3,99	grave sécheresse
-4,0 Ou moins	sécheresse extrême

### 3. Indice d'humidité des cultures :

L'indice des cultures d'humidité (CMI) utilise une approche météorologique pour surveiller les conditions de culture de semaine en semaine. Il a été développé par Palmer (1968) de procédures dans le calcul de l'ISSP. Considérant que l'ISSP contrôle des périodes météorologiques humides et sèches à long terme, la CMI a été conçu pour évaluer les conditions d'humidité à court terme dans les grandes régions de cultures productrices. Il est basé sur la température moyenne et les précipitations totales pour chaque semaine dans une division climatique, ainsi que la valeur CMI de la semaine précédente. Le CMI répond rapidement aux conditions changeantes. Il est pondéré selon le lieu et l'heure ainsi que les cartes, qui affichent généralement la CMI hebdomadaire à travers les États-Unis, peuvent être utilisés pour comparer les conditions d'humidité à différents endroits. Parce qu'il est conçu pour surveiller les conditions d'humidité à court terme affectant un développement des cultures, la CMI n'est pas un bon outil à long terme de suivi de la sécheresse.

### 4. Indice de l'approvisionnement en eau de surface :

L'indice d'approvisionnement en eau de Surface (SWSI) a été développé par Shafer et Dezman (1982) pour compléter l'indice Palmer des conditions d'humidité dans l'État du Colorado. L'indice Palmer est essentiellement un algorithme d'humidité du sol calibré pour les régions relativement homogènes, mais il n'est pas conçu pour les grandes variations topographiques dans une région et il ne tient pas compte de l'accumulation de neige et l'écoulement ultérieur. L'objectif de la SWSI était d'intégrer les caractéristiques hydrologiques et climatologiques en une valeur d'indice unique ressemblant à l'indice Palmer pour chaque grand bassin de la rivière dans l'état du Colorado (Shafer et Dezman 1982). Ces valeurs seraient normalisées pour permettre des comparaisons entre les bassins.

Plusieurs caractéristiques de la SWSI limitent son application. Leur calcul est unique pour chaque bassin et pour chaque région, il est difficile de comparer les valeurs SWSI entre les bassins ou régions (Doesken et al. 1991).

## 5. Indice de réclamation de sécheresse :

L'indice de sécheresse de remise en état (RDI) a récemment été développé comme un outil pour définir la sévérité de la sécheresse ainsi que sa durée, et pour prévoir l'apparition et la fin des périodes de sécheresse. L'impulsion de concevoir la RDI est venue de la Loi sur l'assèchement Unis sécheresse aide de 1988, qui permettent aux États de demander l'aide du Bureau de réclamation pour atténuer les effets de la sécheresse.

Comme le SWSI, le RDI est calculée au niveau du bassin hydrographique. Il intègre les composants d'alimentation des précipitations, le manteau neigeux, les débits et les niveaux des réservoirs. Le RDI diffère de la SWSI en ce qu'il crée une composante de la demande en fonction de la température. Le RDI est adaptable à chaque région et sa principale force est sa capacité à tenir compte de facteurs à la fois climatiques et l'approvisionnement en eau.

Oklahoma a développé sa propre version de la RDI et prévoit d'utiliser l'index comme un outil dans le système de surveillance désigné dans le plan de la sécheresse de l'Etat. Les valeurs de RDI et des appellations de gravité sont similaires à la SPI, ISP, et SWSI.

Tableau 5: Valeurs de l'indice RDI et types de sécheresse correspondants.

Classifications RDI	
4,0 ou plus	extrêmement humide
1,5 à 4,0	modérément humide
1 à 1,5	normale à l'humidité légère
0 à -1,5	normale à la sécheresse légère
-1,5 À -4,0	sécheresse modérée
-4,0 ou moins	sécheresse extrême

- Avantages : il inclue la composante de température, et représente également l'évaporation.
- Inconvénients : comme l'indice est unique pour chaque bassin hydrographique, les comparaisons entre bassins sont limitées.

## 6. Les déciles :

Organiser les données mensuelles de précipitations en déciles est une autre technique sécheresse surveillance. Il a été développé par Gibbs et Maher (1967) afin d'éviter certaines des faiblesses dans le «pour cent de la normale" approche. La technique, ils ont développé divisé la distribution des occurrences sur un record de précipitations à long terme en dixièmes de la distribution. Ils ont appelé chacune de ces catégories un décile. Le premier décile est la quantité de pluie qui ne dépasse par le bas de 10% des occurrences de précipitations. Le deuxième décile est la quantité de précipitations ne dépasse pas par le bas de 20% des occurrences. Ces déciles continuent jusqu'à ce que la quantité de pluie identifiée par le dixième décile soit la plus grande quantité de précipitations dans l'enregistrement à long terme. Par définition, le cinquième décile est la médiane, qui est la quantité de précipitations ne dépassent pas 50% des occurrences sur la période d'enregistrement.

La méthode de décile a été choisie comme mesure météorologique de la sécheresse dans la sécheresse australienne système de veille, car il est relativement simple à calculer et nécessite moins de données et moins d'hypothèses que l'indice de sécheresse de Palmer (Smith et al. 1993). Dans ce système, les agriculteurs et les éleveurs ne peuvent demander l'aide du gouvernement si la sécheresse se révèle être un événement qui se produit une seule fois dans 20-25 ans (déciles 1 et 2 sur un record de 100 ans) et à duré plus de 12 mois. Cette uniformité dans les classifications de la sécheresse, contrairement à un système basé sur le pour cent des précipitations normales, a aidé les autorités australiennes dans la détermination des réponses appropriées à la sécheresse.

- Avantages: fournit une mesure statistique précise des précipitations.
- Inconvénients: calculs précis exigent un long enregistrement de données climatiques.

Tableau 6 : Valeurs de l'indice des déciles et types de sécheresse correspondants.

Classifications des déciles	
déciles 1-2 moins 20%	très inférieur à la normale
déciles 3-4: prochaine tranche inférieure de 20%	inférieur à la normale
déciles 5-6: milieu de 20%	près de la normale
déciles 7-8: prochaine les 20%	dessus de la normale
déciles 9-10 plus de 20%	très supérieure à la normale

## 7. Indice de précipitations standardisé :

Le SPI est un indice basé sur la probabilité de précipitations pour une échelle de temps. La probabilité des précipitations observées est transformée en un indice qui sert aussi bien à l'expérimentation qu'à l'exploitation dans plus de 70 pays. C'est un indice à la fois puissant, souple d'utilisation et simple à calculer. Les données sur les précipitations constituent en fait le seul paramètre requis. En outre, l'indice

SPI se révèle tout aussi efficace pour analyser les périodes ou cycles humides que les périodes ou cycles secs.

Pour calculer l'indice SPI, il faut disposer idéalement de relevés mensuels s'étalant sur au moins 20 à 30 ans, mais de préférence sur 50 à 60 ans, voir plus, ce qui constitue la période optimale (Guttman, 1994). Il est possible d'exécuter le programme si de telles séries présentent des données manquantes, mais le degré de confiance à accorder aux résultats s'en trouve alors affecté en fonction de la distribution des données manquantes par rapport à la durée de la période de relevés.

L'indice SPI peut être calculé pour de nombreuses échelles de temps, ce qui est un réel avantage, qui permet de l'appliquer à bon nombre des différents types de sécheresses dont il vient d'être question. La possibilité de calculer l'indice SPI sur des échelles de temps multiples offre une souplesse temporelle dans l'évaluation des conditions de précipitations par rapport à l'approvisionnement en eau.

Comme cela a déjà été précisé, l'indice SPI a été conçu pour quantifier le déficit de précipitations à de multiples échelles de temps, soit un calcul de moyenne sur une fenêtre glissante. Ces échelles de temps traduisent les incidences de la sécheresse sur les différents types de ressources en eau et répondent aux besoins de différents décideurs. Les conditions météorologiques et l'humidité du sol (agriculture) réagissent relativement vite aux anomalies de précipitations, à une échelle temporelle de 1 à 6 mois par exemple, tandis que les eaux souterraines, le débit des cours d'eau et les volumes stockés dans les réservoirs sont sensibles aux anomalies de précipitations à plus long terme, c'est-à-dire à des échelles de temps de l'ordre de 6 à 24 mois voire plus. La période sur laquelle porte l'indice SPI variera donc en fonction du type de sécheresse faisant l'objet des analyses et applications envisagées: on prendra par exemple l'indice SPI sur 1 à 2 mois pour une sécheresse météorologique, sur 1 à 6 mois pour une sécheresse agricole et sur 6 à 24 mois, voir plus, pour une sécheresse hydrologique.

McKee et al. (1993) ont utilisé le système de classification présenté dans le tableau des valeurs de l'indice SPI figurant ci-après (tableau 7) pour définir l'intensité des épisodes de sécheresse en fonction de la valeur de l'indice. Ils ont aussi défini les critères d'un épisode de sécheresse pour différentes échelles de temps. Une sécheresse sévit quand l'indice présente de façon continue une valeur négative de -1,0 ou moins et se termine lorsque l'indice devient positif. Par conséquent, on distingue pour chaque épisode de sécheresse une durée, avec un commencement et une fin, et une intensité pour chaque mois durant lequel l'épisode se poursuit. Pour obtenir ce que l'on peut appeler la «magnitude» de la sécheresse, il suffit d'ajouter toutes les valeurs de l'indice pour l'ensemble des mois sur lesquels porte l'épisode.

Tableau 7: Valeurs de l'indice SPI et types de sécheresse correspondants

2,0 et plus	Extremement humide
de 1,5 à 1,99	Très humide
de 1,0 à 1,49	Modérément humide
de -0,99 à 0,99	Proche de la normale
de -1,0 à -1,49	Modérément sec
de -1,5 à -1,99	Très sec
-2 et moins	Extremement sec

- SPI a cependant quelques Inconvénients dont:
  - ✓ Il ne permet de quantifier que le déficit de précipitations; les valeurs basées sur des données préliminaires peuvent changer et les valeurs varient si la durée de la période des relevés s'allonge.
  - ✓ L'indice SPI ne repose que sur les relevés de précipitations (qui est en même temps un avantage si on regarde l'aspect disponibilité d'autres types de données).
  - ✓ Le bilan hydrique du sol n'étant pas pris en compte, l'indice ne permet pas le calcul du rapport évapotranspiration/évapotranspiration potentielle (ET/ETP).

## **a. Valeurs de SPI pour une période plus ou moins longue :**

### **➤ Indice SPI sur 3 mois :**

L'indice SPI sur 3 mois fournit une indication sur les conditions d'humidité à courte et moyenne échéances et une estimation des précipitations sur une saison. Dans les régions essentiellement agricoles, l'indice SPI sur 3 mois peut se révéler plus performant que l'indice Palmer à réponse lente ou que d'autres indices hydrologiques actuels pour mettre en évidence la nature des conditions d'humidité en cours. Il importe de comparer l'indice SPI sur 3 mois à des laps de temps plus longs. Il est possible que des conditions relativement normales voire humides se produisent durant trois mois au milieu d'une sécheresse s'étalant sur une durée plus longue, ce qu'on ne pourrait mettre en évidence qu'en examinant une période relativement longue. En analysant des laps de temps relativement longs, on évite de confondre la présence temporaire d'une période humide avec la fin d'une sécheresse (OMM-N° 1090).

### **➤ Indice SPI sur 6 mois :**

L'indice SPI sur 6 mois établit la comparaison entre les précipitations sur la période de six mois examinée et les totaux des précipitations pour cette même période de six mois de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. À titre d'exemple, un indice SPI sur 6 mois se terminant fin septembre permet de comparer le cumul des précipitations d'avril à septembre de l'année examinée aux cumuls de précipitations de cette même période pour toutes les années écoulées.

L'indice SPI sur 6 mois fournit une indication sur les tendances des précipitations sur une saison et jusqu'à moyenne échéance. On considère que pour cette échelle de temps, il présente encore davantage de sensibilité aux conditions que l'indice Palmer. Un indice SPI sur 6 mois peut se révéler très performant pour mettre en évidence les précipitations sur des saisons bien précises. À titre d'exemple, un indice SPI sur 6 mois se terminant fin mars fournirait une très bonne indication des quantités de précipitations observées au cours de la saison humide allant d'octobre à mars, qui revêt une grande importance pour certaines zones méditerranéennes. À partir de 6 mois, on peut aussi commencer à associer l'information que fournit un indice SPI avec les anomalies du débit des cours d'eau et des niveaux des réservoirs, selon la région et la période de l'année considérées (OMM-N° 1090).

### **➤ Indice SPI sur 12 mois :**

À ces échelles de temps, l'indice SPI fournit une représentation des régimes de précipitations à longue échéance. L'indice SPI sur 12 mois établit la comparaison entre les précipitations sur une période de 12 mois consécutifs et celles enregistrées sur la même série de 12 mois consécutifs de toutes les années pour lesquelles on dispose de relevés. Étant donné que ces échelles de temps constituent le cumul de périodes plus courtes pouvant se situer au-dessus ou au-dessous de la normale, les valeurs des indices SPI établis pour une période relativement longue tendent à graviter autour de zéro, à moins qu'une tendance humide ou sèche bien distincte ne se soit installée. Les indices SPI pour ces échelles de

temps sont en général associés au débit des cours d'eau, au niveau des réservoirs et au niveau des eaux souterraines à relativement long terme. Pour certaines stations, l'indice SPI sur 12 mois présente une bonne corrélation avec l'indice Palmer et les deux indices peuvent mettre en évidence des conditions analogues (OMM-N° 1090).

### III. Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique à diverses échelles de temps au niveau de Souss-Massa-Draa par SPI (Standardized Precipitation Index) :

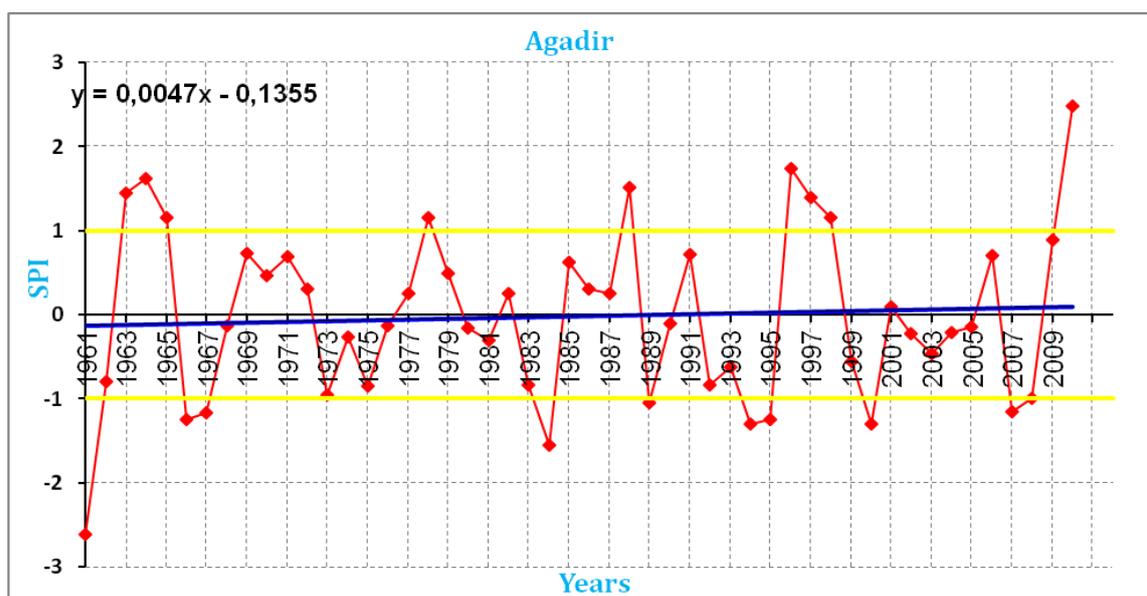
#### 1. Justifications du choix de l'indice :

Le choix de l'indice standardisé des précipitations (dénommé en anglais, SPI, Standardized Precipitation Index), est lié au fait que cet indice présente des avantages en termes de cohérence statistique et à la capacité de décrire et quantifier le déficit de précipitation à de multiples échelles de temps, il permet également d'analyser les périodes humides ainsi que les périodes sèches et peut assurer une alerte précoce de la sécheresse et de les aider à évaluer sa sévérité.

Dans la présente étude, et afin de détecter rapidement les situations de sécheresse et d'en évaluer la gravité, les échelles de temps utilisés sont relativement courtes (3 mois, 6 mois et 12 mois sur les laps de temps de 50 ans pour Agadir et Ouarzazate et 35 ans pour Sidi Ifni). Outre ces avantages, la nature probabiliste de l'indice SPI lui permet d'être comparable entre les différents sites étudiés (Mirabbasi *et al.* 2013).

#### 2. Analyse des évolutions observées de l'indice SPI pour les trois stations (Agadir, Ouarzazate et Sidi Ifni) :

##### a. Evolution de l'indice SPI de la saison d'hiver (DJF) des trois stations :



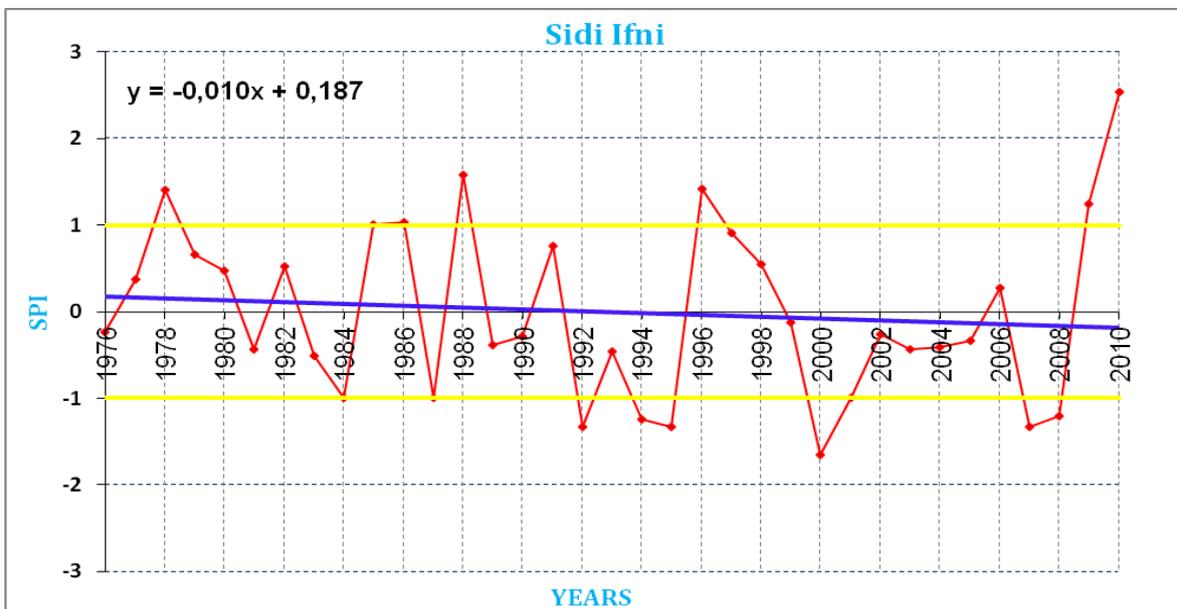
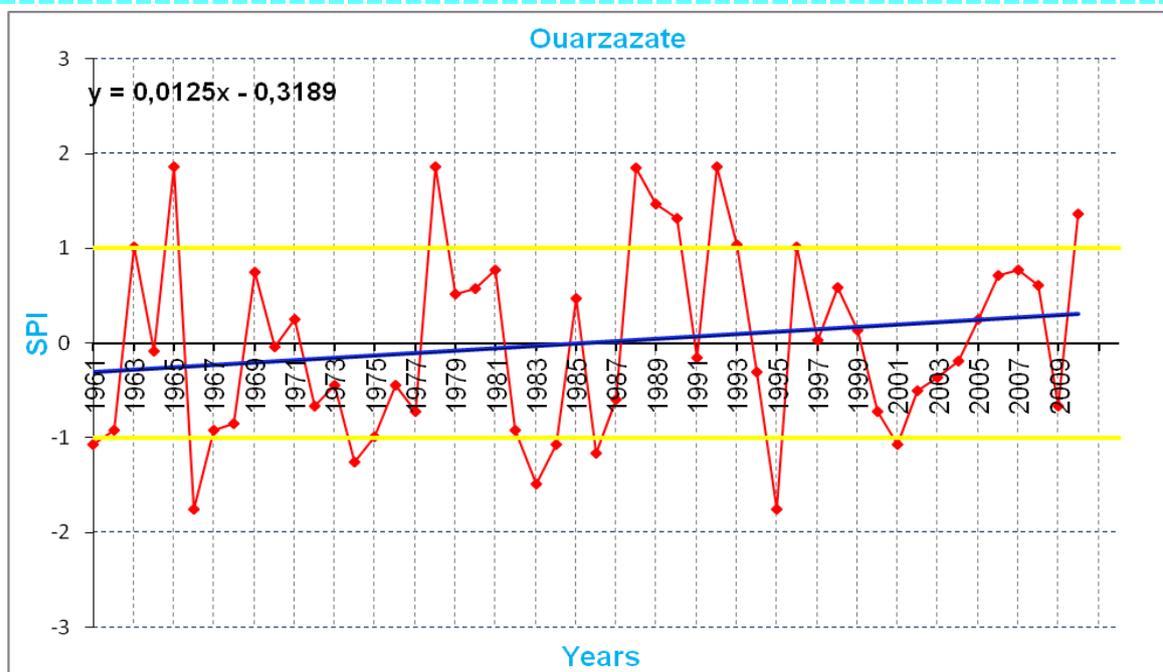


Figure 7: Evolution de l'indice SPI des trois stations pour la saison d'hiver (DJF)

L'indice SPI de la saison d'hiver montre une alternance des hivers secs et humides au niveau des trois stations étudiés au cours de la période de 1960-2010 pour Agadir et Ouarzazate et de 1975-2010 pour Sidi Ifni. Les trois stations ne montrent pas les mêmes intensités de sécheresse et les hivers secs ne couvrent pas les mêmes périodes ; pour Agadir l'hiver de 1961 est caractérisé comme extrêmement sec avec un seuil de -2,61, l'hiver de Ouarzazate de 1995 est considéré comme très avec un seuil de -1,75, alors que pour Sidi Ifni l'hiver de 2000 avec un seuil de -1,65 est le plus sec sur toute la période d'étude. Donc l'hiver d'Agadir de 1961 reste le plus sec sur toute la période.

Tableau 8: Hivers secs repérés par l'indice SP des trois stations sur la période d'étude.

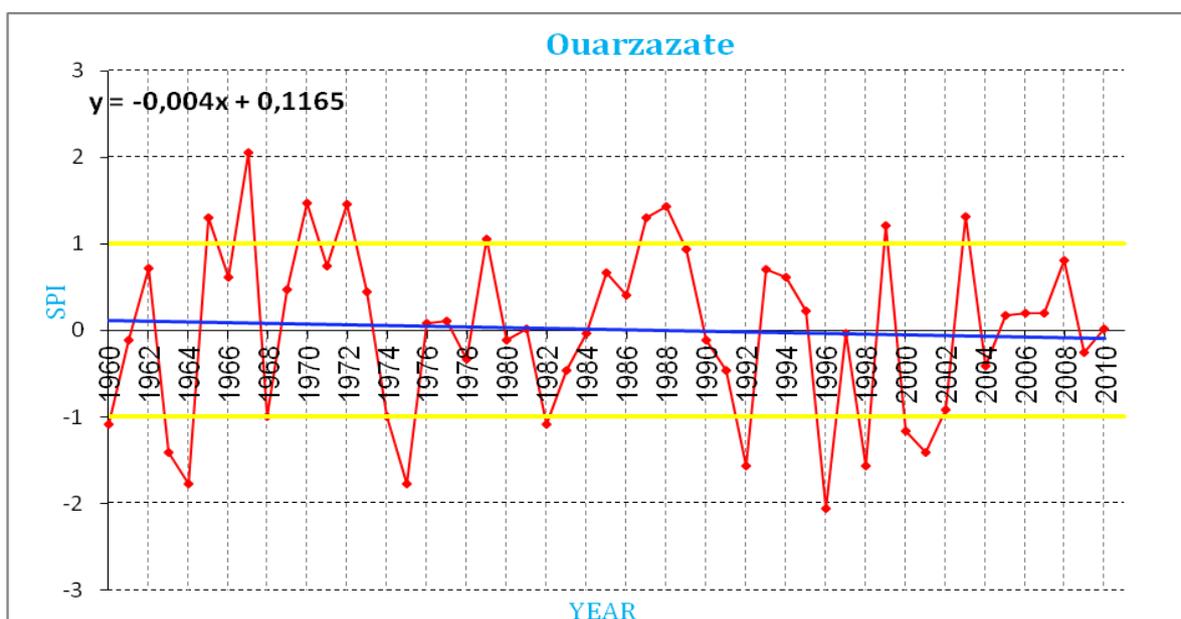
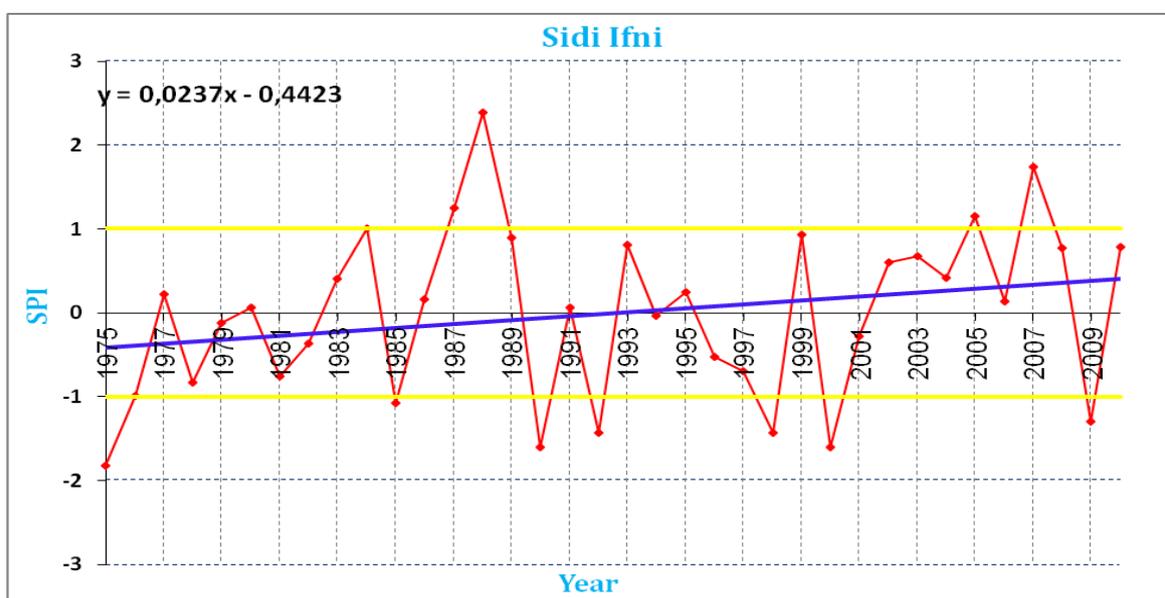
Station	Agadir	Ouarzazate	Sidi Ifni
Hivers secs	1961/1966/1967/1984/1989 /1994/1995/2000/2007/2008.	1961/1966/1974/1975/1983/ 1984/1986/2001	1992/1994/1995/ 2000/2007/2008

Tableau 9: Fréquences des hivers modérément secs et très secs des trois stations au cours de période d'étude

Station	Agadir	Ouarzazate	Sidi Ifni
Fréquence des hivers modérément secs et très secs	20%	18%	17%

Les fréquences des sécheresses modérés et sévères varie pour les trois stations entre un maximum de 20% à Agadir, 18% à Ouarzazate et 17% comme fréquence minimal à Sidi Ifni.

**b. Evolution de l'indice SPI de la saison d'automne (SON) des trois stations :**



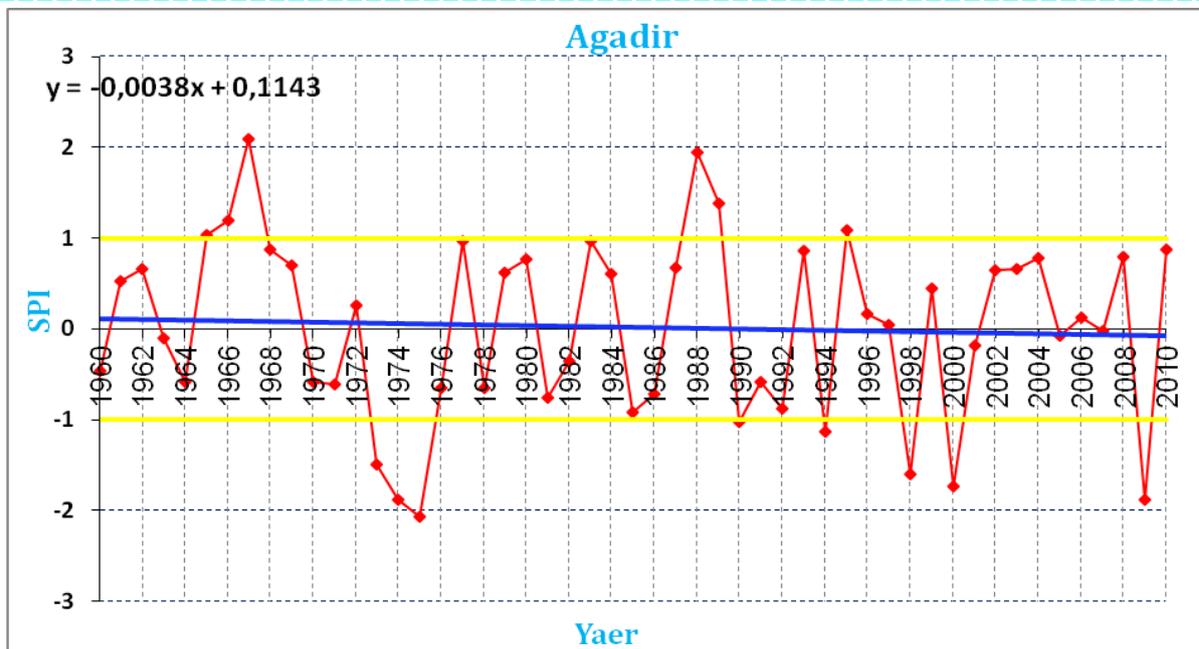
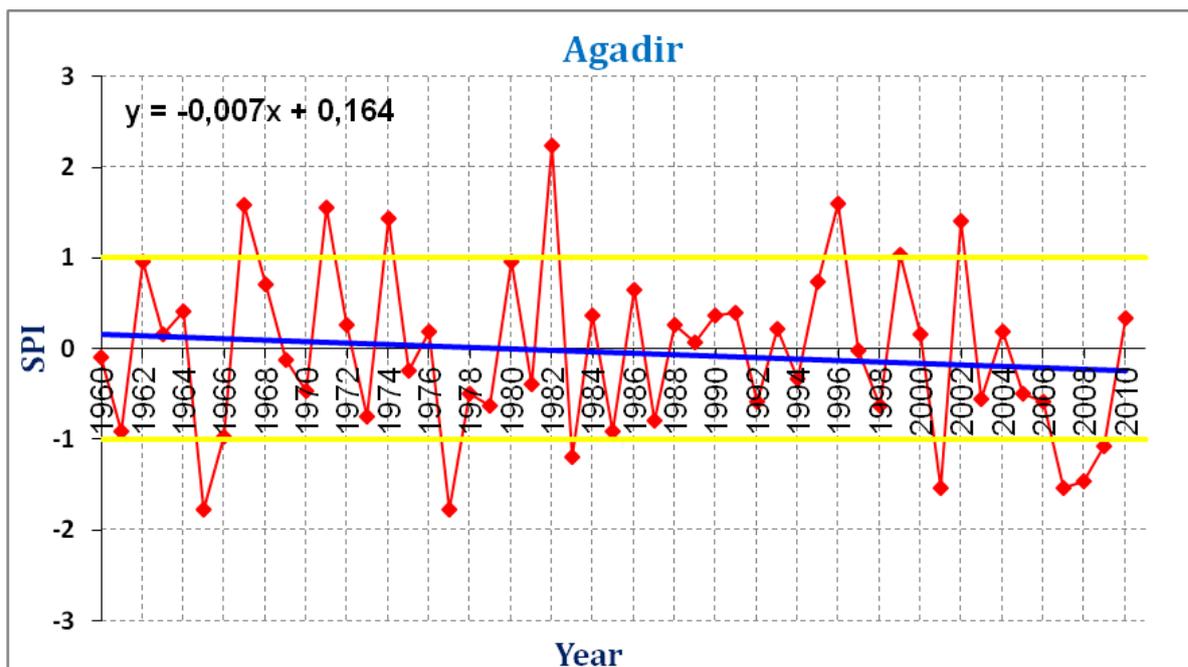


Figure 8: Evolution de l'indice SPI des trois stations pour la saison d'automne (SON).

A l'exception de la station Sidi Ifni qui montre une tendance positive, les deux stations Agadir et Ouarzazate ne montrent pas d'évolutions notables (légère tendance négative). Signalons que les automnes modérément secs et très secs pour Sidi Ifni correspondent aux années 1975-1985-1990-1992-1998-2000-2009. Alors que pour Agadir les automnes secs correspondent aux années 1973-1974-1975-1990-1994-1998-2000-2007. Pour Ouarzazate les automnes qui son modérément secs sont celles des années 1960-1963-1964-1968-1974-1975-1982-1992-1996-1998-2000-2001-2002. Remarquant que les automnes qui sont marqués par des sécheresses sévères et modérées pour Ouarzazate représentent la plus grande fréquence (26%) des les trois stations.

*c. Evolution de l'indice SPI de la saison du printemps (MAM) des trois stations :*



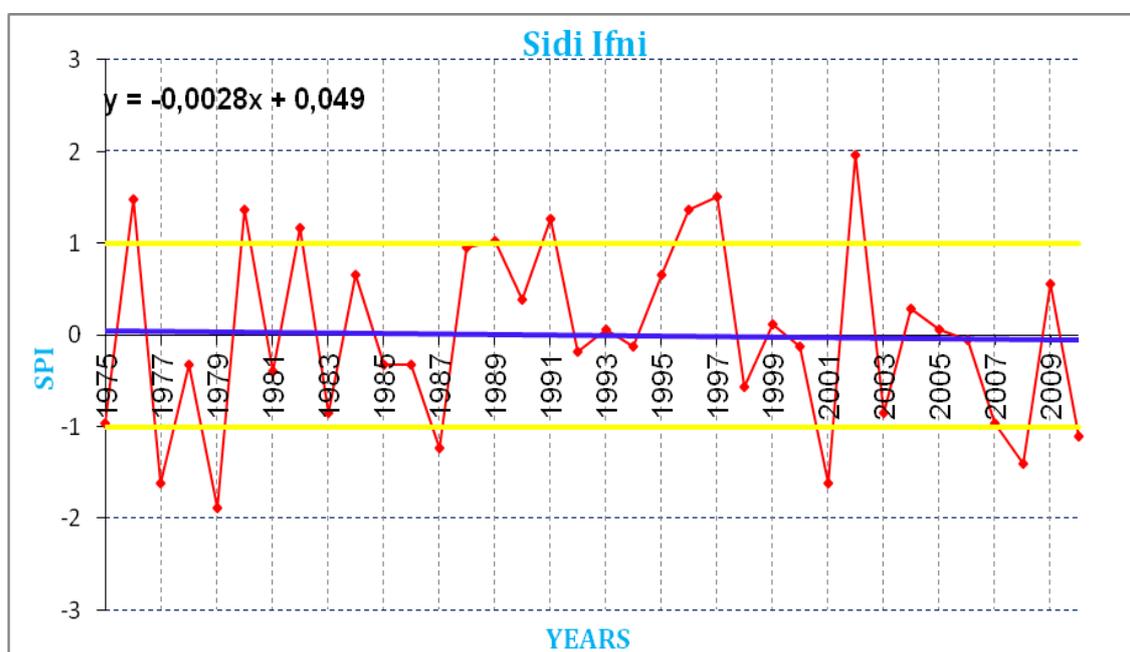
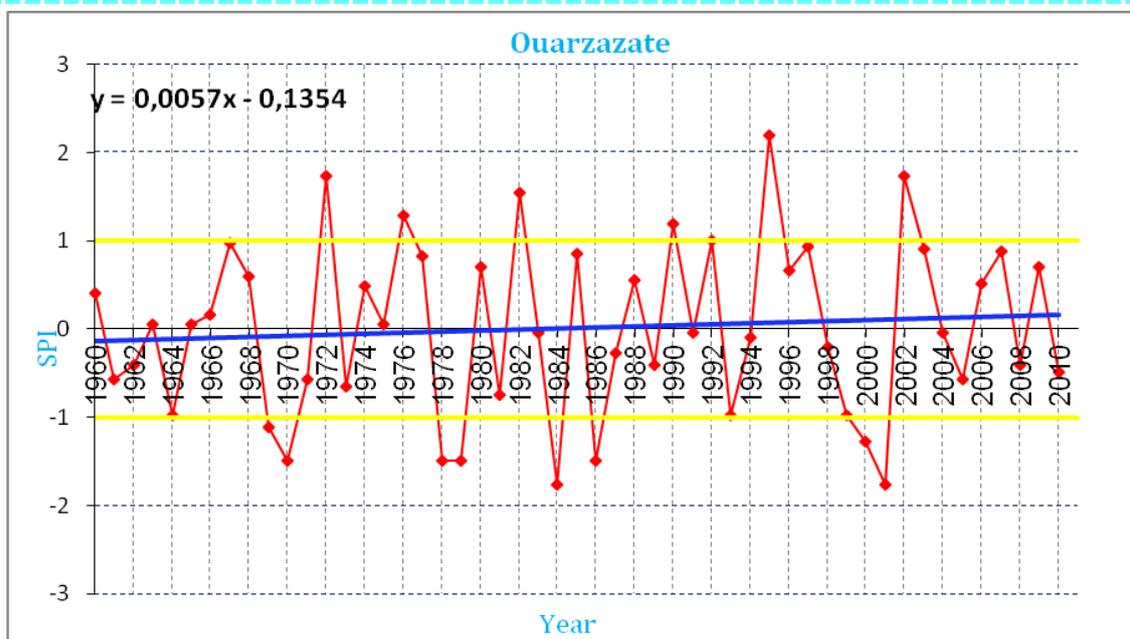


Figure 9: Evolution de l'indice SPI des trois stations pour la saison du printemps (MAM).

Sur l'ensemble des trois stations on remarque l'alternance des printemps secs et humides au cours de la période d'étude avec une petite anomalie de suscitions des printemps humides enregistré à Sidi Ifni au cours de la période de 1988 à 1997. Les fréquences des printemps qui sont marqués par des sécheresses sévères et modérés pour les trois stations sont plus fables que celles des hivers et des automnes.

d. Evolution de l'indice SPI des trois stations à l'échelle annuelle :

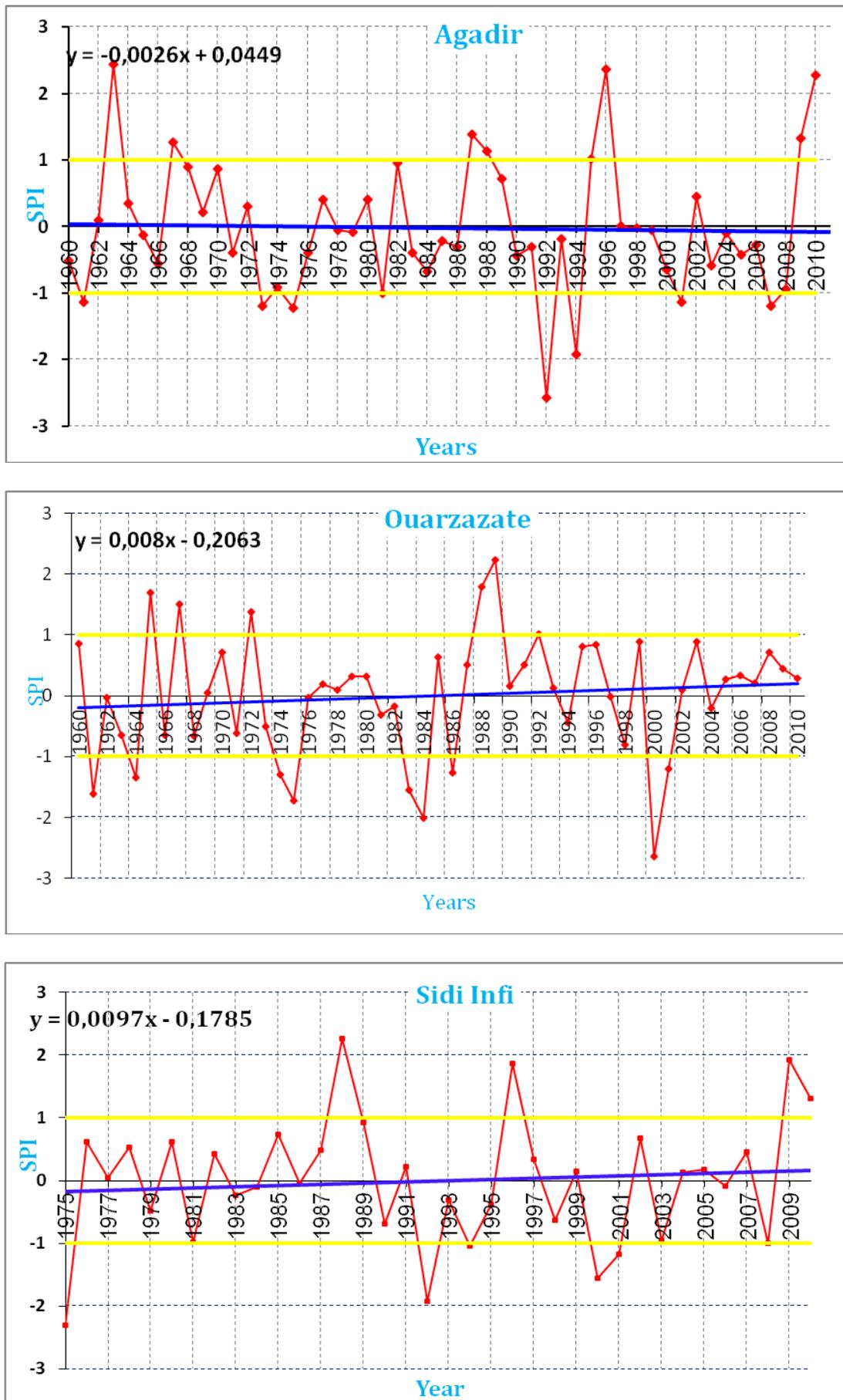


Figure 10: Evolution de l'indice SPI des trois stations à l'échelle annuelle.

A l'échelle annuelle les trois stations ne présentent pas une tendance notable au cours de la période d'étude on note l'alternance des années sèches et humides sur toute la période avec des fréquences et des intensités différentes pour les trois stations.

Au cours des 50 années analysées pour Agadir et Ouarzazate et 35 années pour Sidi Ifni, les sécheresses les plus remarquables par leur intensité ont été celle des années 1992 et 1994 (pour Agadir) et 1984 et 2000 (pour Ouarzazate) et 1975 -1992 (pour Sidi Ifni). Les épisodes secs détectés pour les trois stations ont été qualifiés extrêmement sévères en termes d'intensité. Le tableau en en bas représente des épisodes de sécheresse détectés par l'SPI au niveau des trois stations.

Tableau 10: Episodes de sécheresse détecté par l'indice SPI au niveau des trois stations au cours de la période d'étude.

Station	Agadir	Ouarzazate	Sidi Ifni
Episodes sèches	1961/1973/1975/1981/1992/ 1994/2001/2007	1961/1964/1974/1975/1983/ 1984/1986/2000/2001	1975/1992/1994/2000/ 2001/2008

La caractérisation de ces séquences de sécheresse météorologique au niveau des trois stations est présentée comme suite :

Tableau 11 : intensités et classement des épisodes de sécheresse détecté par SPI au niveau de la station d'Agadir

Années sèches	Intensité (SPI)	Classement
1961	-1,13	<b>Modérément sec</b>
1973	-1,2	<b>Modérément sec</b>
1975	-1,22	<b>Modérément sec</b>
1981	-1	<b>Modérément sec</b>
1992	-2,58	<b>Extrêmement sec</b>
1994	-1,92	<b>Très sec</b>
2001	-1,13	<b>Modérément sec</b>
2007	-1,19	<b>Modérément sec</b>

Tableau 12 : intensités et classement des épisodes de sécheresse détecté par SPI au niveau de la station d'Ouarzazate

Années sèches	Intensité (SPI)	Classement
1961	-1,62	<b>Très sec</b>
1964	-1,35	<b>Modérément sec</b>
1974	-1,29	<b>Modérément sec</b>
1975	-1,73	<b>Très sec</b>
1983	-1,55	<b>Très sec</b>
1984	-2,01	<b>Extrêmement sec</b>
1986	-1,26	<b>Modérément sec</b>
2000	-2,64	<b>Extrêmement sec</b>
2001	-1,2	<b>Modérément sec</b>

Tableau 13 : intensités et classement des épisodes de sécheresse détecté par SPI au niveau de la station de Sidi Ifni

Années sèches	Intensité (SPI)	Classement
1975	-2,3	<b>Modérément sec</b>
1992	-1,93	<b>Très sec</b>
1994	-1,04	<b>Modérément sec</b>
2000	-1,56	<b>Très sec</b>
2001	-1,18	<b>Modérément sec</b>
2008	-1	<b>Modérément sec</b>

Les fréquences des différentes classes de la sécheresse au cours de la période 1960-2010 pour Agadir et Ouarzazate et de la période de 1975-2010 pour Sidi Ifni sont les suivantes :

Tableau 14: Fréquences des classes de sécheresse pour les trois stations au cours de la période 1960- 2010

Station	Fréquences des sécheresses extrêmes	Fréquences des sécheresses sévères	Fréquences des sécheresses modérées
Agadir	2%	2%	12%
Ouarzazate	4%	6%	8%
Sidi Ifni	0%	6%	12%

### Conclusion :

L'analyse de l'indice standardisé des précipitations (SPI) a révélé que les extrêmes de la région de Souss-Massa-Draa ont connu un important déficit pluviométrique à partir des années 60 avec des pics en 1992, 1975 et 2000. Ces pics ont été caractérisés par des sécheresses de types extrêmement sévères.

## IV. Comparaison des évolutions de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques avec celle de l'SPI :

En vue d'évaluer l'efficacité de l'indice de précipitations standardisé (SPI) à la détection des extrêmes pluviométriques et à la caractérisation du niveau de sévérité des sécheresses vécues, nous nous sommes procédé à une comparaison entre les tendances des valeurs centrés réduites calculés à partir des cumuls pluviométriques avec celles de l'indice SPI, pour les trois stations, pour chaque saison (hiver, printemps, été et automne) et pour chaque année de la période d'étude.

### 1. Comparaison des évolutions de l'indice SPI avec celles de la VCR des cumuls pluviométriques pour la saison d'hiver des trois stations :

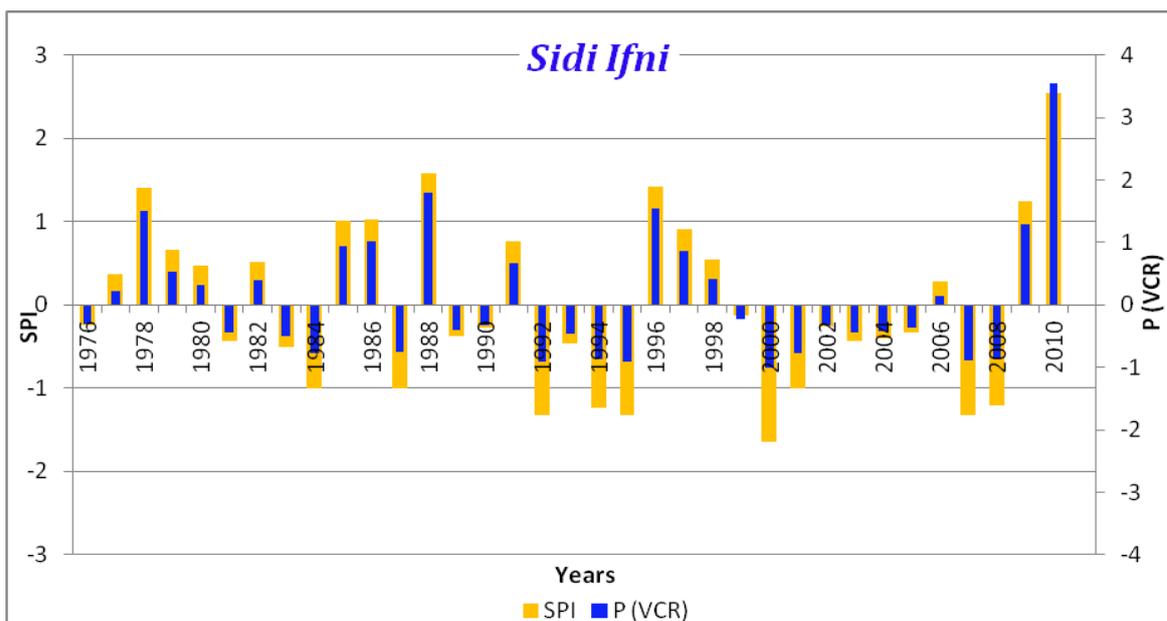
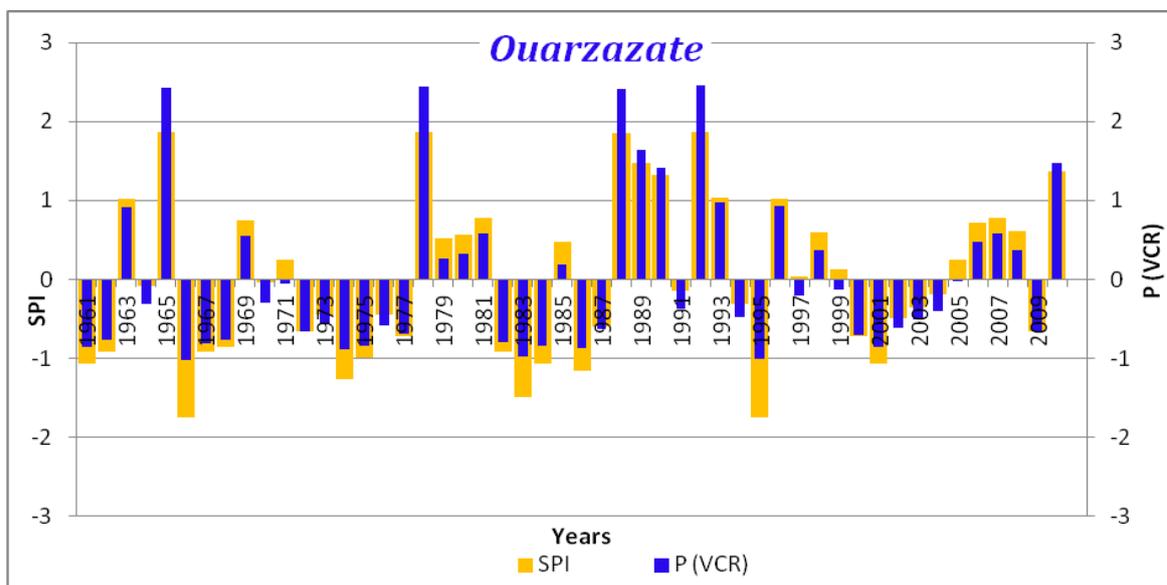
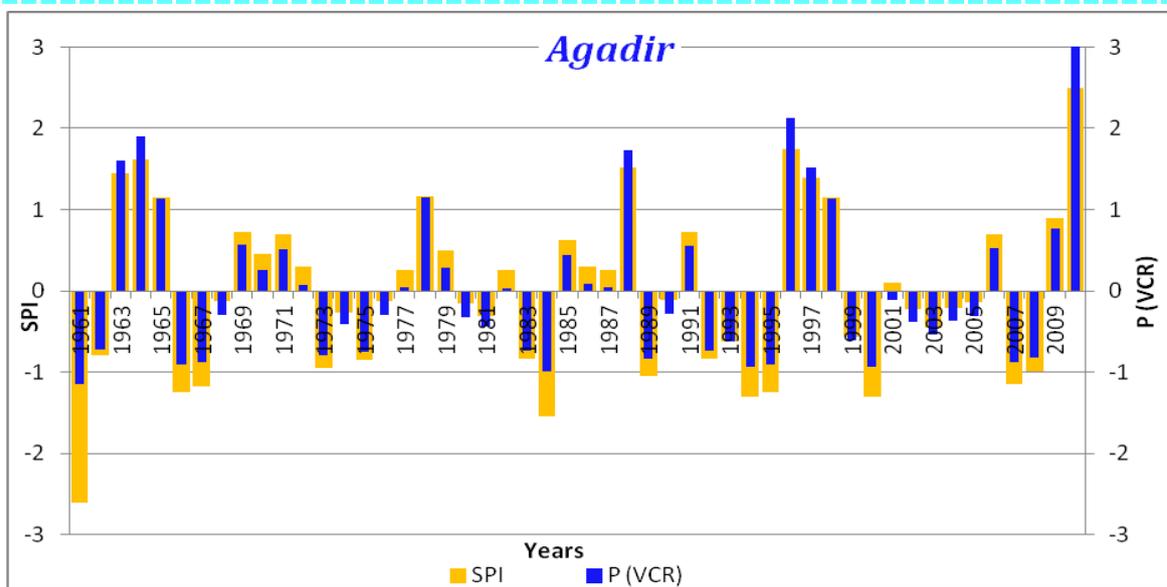


Figure 11: Evolution de l'indice SPI et de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques des trois stations pour la saison d'hiver.

## 2. Comparaison des évolutions de l'indice SPI avec celles de la VCR des cumuls pluviométriques pour la saison du printemps des trois stations :

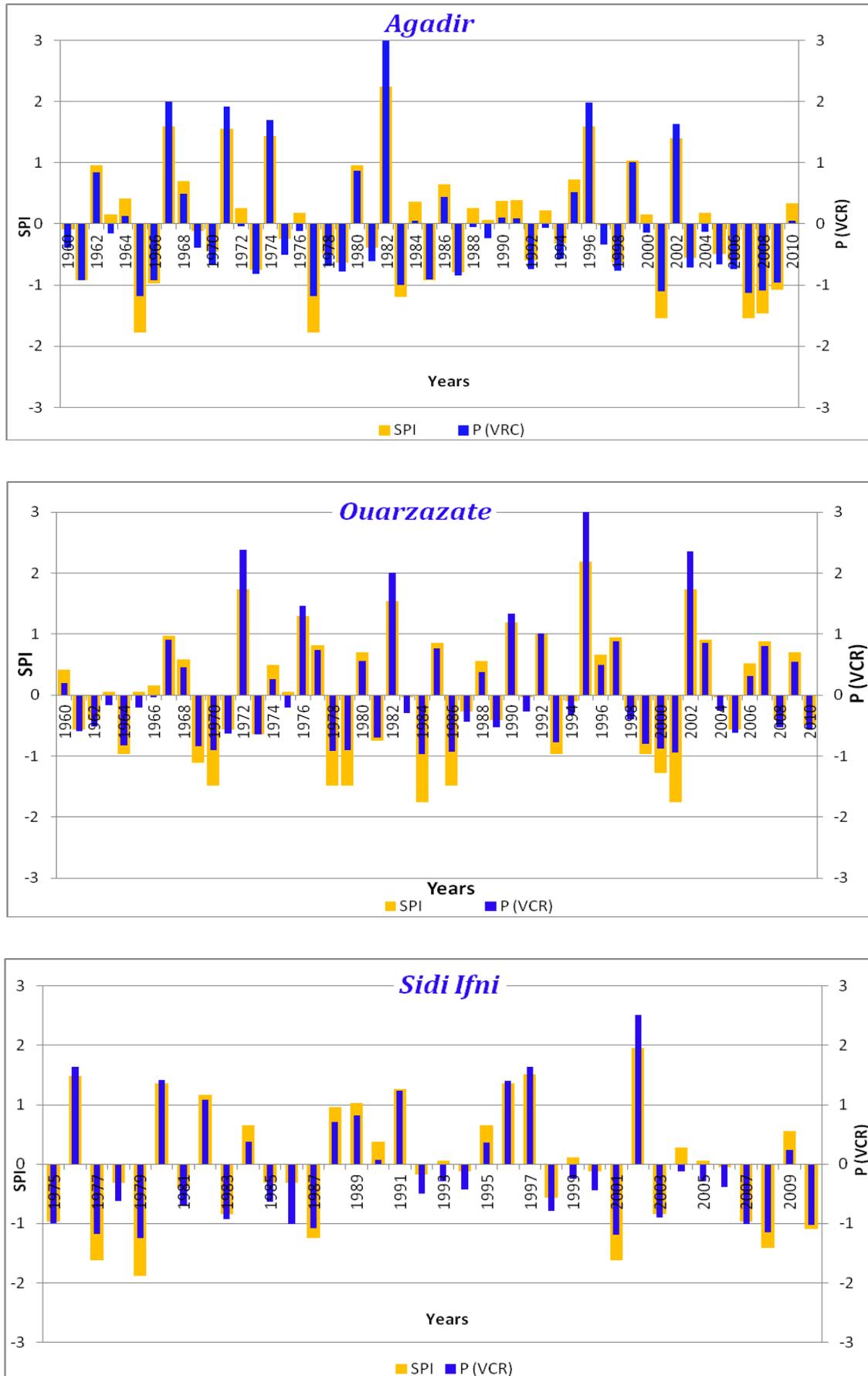


Figure 12: Evolution de l'indice SPI et de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques des trois stations pour la saison du printemps.

### 3. Comparaison des évolutions de l'indice SPI avec celles de la VCR des cumuls pluviométriques pour la saison d'automne des trois stations :

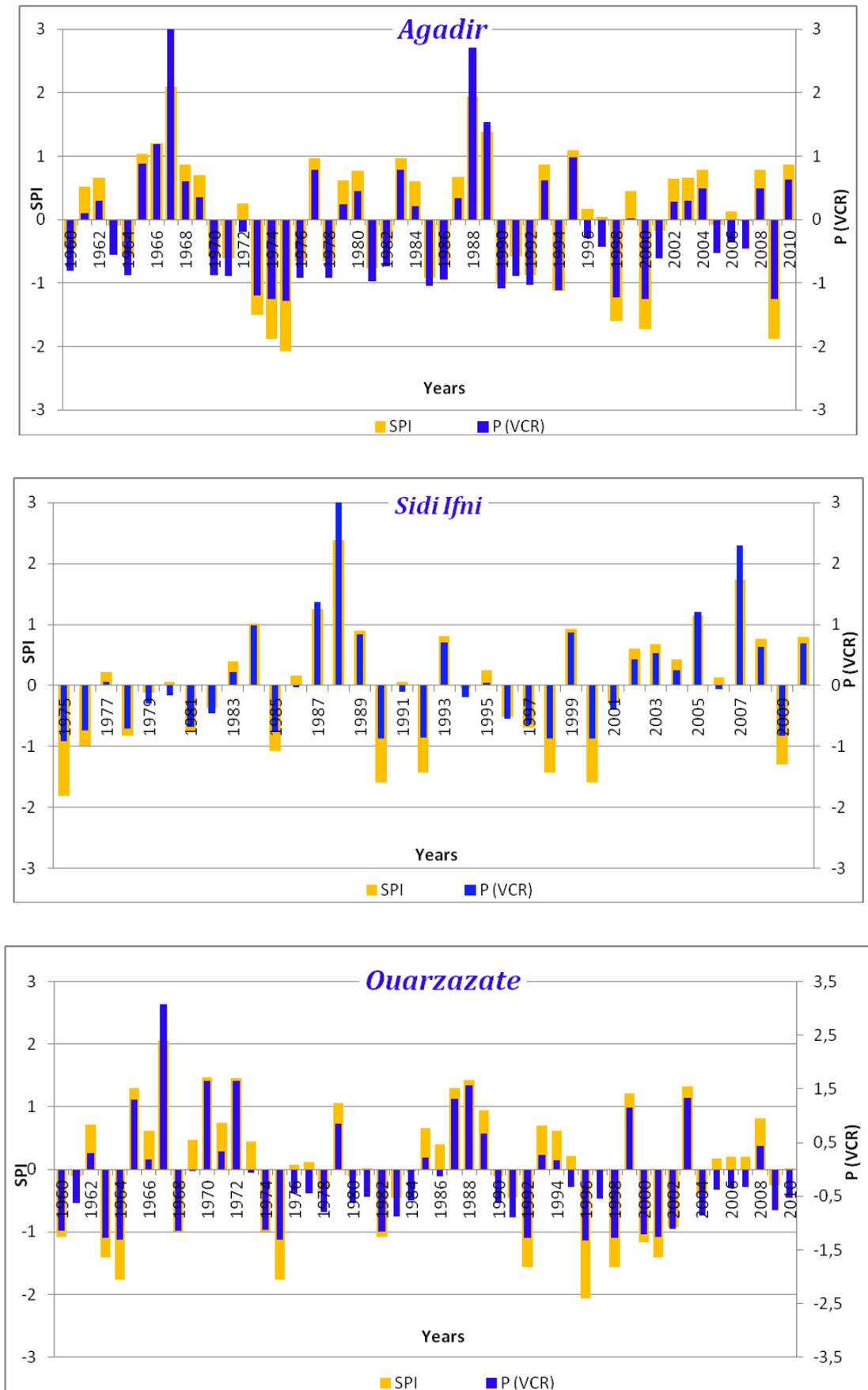


Figure 13: Evolution de l'indice SPI et de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques des trois stations pour la saison d'automne.

#### 4. Comparaison des évolutions de l'indice SPI avec celles de la VCR des cumuls pluviométriques pour les trois stations à l'échelle annuelle :

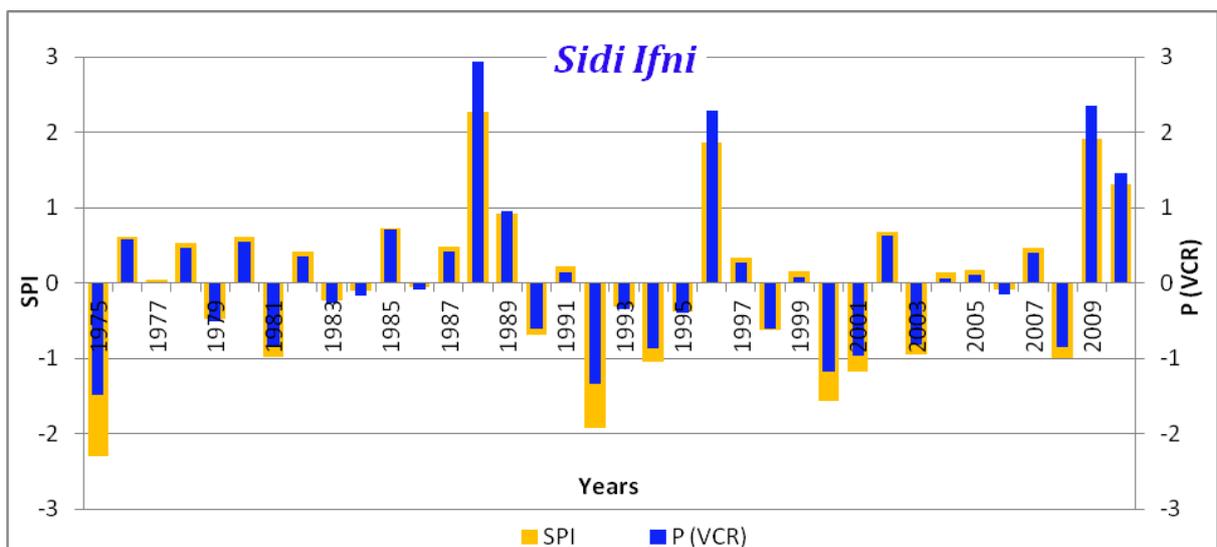
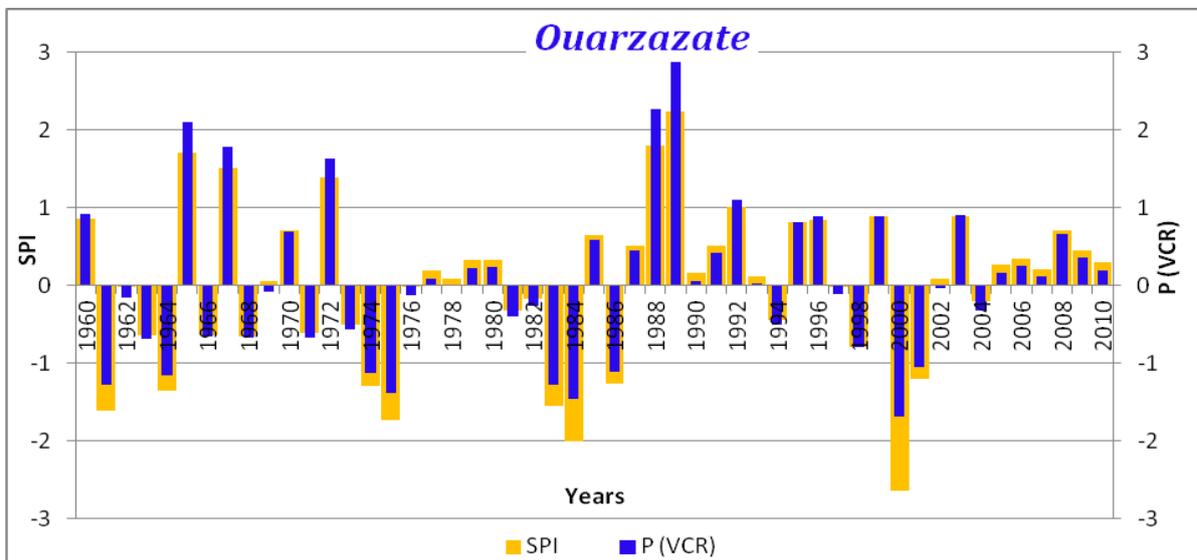
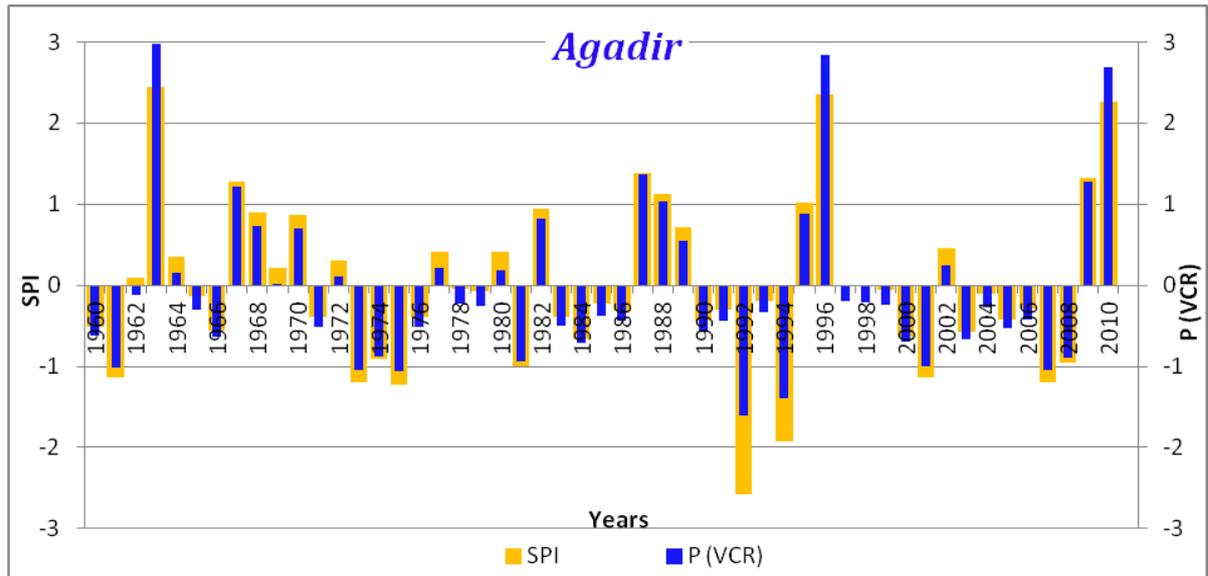


Figure 14 : Evolution de l'indice SPI et des cumuls pluviométriques des trois stations à l'échelle annuelle.

## 5. Analyse et discussion :

La superposition des tendances, saisonniers et annuelles des trois stations, de l'indice SPI avec celle de la VCR des cumuls pluviométriques nous a montré une parfaite liaison entre la tendance de l'SPI et celle de la VCR. Pour les différentes stations et pour différentes échelles de temps considérés (saisons ou années) nous avons remarqué qu'une simple variation pluviométrique (déficit ou disponibilité) est indiquée par une importante intensité de l'indice SPI ce qui valide l'efficacité de cet indice à la détection de la sévérité des sécheresses météorologiques à différentes échelles temporelles.

Les résultats de cette comparaison entre les évolutions de l'indice SPI et celles de la valeur centrée réduite pour les trois stations et pour les différentes échelles de temps au cours de la période d'étude nous a révélé que l'indice SPI nous a repéré les mêmes épisodes de sécheresse qui sont identifiés par la VCR (valeur centrée réduite) des cumuls pluviométriques.

Retenons que :

- Les épisodes de sécheresse sont dispersés sur toute la période d'étude avec des fréquences et des intensités différentes pour l'ensemble des stations et que la durée maximale de la sécheresse est de 2 ans.
- Les hivers repérés de la région Souss-Massa-Draa de 1961/1966/1984/1994/1995/2000/2001/2007 et 2008 sont caractérisés comme des hivers modérément secs, très secs et extrêmement secs (à Agadir).
- Les épisodes de sécheresse de 1961-1975-1981-1994-2000-2001-2007 sont généralisées sur tout le bassin, selon une intensité allant de modérée à forte.

## **Chapitre 3 : Corrélations des modes de téléconnection de l'Hémisphère Nord avec l'indice de précipitations standardisé (SPI) pour les trois stations au cours de la période d'étude :**

Différentes études antérieures ont montré l'influence des modes de la circulation tropicale et extratropicale sur la variabilité interannuelle des précipitations marocaines et nord africaines. En particulier, l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) exerce une certaine influence sur les précipitations hivernales marocaines qui lui sont négativement corrélées notamment la partie ouest des montagnes de l'Atlas (Driouech., 2010). Afin d'évaluer le degré de liaison entre l'évolution et la variabilité des précipitations marocaines et ces modes de circulations atmosphériques et pour trouver des facteurs pouvant expliquer une part de leur variance, nous avons calculé les corrélations entre l'indice SPI des trois stations étudiés de la région Souss-Massa-Draa et trois modes de téléconnection de l'Hémisphère Nord : (l'Oscillation Nord Atlantique (NAO), le mode Scandinavien (SCAND) et le mode Tropical / Hémisphère Nord (TNH)) sur une période de 50 ans pour Agadir et Ouarzazate et 35 ans pour Sidi Ifni.

### **I. Notion des modes de téléconnection et leurs influences sur le climat du Maroc :**

#### **1. Contexte général**

La circulation atmosphérique est le principal facteur des changements dans la rigueur des saisons, notamment hivernales, d'une année à l'autre. Parmi les éléments les plus distingués de la variabilité interannuelle de la circulation atmosphérique de grande échelle est l'importance de l'organisation spatiale des modes de téléconnection (Wallace et Gutzler, 1981). La circulation atmosphérique présente une grande variabilité, reflétant les modes de téléconnection, les conditions météorologiques et les systèmes de circulation qui se produisent sur différentes échelles de temps, allant de quelques jours jusqu'aux quelques mois, à plusieurs années voire quelques siècles.

Le terme « mode de téléconnection » ou "teleconnection pattern" se réfère à un schéma récurrent et persistant à grande échelle de la pression et des anomalies de la circulation, s'étendant sur des vastes zones géographiques. Bien que ces modes durent pendant plusieurs semaines à plusieurs mois, ils peuvent parfois être importants pendant plusieurs années consécutives, représentant ainsi une grande partie de la variabilité de la circulation atmosphérique à grande échelle sur une longue durée. Bon nombre des tendances de téléconnection sont aussi à l'échelle planétaire dans la nature, et s'étendent sur les bassins et les continents océaniques entiers. Par exemple, certains modèles couvrent l'ensemble du bassin du Pacifique Nord, tandis que d'autres s'étendent de l'est de l'Amérique du Nord à l'Europe centrale. D'autres encore couvrent la quasi-totalité de l'Eurasie.

Tous les modes de téléconnection sont des aspects naturels de notre système atmosphérique chaotique. Certains de ces modes, en particulier ceux localisés sur le Pacifique Nord, sont souvent forcés par les changements de températures de la surface des mers tropicales et la convection tropicale associée à la fois au cycle ENSO (Mo et Livezey 1986, Barnston et Livezey 1991) et aux Madden-Julian Oscillations (MJO).

Les modes de téléconnexion reflètent les changements à grande échelle des ondes atmosphériques et des courants jets, et ils influencent la température, les précipitations, les trajectoires des tempêtes, et l'emplacement du courant-jet et son intensité sur de vastes territoires. Par conséquent, ils sont souvent à l'origine de certaines anomalies des conditions météorologiques produites sur de vastes distances.

La surveillance régulière de ces modes de téléconnexion est importante et nécessite des recherches, en continu, pour mieux comprendre leur rôle dans le système climatique mondial. Dix modes de téléconnexion principaux peuvent être identifiés, pendant toute l'année, dans les extra tropiques de l'hémisphère Nord (Barnston et Livezey 1987).

- Oscillation Nord Atlantique
- Motif de l'Atlantique Est
- Motif de l'Atlantique Est / Ouest de la Russie
- Motif Scandinavie
- Diagramme polaire / Eurasie
- Motif de l'Ouest du Pacifique
- Est Pacifique - motif du Pacifique Nord
- Motif Pacifique / Amérique du Nord
- Motif tropical / Hémisphère Nord
- Modèle de transition pacifique

Les principaux modes auxquels nous nous intéressons dans cette étude sont : l'Oscillation Nord Atlantique (ONA), le mode Scandinavien (SCAND) qui sont des modes extra-tropicaux et le mode Tropical / Hémisphère Nord (TNH).

## **2. Modes de téléconnexion étudiés :**

### *a. L'Oscillation Nord Atlantique «NAO» :*

L'Oscillation Nord Atlantique (NAO) est un phénomène climatique qui joue un rôle très important sur les conditions météorologiques et océanographiques de l'Atlantique Nord. Dans cette région, les fluctuations climatiques aux moyennes et hautes latitudes se caractérisent par un petit nombre de structures bien définies, montrant une forte cohérence spatiale à grande échelle sur le bassin atlantique. L'Oscillation Nord Atlantique est le mode atmosphérique dominant plus particulièrement en hiver, son influence s'étendant de la côte Est des Etats-Unis à l'Eurasie et l'Afrique du Nord, jusqu'à l'Arctique. (Visbeck et al. 2001).

La NAO (North Atlantic Oscillation) constitue le mode de variabilité dominant de la pression atmosphérique de surface en Atlantique Nord et en Europe. Elle se caractérise par une oscillation en opposition de phase entre la pression au niveau des Açores et celle en Islande. La structure spatiale de la NAO est présentée sur la figure (15), révélant deux noyaux principaux d'anomalies de pression de

signe opposé, qui s'étirent respectivement de l'Islande au Spitzberg et du centre du bassin Atlantique Nord à la péninsule Ibérique et la France.

On parle alors de phase positive lorsque les deux centres d'action se renforcent (creusement de la dépression d'Islande, gonflement et intensification de l'Anticyclone des Açores) ou de phase négative lorsque les deux nœuds s'affaiblissent simultanément.

Les deux phases de NAO :

✓ La phase positive de NAO : NAO+

Quand l'indice NAO se trouve dans une phase dite positive des anomalies négatives de SLP (Sea Level Pressure (Pression au niveau de la mer)) sont présentes en Islande et dans l'Arctique. Cette phase est associée à des anomalies positives de SLP dans la région des Açores. Par conséquent, des anomalies positives de vent d'Ouest couvrent les latitudes moyennes de l'Atlantique Nord et l'Europe de l'Ouest. Des hivers plus froids dominent dans le Nord-Ouest de l'Atlantique, alors que les hivers sont plus doux en Europe de l'Ouest avec des perturbations déplacées vers le Nord entraînant des conditions plus humides de l'Islande à la Scandinavie. D'une manière concomitante, le Sud-ouest de l'Europe et le bassin Méditerranéen sont plus secs.

✓ La phase négative de NAO : NAO-

Quand l'indice NAO se trouve dans une phase dite négative, des anomalies positives de SLP (Sea Level Pressure (Pression au niveau de la mer)) sont observées sur l'Islande et l'Arctique, pendant l'hiver de l'hémisphère Nord. Alors que des anomalies négatives de SLP dominent dans la région des Açores, les vents d'Ouest sont plus faibles, les trajectoires des perturbations atlantiques sont déplacées vers le Sud, avec des hivers plus rigoureux sur l'Europe de l'Ouest et des conditions plus humides dans le Sud-ouest de l'Europe et le bassin Méditerranéen.

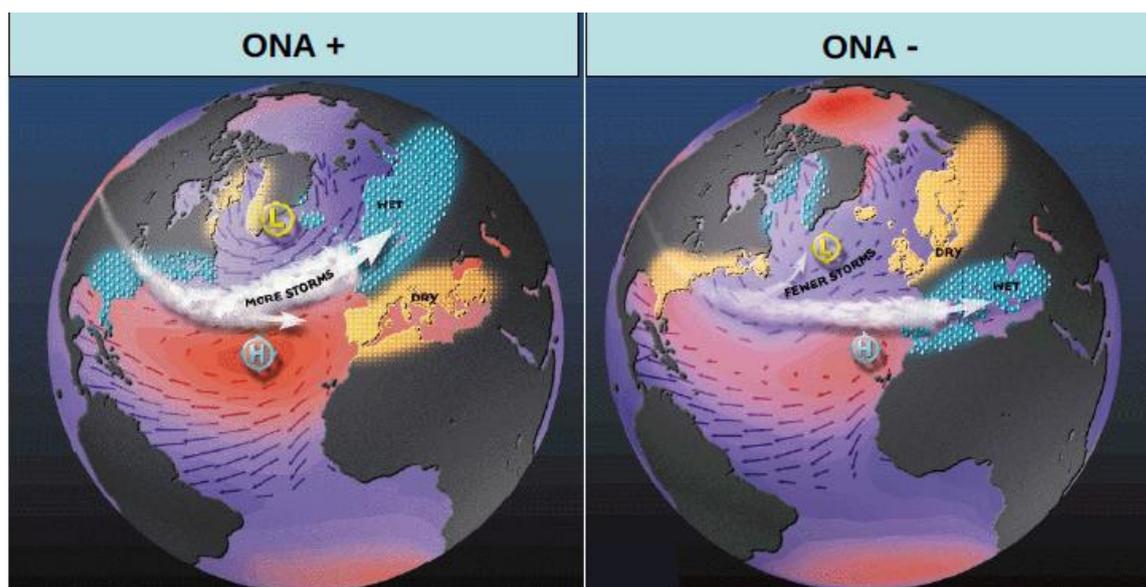


Figure 15: Représentation schématique des conditions météorologiques associées aux phases positive et négative de l'Oscillation Nord-Atlantique source (<http://Ideo.columbia.edu/NAO/>)

### *b. Le mode scandinave (SCAND)*

Le mode scandinave (SCA), connu jadis sous le nom d'Eurasie-1 (Barnston et Livezey, 1987), se compose d'un centre d'action primaire sur la Scandinavie, et un centre d'anomalies moins prononcées de signe opposé situé à l'Ouest de l'Europe. Il régit la variabilité sur la Scandinavie, la Sibérie et l'océan antarctique.

La phase positive de ce mode est associée à un flux de Sud-Est au dessus de la Méditerranée et responsable des principales situations de blocage tout le long de la Scandinavie et l'Ouest de la Russie. Tandis que sa phase négative est associée à des anomalies de hauteur négatives dans ces régions.

### *c. Le mode Tropical / Hémisphère Nord (TNH)*

Le mode Tropical / hémisphère Nord (TNH) a été classé par Mo et Livezey (1986), et apparaît comme un mode de premier plan pendant l'hiver Décembre-Février. La phase positive de la tendance TNH monte des hauteurs supérieures à la moyenne sur le golfe de l'Alaska et le golfe du Mexique vers le nord à travers l'ouest de l'Atlantique Nord, et des hauteurs inférieures à la moyenne tout au long de l'est du Canada.

Le mode TNH reflète des changements à grande échelle à la fois de l'emplacement et l'étendue vers l'est de la jet-Pacifique, ainsi que dans la force et la position de la moyenne climatologique.

La phase positive de ce mode est associée à des températures de surface inférieures à la moyenne dans l'ensemble de l'ouest et du centre des États-Unis, et dans le centre et l'est du Canada. Il est également associée à des précipitations supérieures à la moyenne dans le centre et l'est du Pacifique Nord subtropical et les précipitations inférieures à la moyenne dans l'ouest des États-Unis et à travers Cuba, les Bahamas, et une grande partie de la centrale de l'océan Atlantique Nord.

Sa phase négative est souvent observée au cours de Décembre et Janvier quand les conditions chaudes du Pacifique sont présentes (Barnston et al.1991).

## **II. Corrélations de l'indice SPI avec le mode NAO (l'Oscillation Nord Atlantique) pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle.**

Afin de quantifier la relation entre les précipitations au Maroc et la variabilité de la NAO aux différentes échelles de temps (saisonnière et annuelle), un calcul des coefficients de corrélation linéaire entre la série de l'indice SPI (calculé pour les trois stations) et l'indice NAO sur la période disponible (1960-2010 pour Agadir et Ouarzazate et de 1975-2010 pour Sidi Ifni) a été réalisé pour différentes saisons et l'année. Les résultats de ces corrélations sont comme suit :

Tableau 15 : Corrélations de l'indice SPI avec le mode NAO à l'échelle saisonnière et annuelle pour les trois stations au cours de la période d'étude.

<b>Station Agadir</b> <b>Corrélations SPI et NAO</b>	
Hiver (DJF)	-0,7
Printemps (MAM)	0,1
Eté (JJO)	-0,1
Automne (SON)	-0,1
Saison pluvieuse	-0,5
Année calendaire	-0,4
Année agricole	-0,4

<b>Station Sidi Ifni</b> <b>Corrélations SPI et NAO</b>	
Hiver (DJF)	-0,7
Printemps (MAM)	0,3
Eté (JJO)	0,2
Automne (SON)	-0,1
Saison pluvieuse	-0,4
Année calendaire	-0,2
Année agricole	-0,30

<b>Station Ouarzazate</b> <b>Corrélations SPI et NAO</b>	
Hiver (DJF)	-0,2
Printemps (MAM)	0,2
Eté (JJO)	-0,2
Automne (SON)	0,1
Saison pluvieuse	0,06
Année calendaire	0,06
Année agricole	0,02

Lorsque nous corrélons l'indice de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) avec l'indice SPI (à l'échelle saisonnière et annuelle) de nos 3 stations, l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) donne des corrélations intéressantes (en hiver et pendant la saison pluvieuse) pour les deux stations Agadir et Sidi Ifni, avec des valeurs de -0.7 en hiver pour les deux stations et -0.5 pour Agadir et -0.4 à Sidi Ifni au cours de la saison pluvieuse. Alors que pour Ouarzazate cette corrélation est assez faible (-0,2 en hiver et 0.06 en saison pluvieuse). Il est à noter que la position géographique des deux stations Agadir et Sidi Ifni au Nord-Ouest du Maroc constitue un facteur majeur qui contribue dans ces bonnes corrélations. Elles sont situées face à l'océan et à l'Ouest des montagnes de l'Atlas qui jouent un rôle de barrière pour Ouarzazate située à l'Est du flanc atlasique.

### **III. Corrélations de l'indice SPI avec le mode SCAND (mode Scandinavien) pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle.**

Tableau 16: Corrélations de l'indice SPI avec le mode SAND pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle au cours de période d'étude.

<b>Station Sidi Ifni</b> <b>Corrélations SPI et SCAND</b>	
Hiver (DJF)	0,5
Printemps (MAM)	0,1
Été (JJO)	0,1
Automne (SON)	-0,2
Saison pluvieuse	-0,2
Année calendaire	0,2
Année agricole	-0,005

<b>Station Agadir</b> <b>Corrélations SPI et SCAND</b>	
Hiver (DJF)	0,2
Printemps (MAM)	0,2
Été (JJO)	-0,0004
Automne (SON)	0,04
Saison pluvieuse	-0,1
Année calendaire	0,03
Année agricole	0,03

<b>Station Ouarzazate</b> <b>Corrélations SPI et SCAND</b>	
Hiver (DJF)	-0,1
Printemps (MAM)	-0,2
Été (JJO)	-0,1
Automne (SON)	-0,2
Saison pluvieuse	-0,1
Année calendaire	-0,06
Année agricole	0,2

Les résultats de la corrélation entre l'indice de précipitations standardisés (SPI) et le mode Scandinavien (SCAND), ont montré que ce mode présente des corrélations intéressantes seulement en hiver pour la station Sidi Ifni avec un coefficient de corrélation de (0.5), alors que cette corrélation est assez faible pour les deux autres stations (en hiver : 0.2 pour Agadir et -0.1 pour Ouarzazate). Notons que la longueur des séries n'est pas la même pour Sidi-Ifni d'une part et Agadir et Ouarzazate d'autre part.

#### **IV. Corrélations de l'indice SPI avec le mode TNH (mode Tropical / Hémisphère Nord) pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle.**

Tableau 17: Corrélations de l'indice SPI avec le mode TNH pour les trois stations à l'échelle saisonnière et annuelle au cours de la période d'étude.

<b>Station Ouarzazate</b> <i>Corrélations SPI et TNH</i>		<b>Station Agadir</b> <i>Corrélations SPI et TNH</i>	
Hiver (DJF)	0,03	Hiver (DJF)	-0,1
Printemps (MAM)	0	Printemps (MAM)	0
Eté (JJO)	0	Eté (JJO)	0
Automne (SON)	0	Automne (SON)	0
Saison pluvieuse	-0,03	Saison pluvieuse	-0,1
Année calendaire	0,2	Année calendaire	0,01
Année agricole	0,03	Année agricole	0,05

<b>Station Sidi Ifni</b> <i>Corrélations SPI et TNH</i>	
Hiver (DJF)	-0,07
Printemps (MAM)	0
Eté (JJO)	0
Automne (SON)	0
Saison pluvieuse	-0,1
Année calendaire	0,1
Année agricole	-0,1

Les corrélations de l'indice SPI avec le mode TNH (mode Tropical / Hémisphère Nord), restent très faibles (ne dépassent pas 0.1 en valeur absolue). Ce qui indique la faible influence exercée par ce mode de téléconnection sur les précipitations de la région de Souss-Massa-Draa.

L'analyse de ces corrélations nous a permis de déduire que le mode de l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) est plus dominant en termes de corrélations avec les précipitations (surtout sur le côté Nord-Ouest ; Agadir et Sidi Ifni).

## V. Analyse de composites :

Pour dégager la correspondance entre les modes de téléconnection de l'hémisphère Nord et la variabilité des extrêmes pluviométriques de la région Souss Massa Draa, nous sommes amenés à analyser leurs évolutions hivernales et annuelles avec l'indice SPI des précipitations des deux stations Agadir et Sidi Ifni au cours de la période d'étude.

La station Ouarzazate est exclue de cette analyse du faite que la corrélation de son indice SPI avec les trois modes de téléconnection n'a pas révélé des valeurs significatives. Ce qui montre la faible influence de ces modes sur le régime pluviométrique de cette station. L'influence de ces modes sur la pluviométrie

au Maroc se trouve affaiblie par la barrière de l'Atlas. Elle est limitée principalement aux régions situées à l'ouest de cette chaîne montagneuse.

L'indice TNH n'a pas montré des corrélations significatives avec l'indice SPI des trois stations au cours de la période d'étude. Nous nous limiterons donc à analyser les tendances hivernales et annuelles des deux modes NAO et SCAND au cours des périodes sèches repérées par l'indice SPI.

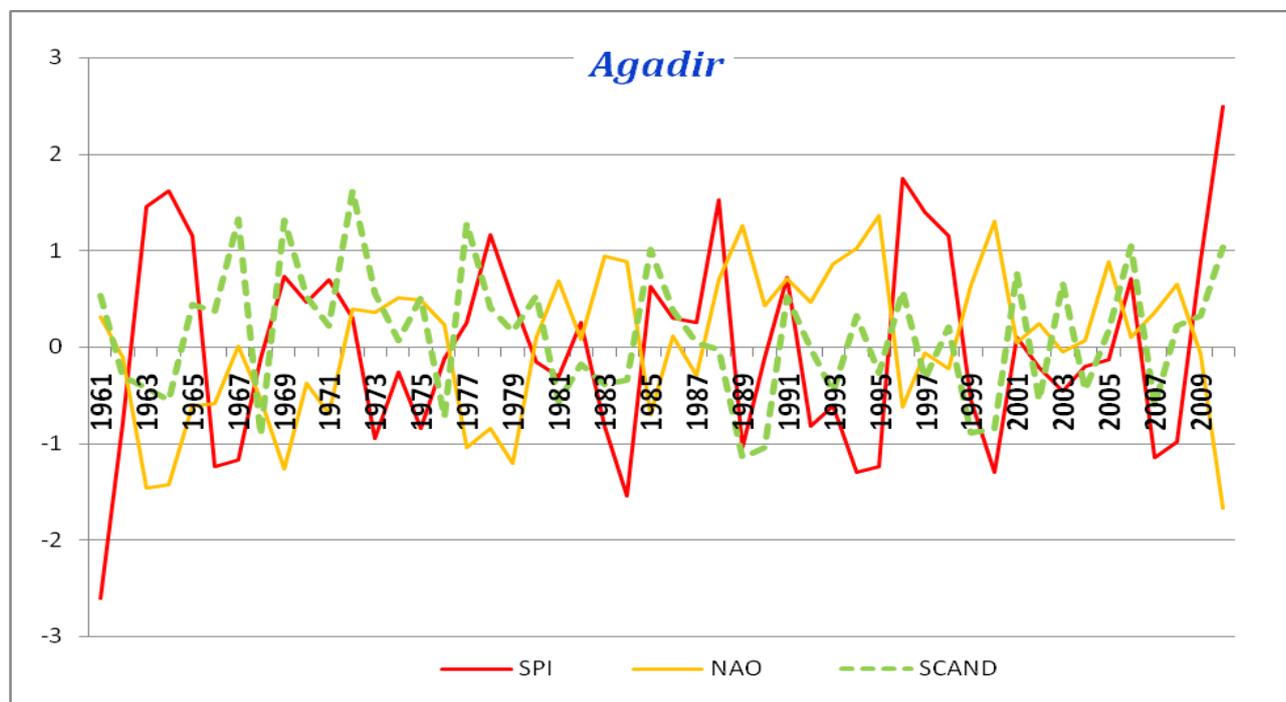


Figure 16: Evolutions des indices NAO et SCAND avec l'indice SPI des précipitations d'Agadir pour la saison d'hiver au cours de la période de 1960-2010

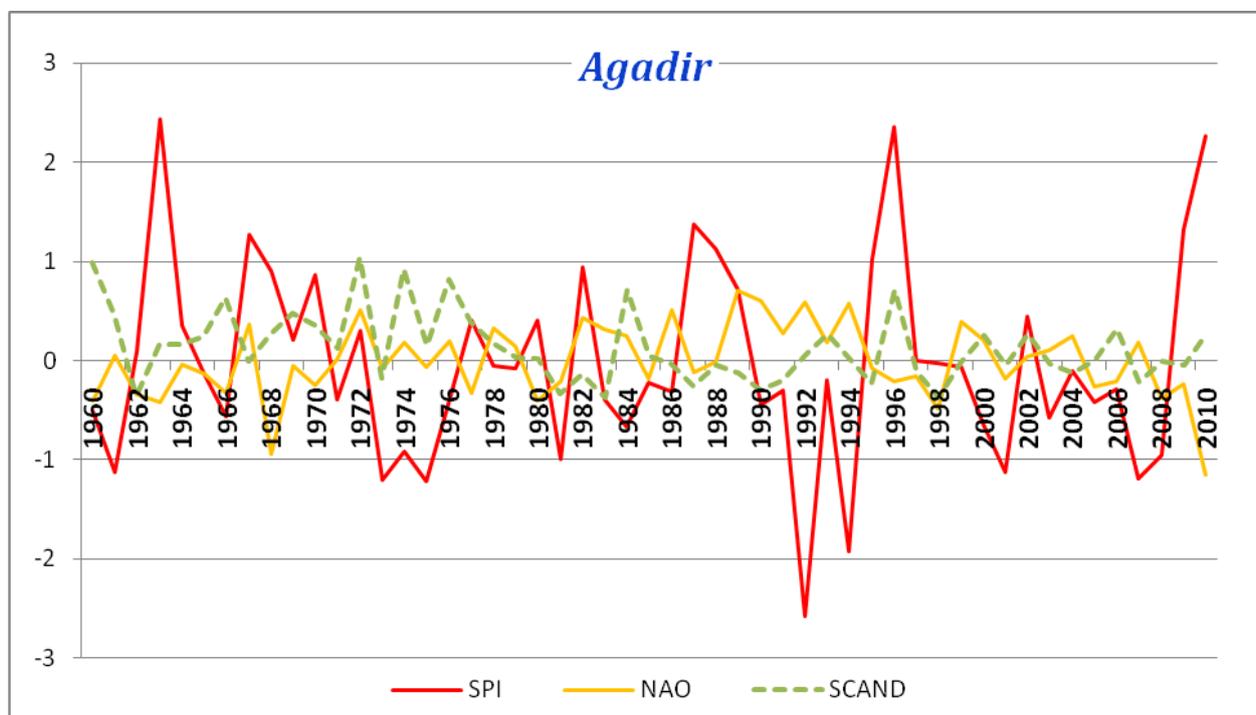


Figure 17: Evolutions des indices de NAO et SCAND avec l'indice SPI des précipitations d'Agadir à l'échelle annuelle au cours de la période de 1960-2010

Les variations hivernales de l'indice SPI des précipitations à Agadir au cours de la période d'étude ont montré que les épisodes de 1961/1966/1967/1984/1989/1994/1995/2000/2007/2008 présentent les hivers secs de la période 1960-2010. La plupart de ces hivers secs à Agadir coïncident avec des valeurs positives de NAO. Durant la phase positive de NAO, les précipitations se trouvent alors réduites sur le Maroc comme sur le sud de l'Europe. Avec un calcul simple on trouve que 90% de ces épisodes hivernaux secs à Agadir coïncident avec la phase positive du mode NAO. Alors que seulement 50% de ces épisodes secs sont liés à la phase positive du mode SCAND.

A l'échelle annuelle, l'indice SPI a montré que les années de 1961/1973/1975/1981/1992/1994/2001/2007 sont des années sèches à Agadir. Seulement 37% de ces périodes coïncident avec les phases positives de NAO et SCAND, ce qui explique la réduction de la pluviométrie au cours de ces périodes ceci est aussi expliqué par l'effet réduit de ces modes en dehors de l'hiver.

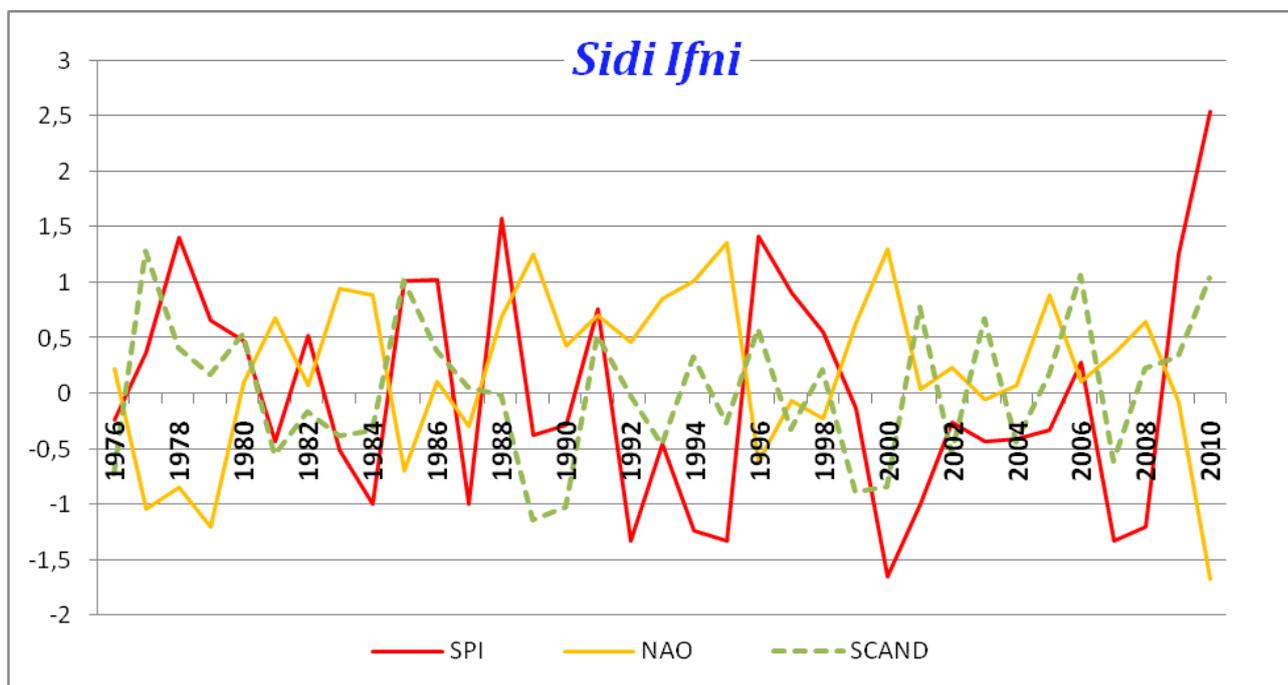


Figure 18 : Evolutions des indices NAO et SCAND avec l'indice SPI des précipitations de Sidi Ifni pour la saison d'hiver au cours de la période 1975-2010.

Les tendances hivernales de l'indice SPI des précipitations à Sidi Ifni au cours de la période de 1975-2010 ont montré que les hivers secs dans cette station coïncident avec les périodes de 1992/1994/1995/2000/2007/2008. Ces épisodes secs correspondent à 100% à la phase positive de NAO et 66% à la phase positive de SCAND ce qui permet d'expliquer une bonne partie des déficits pluviométriques au cours de ces périodes.

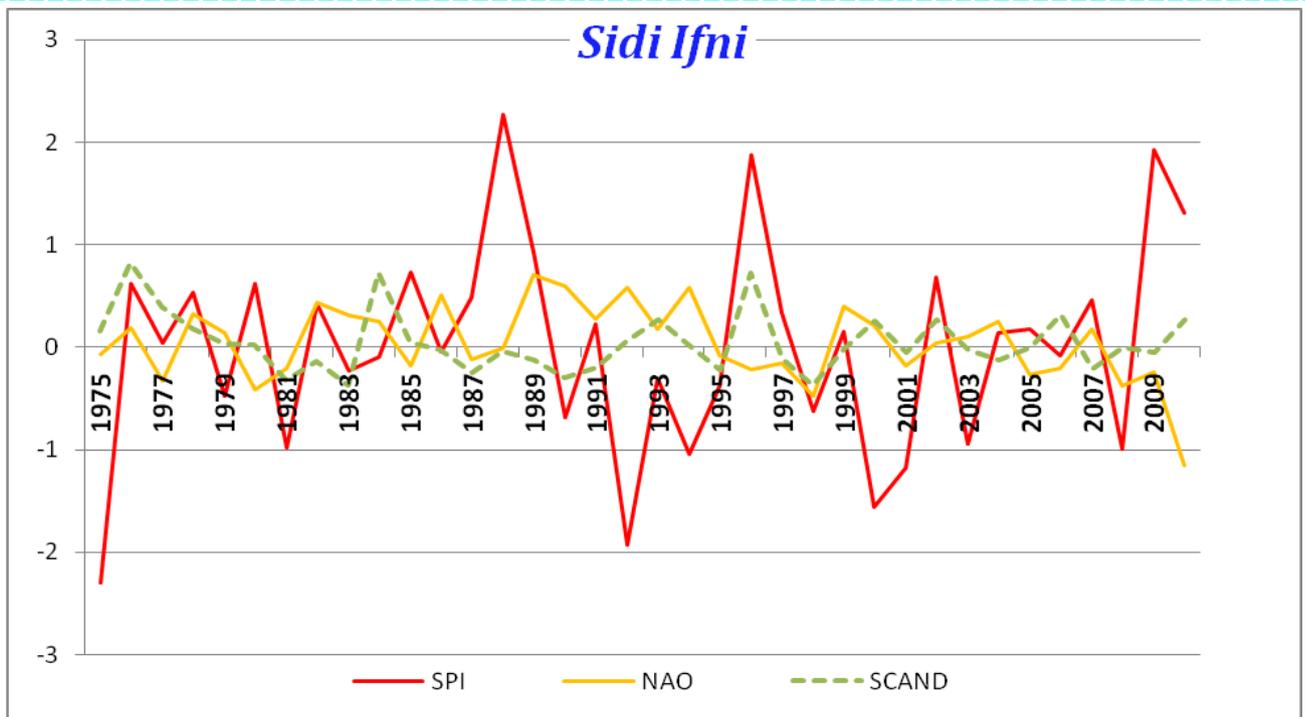


Figure 19 : Evolutions des indices de NAO et SCAND avec l'indice SPI des précipitations de Sidi Ifni à l'échelle annuelle pour la période de 1975-2010

A l'échelle annuelle, l'indice SPI a montré que les années sèches à Sidi Ifni correspondent aux années 1975/1992/1994/2000/2001/2008, dont 50% coïncident avec la phase positive de NAO et 83% avec la phase positive de SCAND.

L'analyse de composite nous a donc permis de conclure que la phase positive du mode NAO coïncide assez fréquemment avec des déficits pluviométriques à l'ouest de la région de Souss Massa Draa.

**PARTIE II :**

**IMPACTS DE LA SECHERESSE METEOROLOGIQUE  
SUR LES RESSOURCES EN EAU AU BASSIN VERSANT  
SOUSS-MASSA**

# Chapitre 1 : Vulnérabilité des eaux de surfaces face aux extrêmes pluviométriques (sécheresse)

## I. Les ressources en eau de la région et problématique posée :

### 1. Problématique hydrique de Souss Massa:

L'eau représente un défi majeur pour le développement économique dans le Souss Massa. Il y a d'abord une forte augmentation de la consommation de l'eau dans la région, due au développement explosif de l'agriculture, notamment depuis les années 70.

De ce fait, il en découle une forte dépendance de l'agriculture de la disponibilité des eaux souterraines. Vient ainsi une surexploitation de la nappe phréatique au delà des capacités de recharge avec par conséquent un abaissement du niveau piézométrique (environ 2 m/an) et un assèchement des puits moins profonds. La situation de l'eau dans le Souss Massa est devenue très critique au point de menacer sérieusement le développement agricole : pluviométrie très faible rendant le problème de la sécheresse structurelle (Mohamed RIAL 2007).

Pour la région Souss-Massa, la problématique hydrique est un défi majeur car les ressources en eau jouent un rôle primordial dans l'économie de la région qui connaît un essor économique important et qui risque d'être compromis par l'insuffisance des ressources phréatiques locales, sachant que cette région est le deuxième pôle économique national.

Dans la plaine du Souss, la production agricole occupe une place de choix avec en particulier 42% de la production d'agrumes et 47% des exportations, et 62% de la production maraîchère et 34% des exportations. La demande globale en eau se trouve ainsi en constante augmentation, d'autant plus que l'agriculture en est la première consommatrice.

Selon des chiffres communiqués par l'Agence du bassin hydraulique de Souss-Massa (ABHSM), l'agriculture dans cette région absorbe à elle seule plus de 90% de la demande totale, tous bassins confondus et la surexploitation de la nappe phréatique au-delà de ses capacités de recharge a en effet causé un déficit de 260 millions de m<sup>3</sup>. Dans la région de Tiznit, la demande en eau pour la superficie irriguée à partir des eaux pérennes, soit les puits et les sources, est estimée à 26 millions de m<sup>3</sup>. Les ressources hydriques de la province sont assurées par les eaux profondes présentes dans les 271 sources de la zone. Ces eaux sont utilisées pour l'irrigation de près de 5.300 ha. D'un autre côté, il y a également les eaux des crues, considérées comme ressource hydrique importante au niveau de la plaine de Tiznit et autour des oueds notamment Assaka, Adoudou et Sidi Ifni et leurs affluents. La superficie irriguée par cette ressource oscille entre 20.000 et 25.000 ha.

Vu la raréfaction des ressources en eau dans le Souss-Massa et vu la demande croissante en eau potable et industrielle liée à l'accroissement démographique, à la promotion du secteur touristique et à l'essor économique que connaît la région, il est impératif de ne prévoir aucune extension, voire même de

réduire les superficies irriguées dans le futur. C'est ce que prévoit l'étude de révision du Plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau (PDAIRE).

La sécheresse, devenue un phénomène structurel, a aggravé la situation et imposé aux acteurs locaux de recourir aux nappes souterraines pour répondre aux besoins croissants en matière d'eau dans le secteur agricole. Ceci a entraîné une baisse notable de la nappe phréatique estimée à 30 mètres au niveau de Souss Al-Alia, 75 m à Souss Al-ousta et 27 m à Souss Assoufla (ABHSM).

Plusieurs facteurs affectent également les ressources en eau de la région dont les rejets domestiques et agricoles, l'accroissement des besoins en eau dans les périmètres urbains, la non généralisation du procédé du goutte-à-goutte en matière d'irrigation et l'insuffisance du volume des eaux de surface mobilisées.

Le présent chapitre a pour objectif de faire le point sur la situation actuelle des ressources en eau souterraine et de surface et l'état de leur mobilisation dans la région de Souss-Massa, de dresser les conséquences néfastes de la sécheresse et la surexploitation et de proposer un plan d'action participatif pour une meilleure gestion de cette ressource et sa préservation afin d'assurer un développement durable de la région.

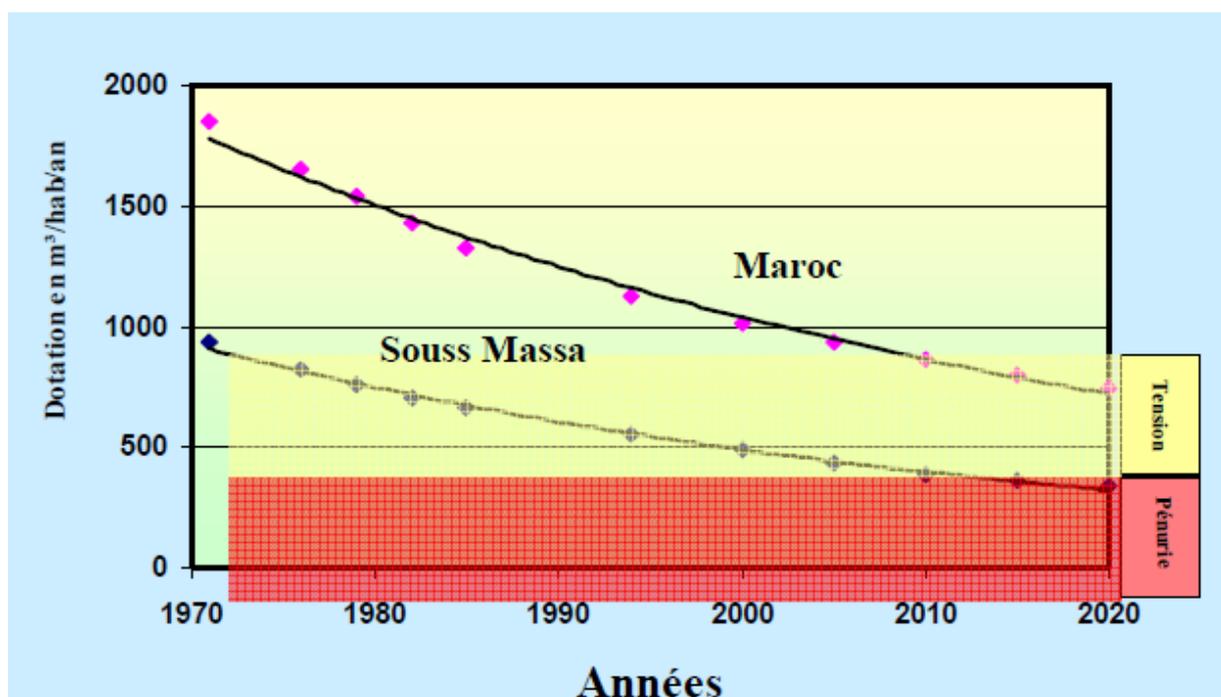


Figure 20: situation hydrique de Souss Massa Draa (ABHSM PLAN D'ACTION 2005-2020)

## 2. Les ressources en eau superficielle :

Les ressources en eau de surface sont limitées et très irrégulières. Les débits des oueds présentent une forte irrégularité interannuelle. Ils ne sont pérennes que sur leurs cours de montagne et de piémont et ne coulent que pendant de courtes périodes où surviennent des crues, parfois rapides et violentes. L'apport moyen en eau de la région est évalué à 600 Mm<sup>3</sup>/an. Il varie entre un minimum de 35 Mm<sup>3</sup> (1960-61) et un maximum de 2160 Mm<sup>3</sup> (1962-63). L'apport moyen des années marquées par la sécheresse peut, en effet, ne présenter que moins de 10% de l'apport moyen annuel de la région (Ministère délégué auprès du Ministre de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement- chargé de l'Eau) .

### → *Le Bassin du Souss*

Les principaux affluents drainés par l'oued Souss sont ceux de la rive droite, dont les plus importants sont l'oued Issen et ceux du Haut Souss. Le régime hydrologique de l'oued Souss est caractérisé par une forte irrégularité saisonnière et interannuelle. Le maximum des apports intervient pendant les mois de Janvier, Février et Mars et le minimum est observé en Août. L'apport moyen du bassin du Souss est évalué à 390 Mm<sup>3</sup>/an. Au niveau du barrage Aoulouz, il est de 170 Mm<sup>3</sup>/an.

### → *Le Bassin du Massa*

Le bassin du Massa est drainé par les oueds d'Amaghous et d'Assaka, qui prennent tous deux naissance dans la partie atlantique de l'Anti-Atlas. Les apports moyens annuels de l'oued Massa sont évalués à 130 Mm<sup>3</sup>. La crue historique maximale observée en décembre 1957 a atteint un débit de pointe de 2.800 m<sup>3</sup>/s et un volume de 300 Mm<sup>3</sup> en 6 jours. La crue maximale observée en 1996 a atteint un débit d'environ 1.020 m<sup>3</sup>/s et un volume de 175 Mm<sup>3</sup>.

### → *Les Bassins côtiers*

Les bassins côtiers atlantiques sont drainés par deux principaux oueds, le Tamri et le Tamraght, qui prennent leur source dans le Haut-Atlas Occidental. Les apports moyens annuels sont évalués à 65 Mm<sup>3</sup> pour l'oued Tamri et 22 Mm<sup>3</sup> pour l'oued Tamraght. En 1983, la crue historique maximale observée sur l'oued Tamri a atteint un débit de pointe de 1.700 m<sup>3</sup>/s et un volume de près de 60 Mm<sup>3</sup>. Par contre, la crue de 1996, a connu un débit de 1.240 m<sup>3</sup>/s et un volume de 52 Mm<sup>3</sup>.

### → *Le bassin de Tiznit-Adoudou*

Les apports moyens annuels du Bassin Adoudou, évalués à 8.7 Mm<sup>3</sup> ; sont marqués par l'irrégularité dans le temps et dans l'espace. Les apports moyens des bassins complémentaires N'Baye et Içoh sont respectivement de 1.3 Mm<sup>3</sup> et 0.6 Mm<sup>3</sup> par an.

### → *Le bassin de Sidi Ifni :*

Les apports moyens annuels du bassin de Sidi Ifni sont évalués à 6.15 Mm<sup>3</sup> par an.

Tableau 18: Répartition des apports en eau de surface par bassin (ABHSM)

Bassin	Apports annuels moyens (Mm <sup>3</sup> )
Souss	422
Massa	138
Tamraght	25
Tamri	50
Adoudou-Tiznit	10,6
Sidi Ifni	6,15
Total	652

Dans cette partie d'étude de l'impact de la sécheresse météorologique sur des eaux de surface en va travailler seulement sur les deux bassins Souss et Massa en raison de manque de données sur le bassin versant de Draa.

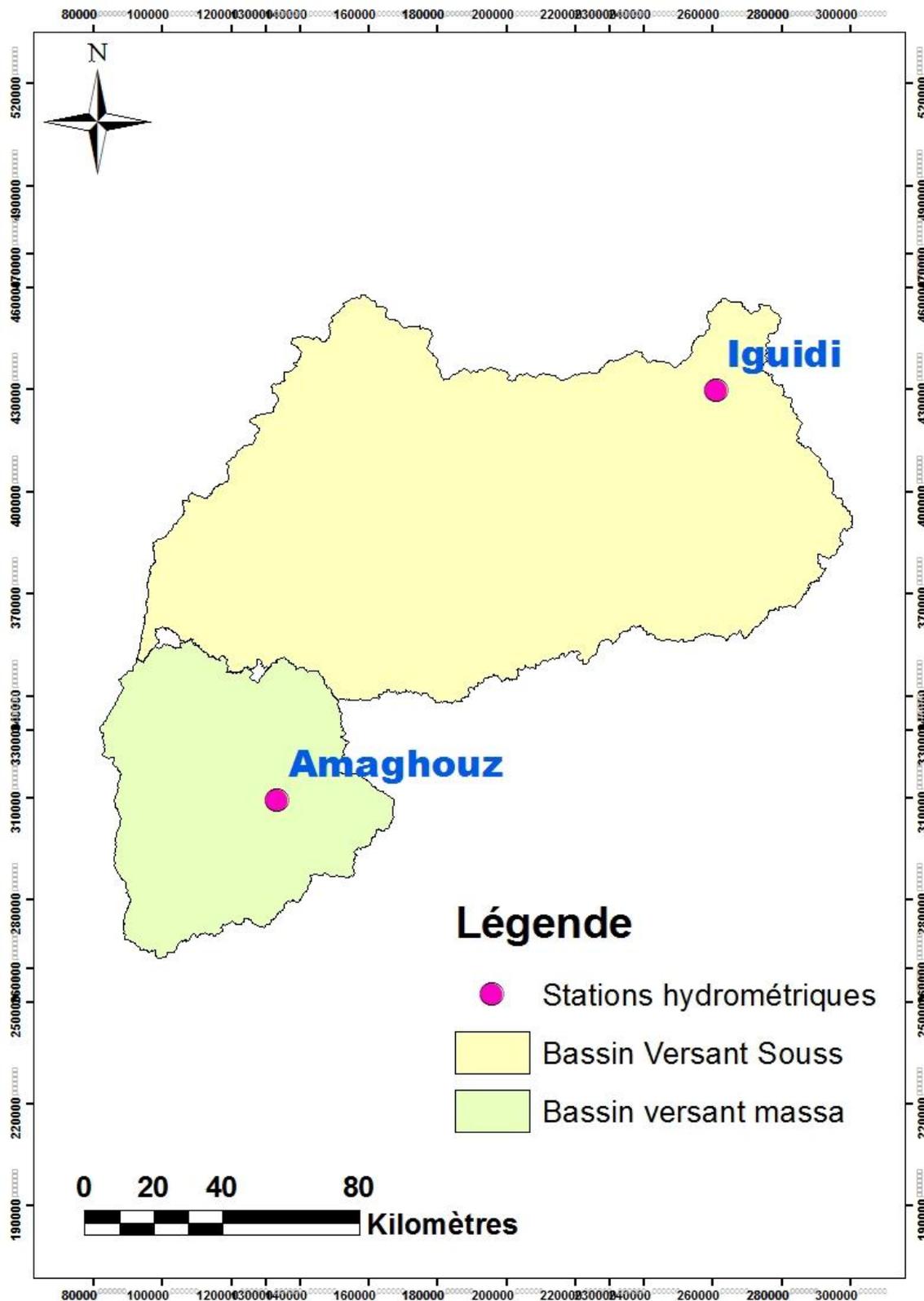


Figure 21: Carte des bassins versants: Souss et Massa

## II. Étude hydro-morphologique des bassins versants de Souss et Massa :

### 1. Morphologie du bassin versant de Souss :

#### a. Réseau hydrographique :

Les principaux affluents drainés par l'oued Souss sont ceux de la rive droite, dont les plus importants sont l'oued Issen et ceux du Haut Souss. Le réseau hydrographique du bassin est très dense. C'est une densité assez importante pour un milieu semi-aride et qui permettra une collecte aisée des eaux de pluie et un acheminement important des ruissellements vers l'exutoire.

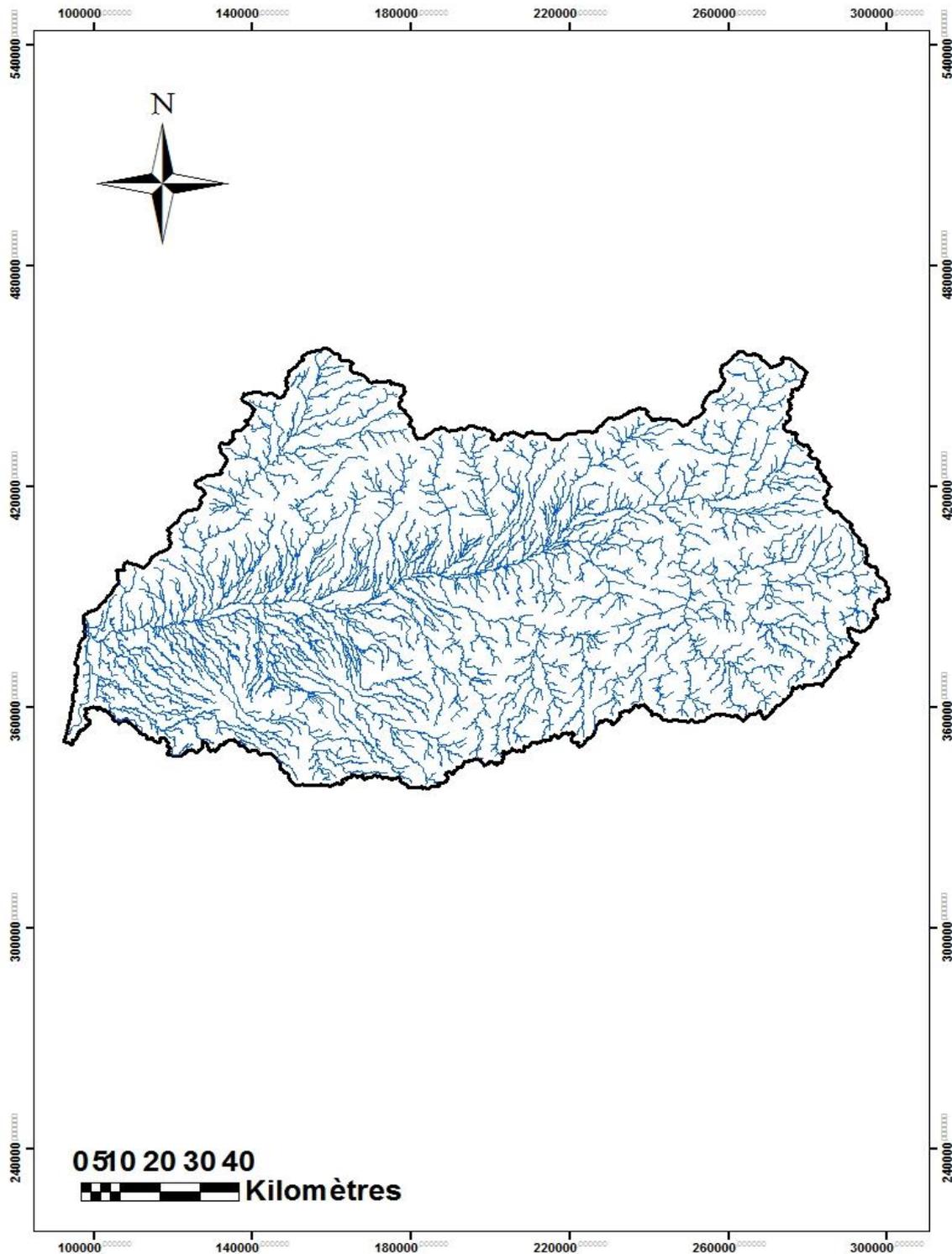


Figure 22: Carte du réseau hydrographique du bassin versant de souss à l'embouchure.

**b. La carte hypsométrique :**

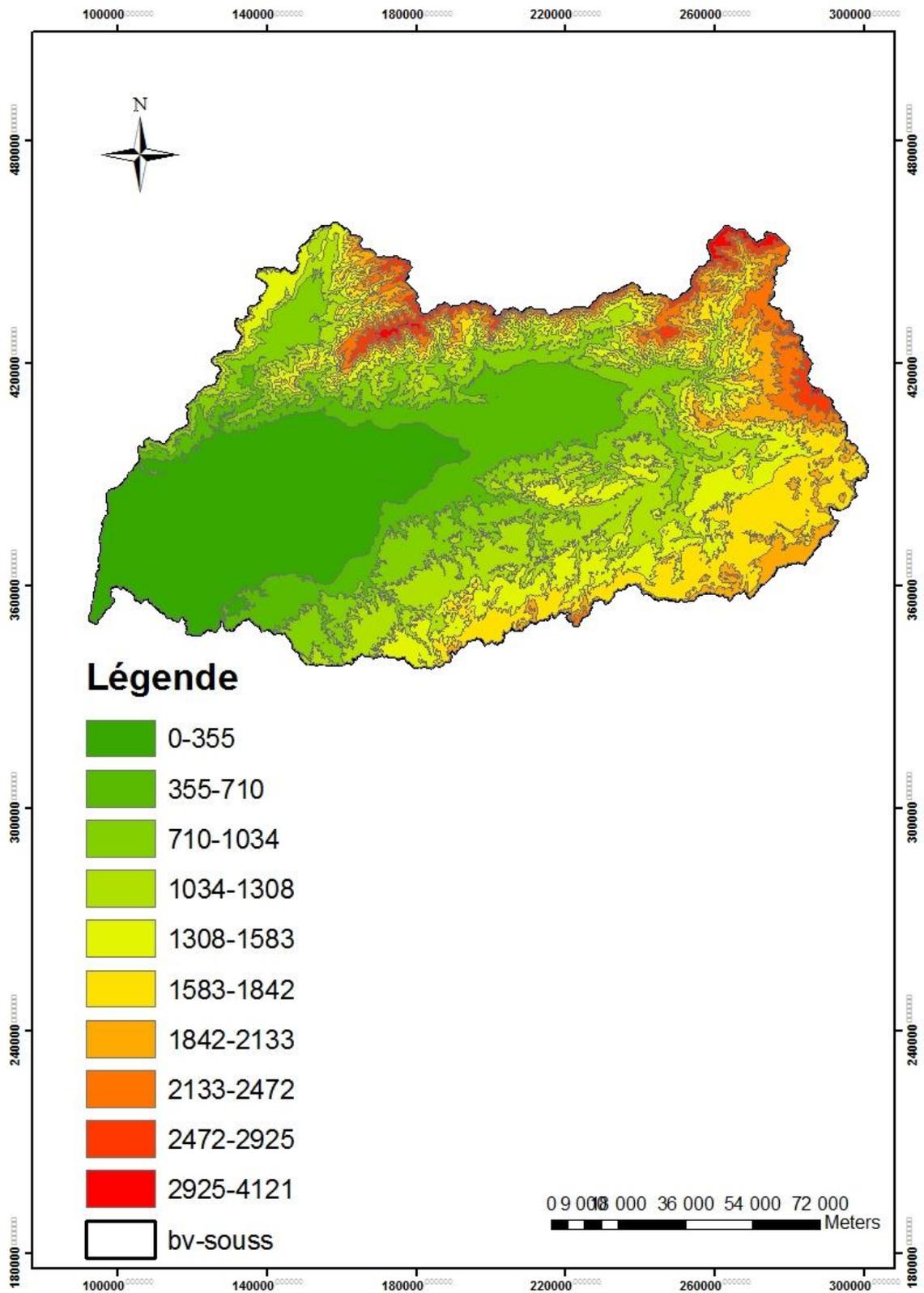


Figure 23: Carte hypsométrique du bassin versant de Souss

c. La carte des pentes :

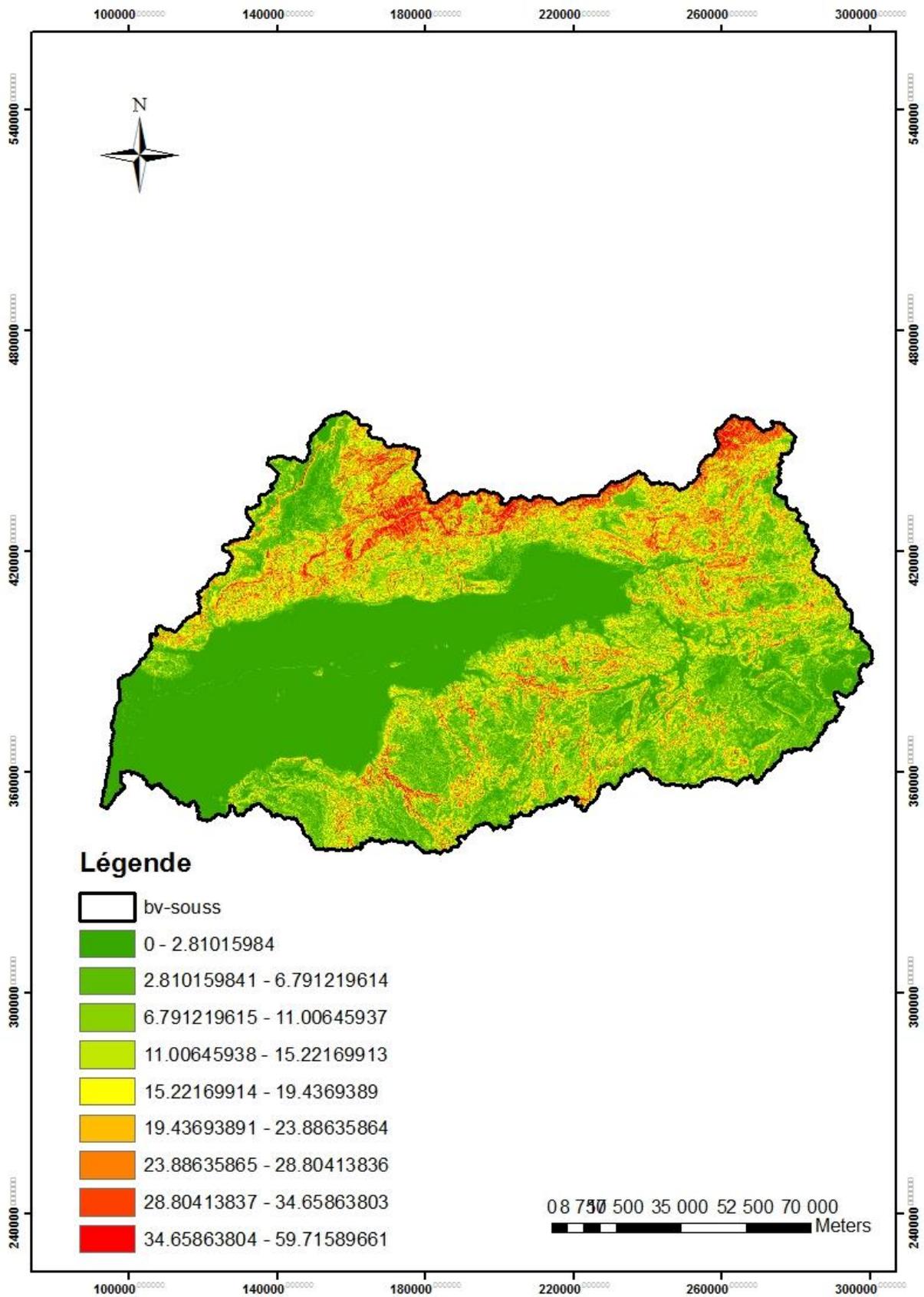


Figure 24: Carte des pentes (en degrés) du bassin versant de Sous

Vu que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont fonction de l'altitude, il est intéressant d'étudier l'hypsométrie du bassin versant par tranche d'altitude (fig. 23). D'après cette carte

on remarque que les basses altitudes couvrent presque la totalité du bassin versant, cette partie du bassin est caractérisée par des faibles pentes (fig. 24). Alors que les altitudes qui sont relativement élevées (tranches d'altitudes plus sèches) occupent seulement la partie Nord-Est du bassin qui présente des fortes pentes (fig. 24).

## 2. Analyse des débits et le régime hydrologique du bassin :

### a. Débits moyens mensuels

Les débits sont généralement faibles (fig. 25), avec un régime très irrégulier au cours de l'année. Ils commencent à augmenter à partir du mois d'Octobre (premiers précipitations) pour atteindre le maximum au mois de Février (hiver). Pendant les mois de l'hiver, les cours d'eau recueillent les précipitations importantes et engendrent une augmentation du débit qui se poursuit au mois de Mars et Avril (printemps) avec la fonte des neiges. Au cours des mois d'été, les débits diminuent brutalement (période d'étiage) et les oueds sont pratiquement à sec.

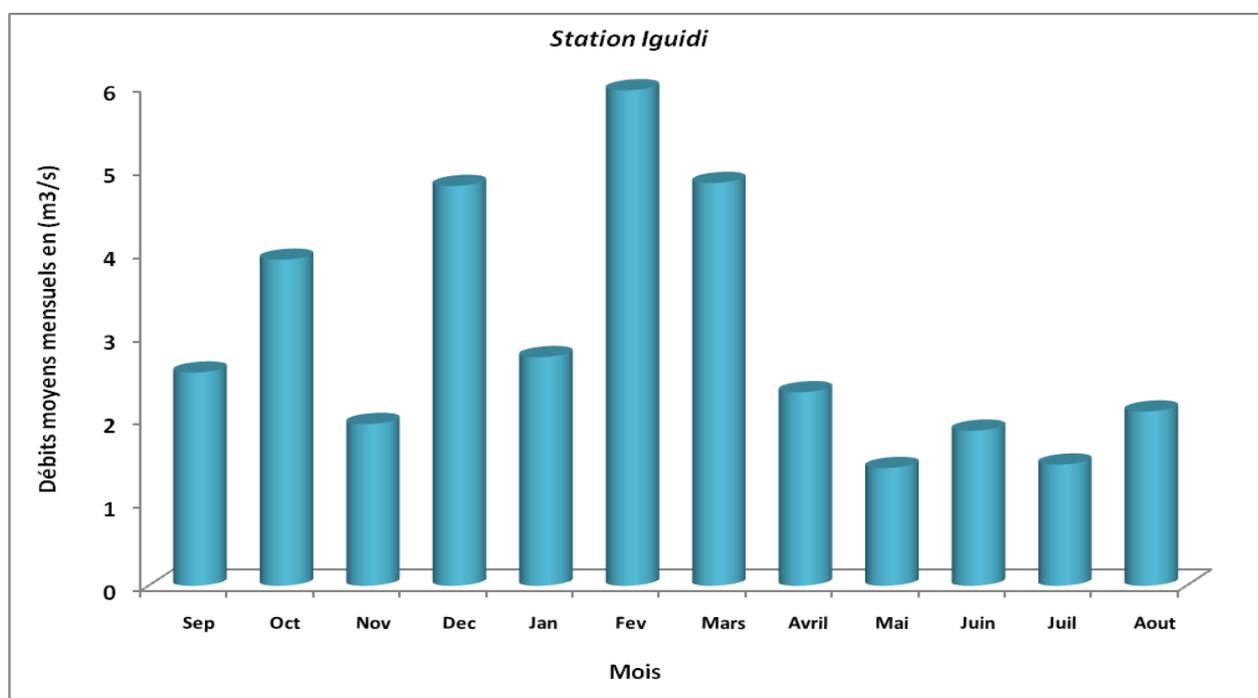


Figure 25 : Débits moyens mensuels (interannuels) au niveau du bassin versant de Souss

### b. Débits moyens saisonniers

Pour les débits moyens saisonniers nous constatons une augmentation importante de l'automne à l'hiver (période pluvieuse), par une remontée rapide du débit à son pic en hiver avant de régresser à des valeurs plus bas en printemps et en été. Ces observations montrent que le régime hydrologique du bassin versant est très vulnérable aux précipitations.

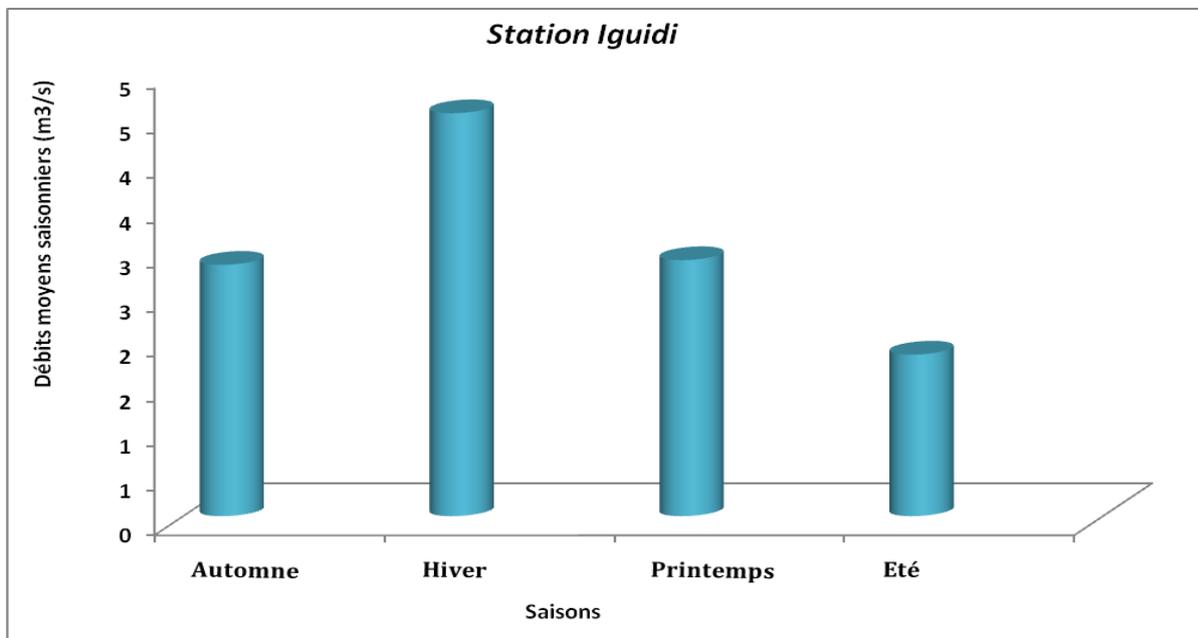


Figure 26 : Débits moyens saisonniers (interannuels) au niveau du bassin versant de Souss

### c. Débits moyens annuels

Le régime annuel est très irrégulier d'une année à l'autre. A partir des années 1990-91, nous remarquons une chute des débits à des valeurs plus bas jusqu'à les années 2007-08. Cette période sèche correspondant généralement aux périodes de sécheresse qui ont sévi dans la région.

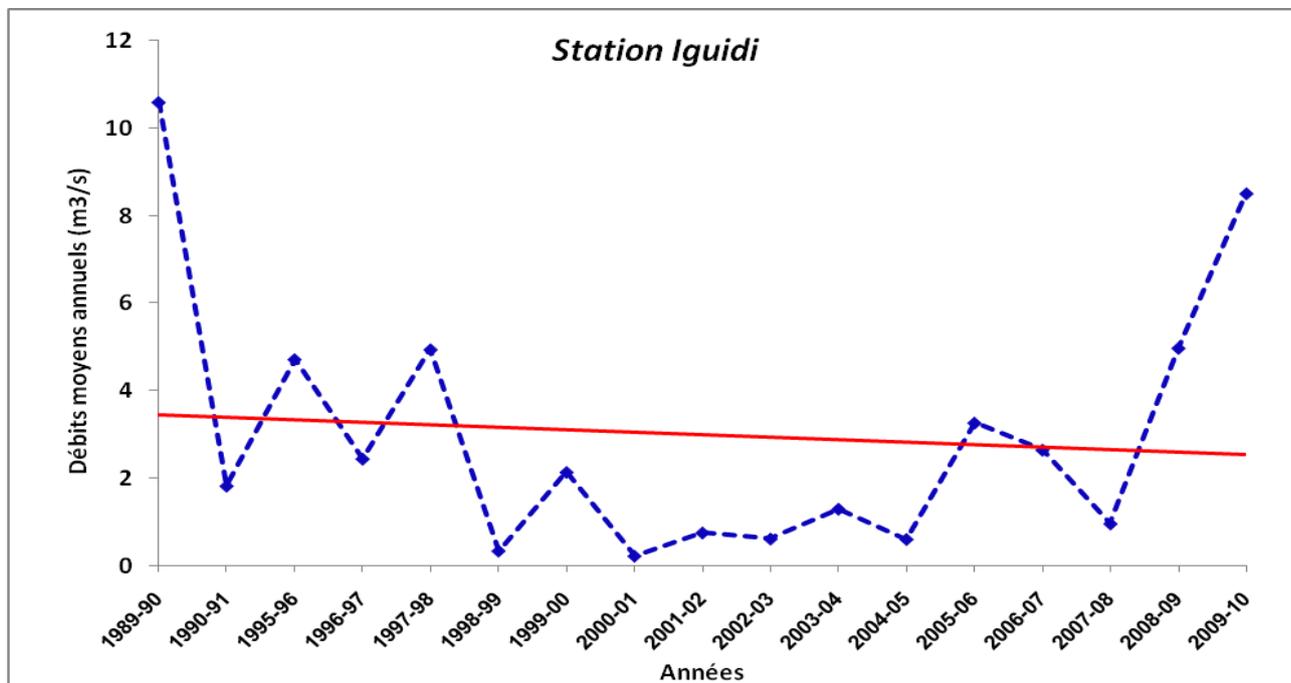


Figure 27 : Débits moyens annuels au niveau du bassin versant de Souss

### 3. Morphologie du bassin versant de Massa :

#### a. Le réseau hydrographique :

Le bassin versant de Massa est drainé par les oueds d'Amaghous et d'Assaka, qui prennent tous deux naissance dans la partie atlantique de l'Anti-Atlas. Le réseau hydrographique du bassin (fig.28) est caractérisé par une forme arborescente et dendritique (très ramifiée), ce qui pourrait accentuer la brutalité des crues.

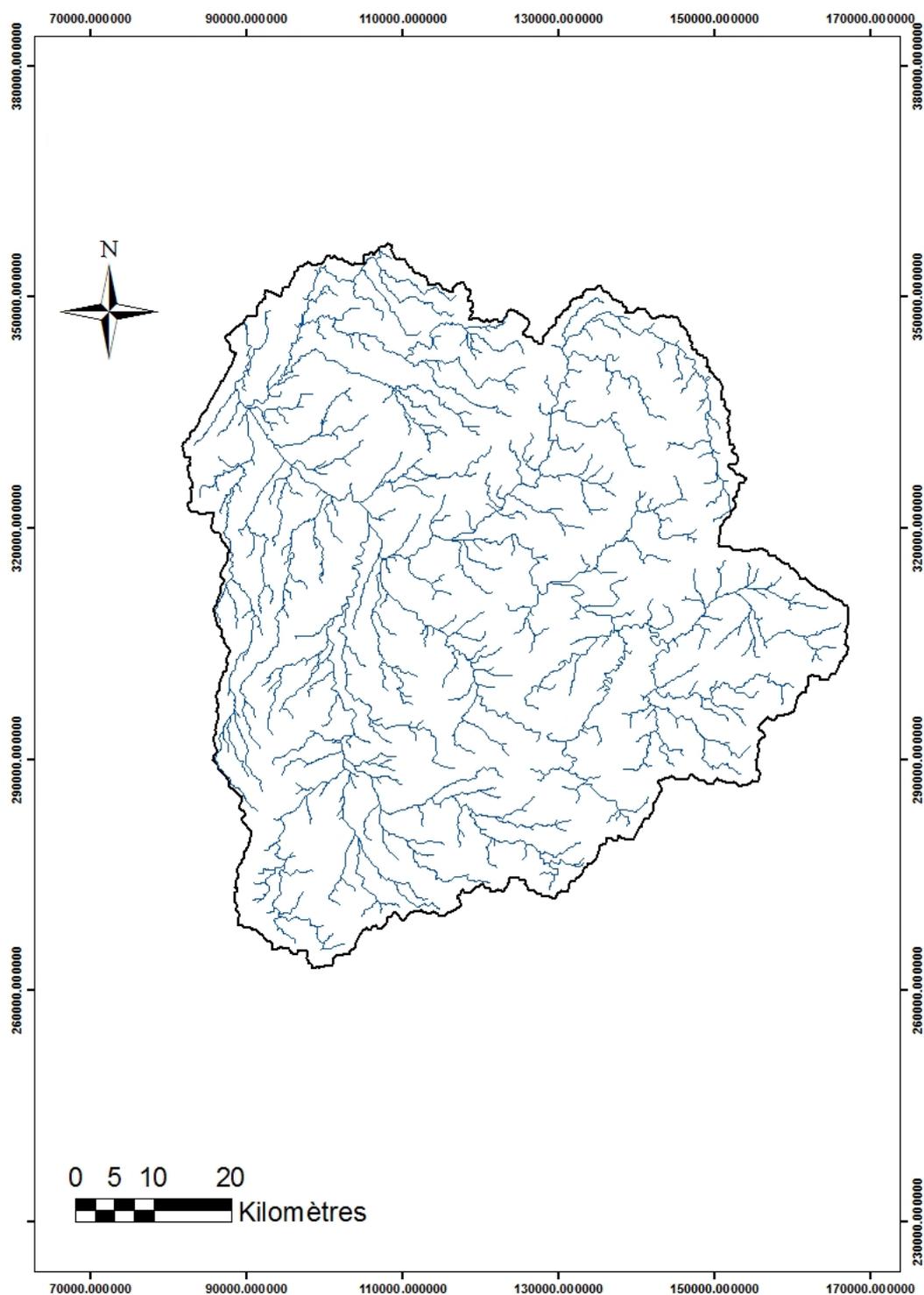


Figure 28 : Carte du réseau hydrographique du bassin versant de Massa à l'embouchure

b. La carte des pentes :

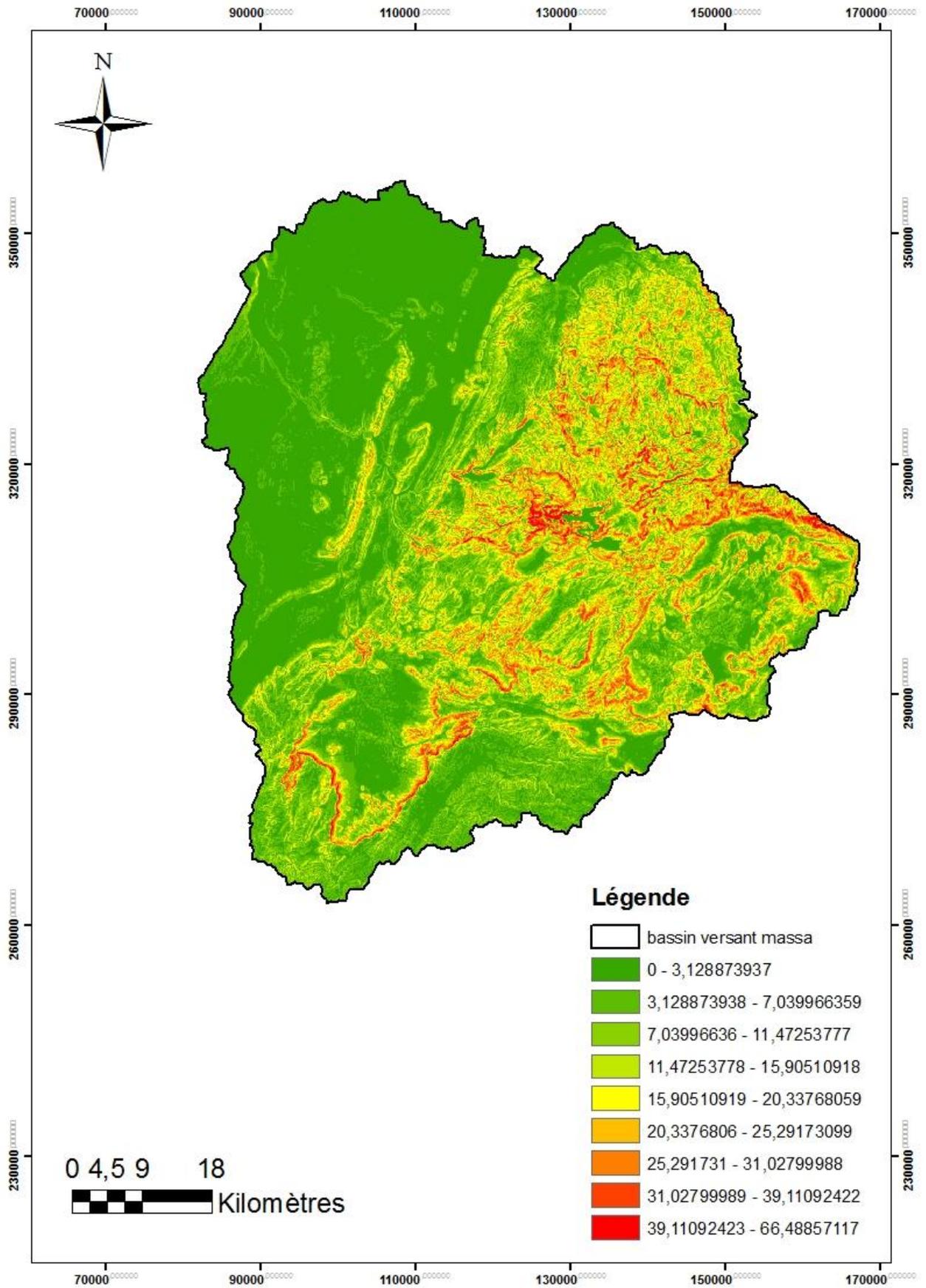


Figure 29 : Carte des pentes (en degrés) du bassin versant de Massa

c. La carte hypsométrique :

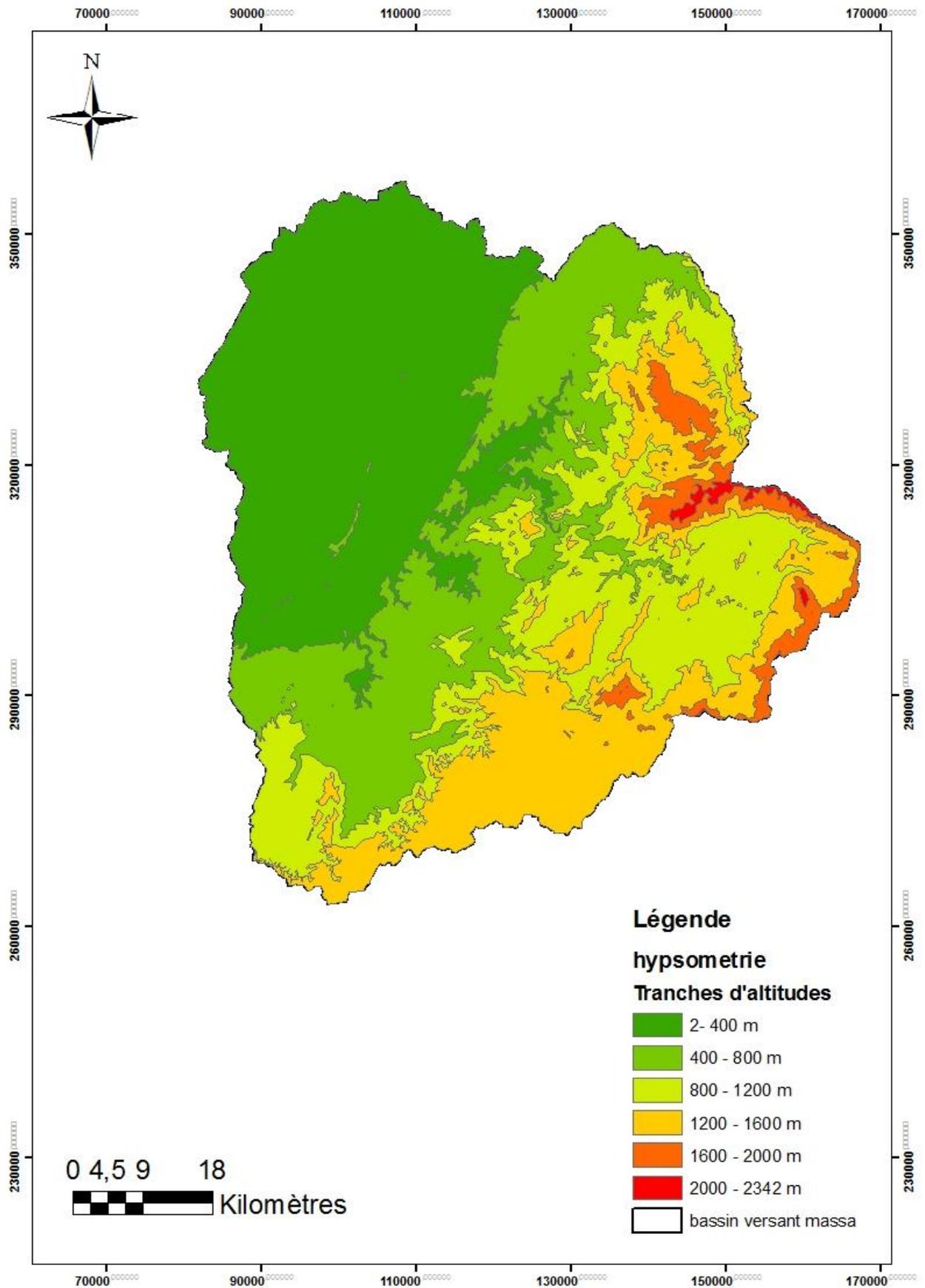


Figure 30: Carte hypsométrique du bassin versant de Massa

La répartition du bassin versant par tranches d'altitude donne une importance capitale pour les études hydrologiques du fait que la plupart des facteurs météorologiques et hydrologiques sont influencés par l'altitude.

La figure 30 illustre cette carte. Elle met en lumière une répartition différentielle des tranches d'altitudes. Les tranches [2-400], [400-800] occupent à elle seuls plus que la moitié du bassin versant. Cette partie du bassin est caractérisée par une pente assez faible (figure 29) à l'opposée de la seconde partie au-delà de 800 m, les tranches d'altitudes sont plus serrées mettant en évidences des dénivellations et des pentes importantes.

#### 4. Analyse des débits du bassin et le régime hydrologique:

##### I. Débits moyens mensuels

La figure (31) présente la variation des débits moyens mensuels (interannuels) du bassin de Massa à la station Amaghous, on remarque que ces débits sont importants seulement pendant la période pluvieuse (Hiver) à l'exception d'une anomalie du moi de Décembre causé par une manque de précipitation au cours de ce mois, alors que durant le printemps les débits commencent à diminuer jusqu'à ce qu'ils atteignent des valeurs très faible en été (période sèche).

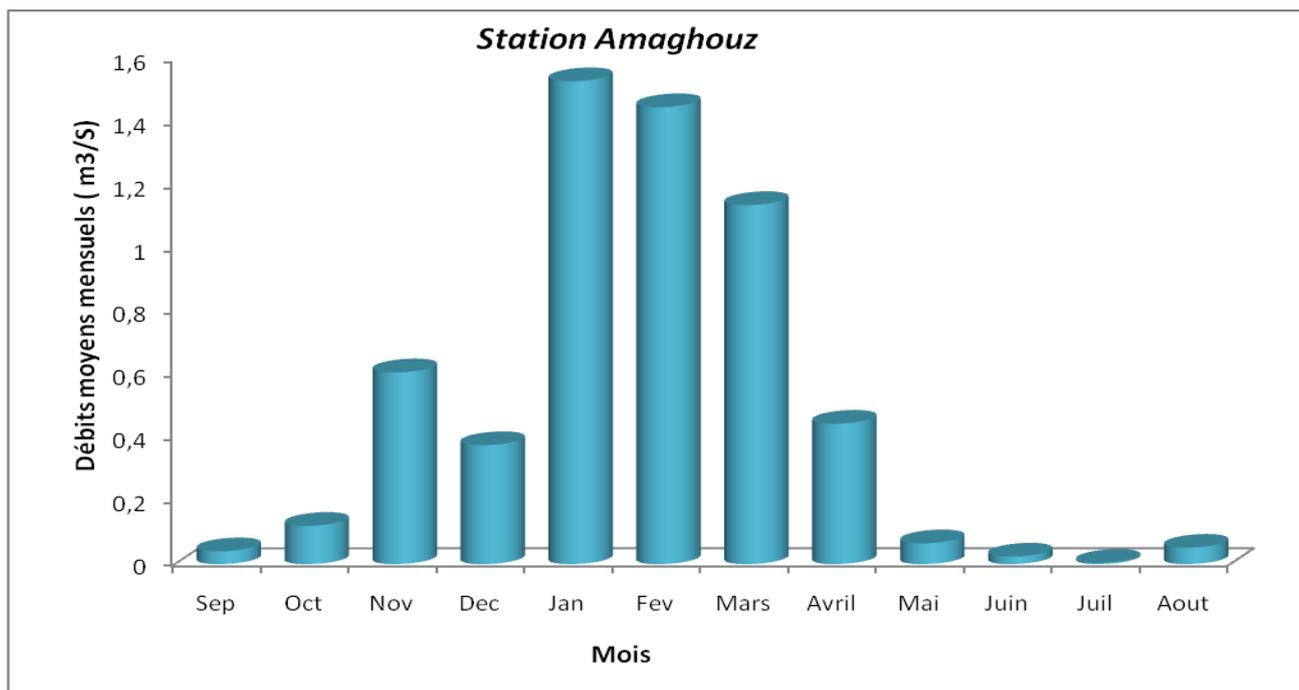


Figure 31: Débits moyens mensuels (interannuels) au niveau du bassin de Massa

##### II. Débits moyens saisonniers

Pour ce qui est le débit moyens saisonniers du bassin versant on constate que les débits atteignent leurs valeurs maximales en l'hiver, cette augmentation est en relation directe avec la pluviométrie. Ensuite les débits commencent à s'abaisser au cours du printemps pour atteindre des valeurs plus faible en période sec.

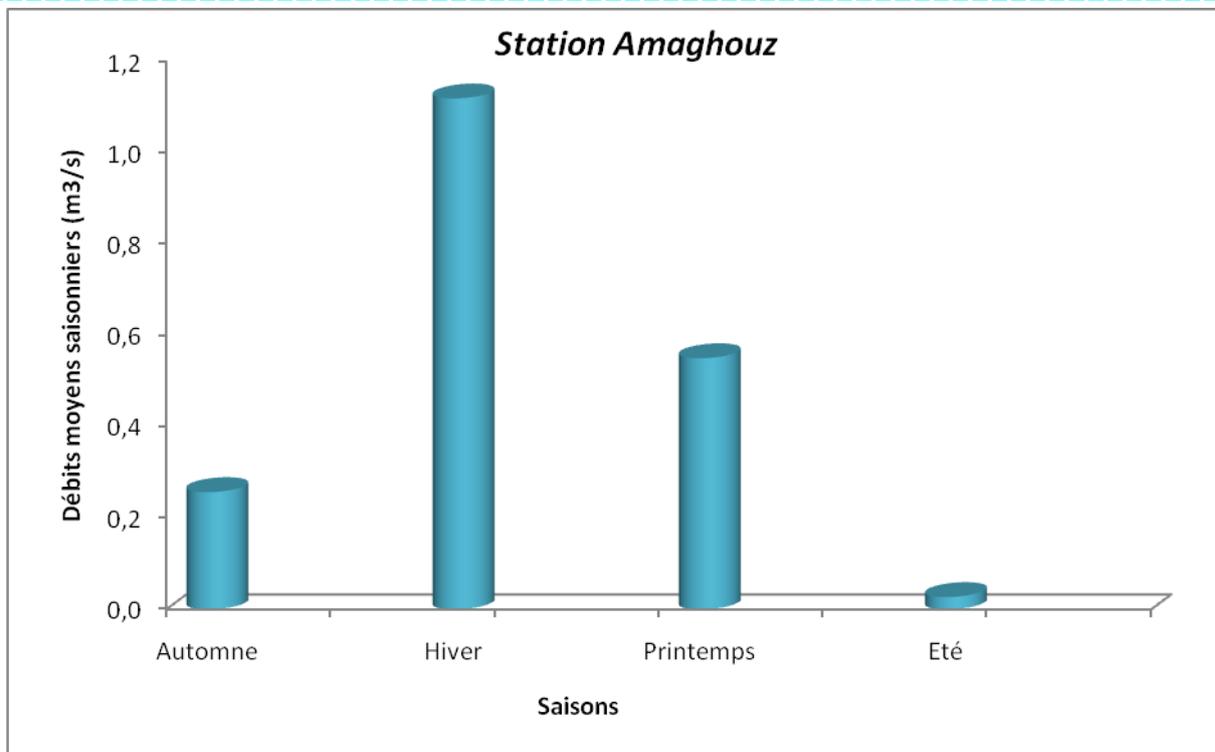


Figure 32: Débits moyens saisonniers au niveau du bassin versant de Massa

### III. Débits moyens annuels

La variation des débits annuels pour le bassin de Massa s'affichent avec un maximum qui correspond à l'année 1995-96 (période pluvieuse). Par contre les autres périodes sont plutôt sèches et correspondant généralement aux périodes de sécheresse qui ont sévi dans la région.

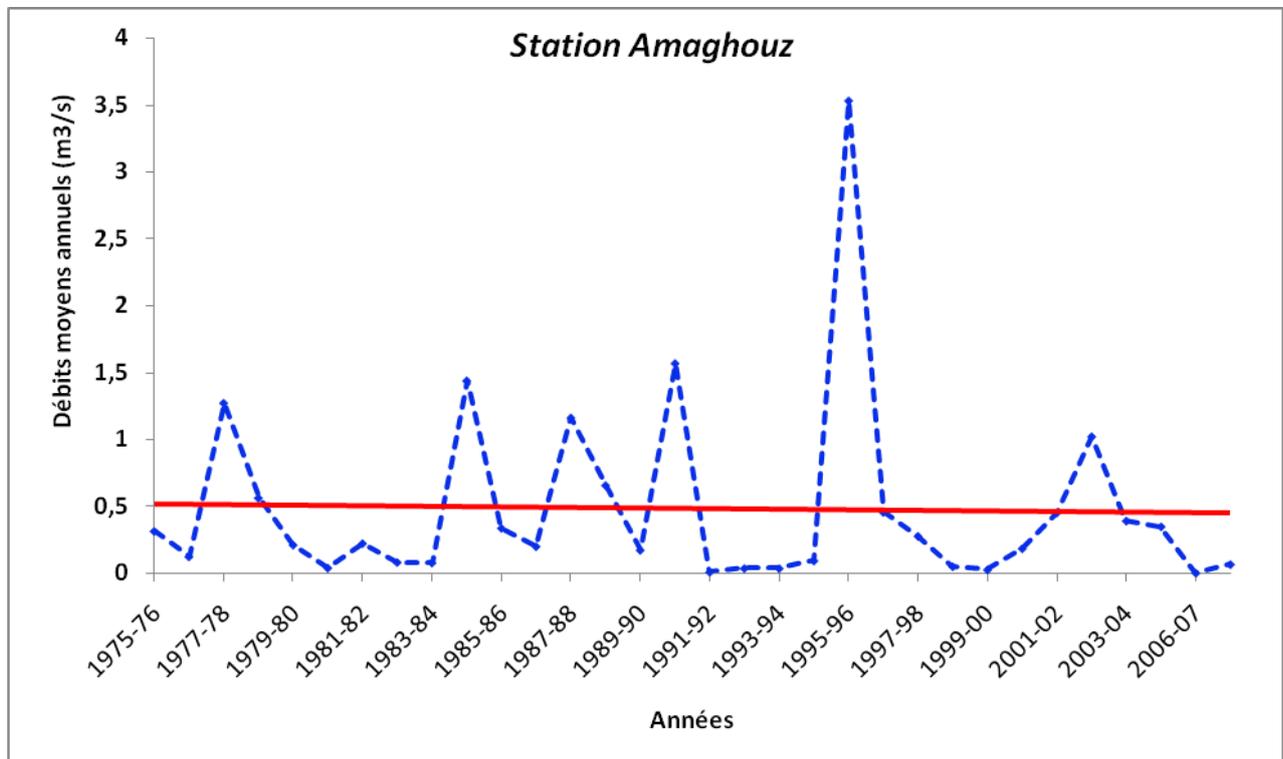


Figure 33: Débits moyens annuels au niveau du bassin versant de Massa

## Chapitre 2 : Dynamique des réservoirs d'eaux souterraines de la région face à la sécheresse :

### I. Les ressources en eau souterraines du bassin Souss-Massa-Draa:

La zone dispose de nappes souterraines importantes dont le recours permet la satisfaction de plus de 70% des besoins exprimés. Parmi ces nappes, on distingue :

- La nappe du Souss ;
- La nappe de Chtouka ;
- La nappe de Tiznit ;
- La nappe de Sidi Ifni ;

#### 1. La nappe du Souss

Le bassin hydrogéologique de la nappe du Souss s'étend sur, une superficie de 4.150 km<sup>2</sup>. Il est limité au Nord par le Haut Atlas, au Sud par l'Anti-Atlas et débouche à l'Ouest sur l'Océan Atlantique. Constituée par les formations de remplissage de la vallée dont l'âge va de l'Eocène au quaternaire, elle constitue le réservoir phréatique le plus important du pays et joue un rôle primordial dans le développement économique et social de la région du Souss. La baisse que connaît la piézométrie de cette nappe, en raison de la surexploitation par puits et forages et de la sécheresse qui sévit dans la région depuis les années 1970, s'est traduite par l'assèchement progressif des résurgences, des sources et des khattaras. Actuellement, la contribution de la nappe dans le débit de base de l'Oued Souss est négligeable alors qu'elle était importante durant la période 1950-1970. La baisse moyenne du niveau piézométrique engendrée varie entre 0.5 m/an et 3 m/an.

#### 2. Nappe des Chtouka

La plaine des Chtouka, qui s'étend sur une superficie de plus de 940 km<sup>2</sup>, constitue une extension de la plaine du Souss vers le Sud-Ouest. Elle est limitée au Nord par la route d'Agadir- Biougra, à l'Est par les affleurements des formations primaires de l'Anti-Atlas, au Sud par l'Oued Massa et à l'Ouest par l'Océan. L'analyse du bilan permet de constater que la nappe de Chtouka est également déficitaire. Le déficit est actuellement de près de 60 Mm<sup>3</sup>.

#### 3. Nappe de Tiznit

La nappe de Tiznit circule dans des formations attribuées au quaternaire, c'est une nappe non généralisée, où l'eau circule par endroit à travers des karsts.

La recharge de la nappe s'opère par infiltration des eaux de pluies et des eaux de crues et par abouchement avec les nappes profondes, avec un volume moyen annuel de l'ordre de 13.7 Mm<sup>3</sup>.

Les niveaux d'eau par rapport au sol sont relativement stables du fait de l'équilibre entre les apports de recharge et le volume d'eau utilisé par les sources, khattaras et puits.

#### 4. Nappe de Sidi Ifni

C'est une nappe de moindre importance à cause de son extension limitée d'une part et de la faiblesse de ses ressources à cause de sa lithologie (formation de socle) et de sa qualité caractérisée par la salinité élevée d'autre part, ce qui limite son exploitation de façon appropriée.

Pour étudier l'impact de la sécheresse météorologique sur les eaux souterraines, le choix des nappes de Souss et de chtouka est basé sur le fait que ces deux nappes sont les plus importantes et les plus vulnérables vu leur surexploitation.

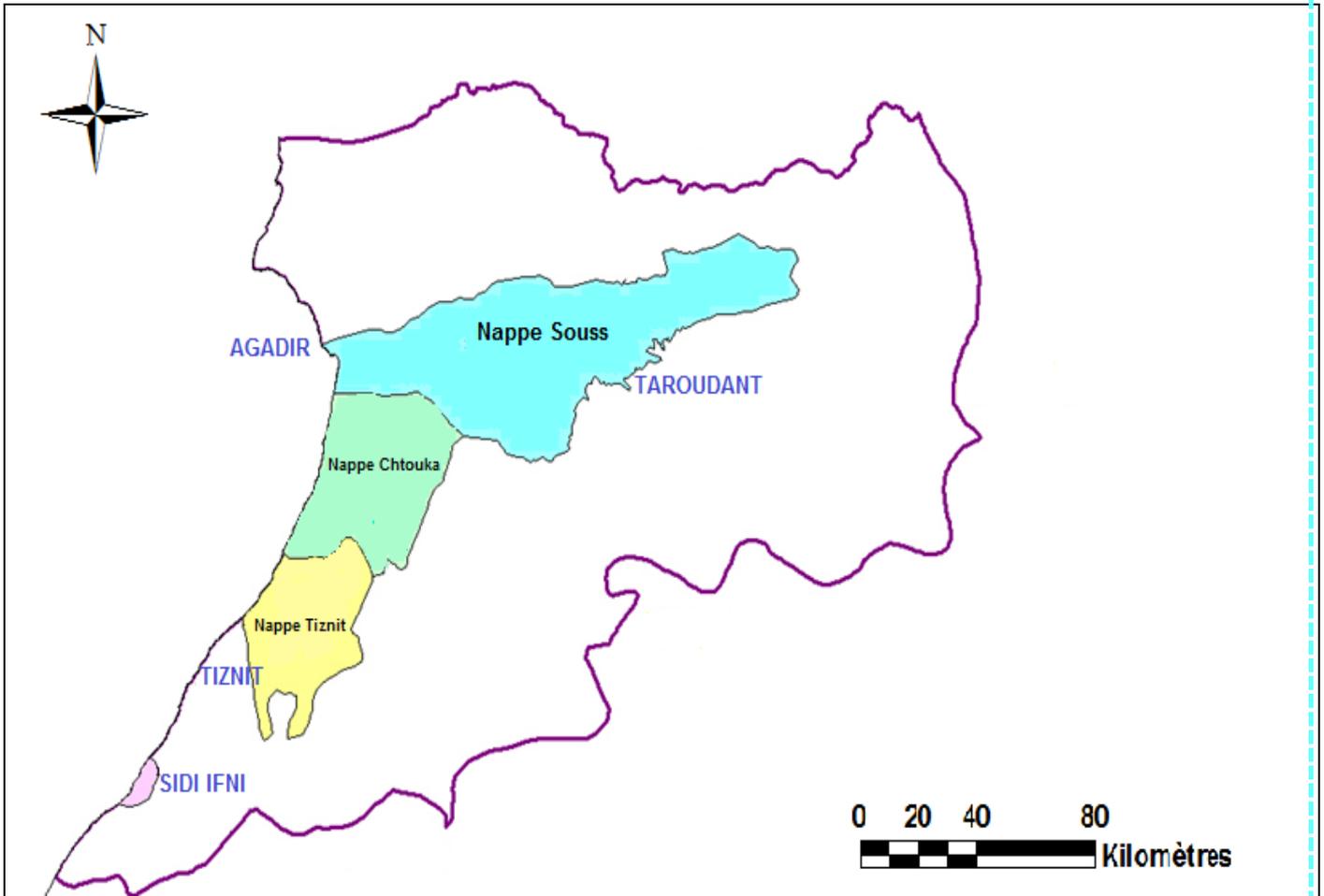


Figure 34: Carte des nappes du bassin versant de Souss Massa (CSEC)

#### 5. Situation actuelle des ressources en eau souterraine :

Le système constitué de la nappe du Souss et de celle des Chtouka constitue le principal réservoir aquifère de la zone du Souss-Massa. Ce système constitue l'essentiel de la ressource en eau de la région et joue un rôle primordial dans son développement socio-économique. L'accroissement de la demande en eau d'irrigation et la réduction des apports renouvelables suite à la succession des années de sécheresse, constituent d'importantes contraintes à la gestion des ressources en eau souterraine qui sont considérées comme le principal recours pour la satisfaction des besoins pressants en eau.

Les nappes de la région enregistrent des déficits importants et continus. Les prélèvements dépassent de loin les ressources renouvelables, ce qui a provoqué un déséquilibre alarmant des bilans des eaux

souterraines. Cette situation de surexploitation des ressources en eau souterraine persiste malgré les efforts déployés pour la mobilisation des eaux de surface dont le taux atteint 70%, et pour la recharge artificielle de la nappe du Souss.

Aussi, la surexploitation des nappes s'est traduite par une baisse continue des niveaux piézométriques engendrant des frais immédiats d'approfondissement des ouvrages de captage et des surcoûts de pompage de plus en plus élevés et dans des cas l'abandon des exploitations agricoles. Par ailleurs, la zone littorale de la plaine des Chtouka est menacée par le phénomène d'intrusion marine si des dispositions de prévention ne sont pas prises.

#### *a. Nappe de Souss :*

- *Contexte hydrogéologique :*

Le remplissage alluvionnaire superficiel et certaines parties des niveaux sous-jacents, constituent un vaste système aquifère en relation localement, avec les aquifères des montagnes de bordure. Une nappe libre généralisée existe dans la plaine du Souss, surmontant souvent une ou plusieurs nappes captives. L'ensemble constitue un système multicouche compris entre les bordures montagneuses et l'océan qui est une limite aval à niveau imposé et constant. Dans ce système, la nappe libre contient l'essentiel des ressources en eau souterraine de plaine.

D'une manière générale on peut différencier quatre types lithologiques constituant l'aquifère :

- Formation fluvio-lacustre à alternance de conglomérats, calcaires, marno-calcaires et grès avec des intercalations argilo-marneuses
- Grès et sables marins et côtiers du Moghrébien
- Cailloutis du lit fossile de l'oued
- Calcaires pliocènes du Souss aval

La nature du substratum est variable et se présente, dans l'ensemble sous forme d'une structure synclinale faillée.

L'épaisseur de l'aquifère varie entre 150 m environ, entre Arazane et Taroudant, et 500 m à l'aval d'Ouled Teïma. La profondeur de l'eau par rapport au sol croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne du cours de l'Oued Souss (ABHSM 2005) :

- Elle est comprise entre 10 et 30 m près du cours de l'Oued
- Descend à 25 et 35 m à l'aval d'Oulad Bourbia
- Dépasse 70 m en amont de Loulija et Sebt El Guerdane.

L'écoulement général s'effectue d'Est en Ouest et le gradient hydraulique moyen décroît de l'amont vers l'aval.

- *Modes d'alimentation de la nappe :*

L'alimentation des nappes phréatique et profonde provient à la fois des apports latéraux de nappes de montagnes, et des infiltrations de l'eau des Oueds et des ruissellements concentrés sur la plaine (Combe et El Hebil, 1972).

- *Analyse des évolutions piézométriques de la nappe :*

La baisse continue que connaît la piézométrie de cette nappe en raison de la surexploitation par puits et forages et du déficit d'alimentation engendré par la succession des années de sécheresse depuis 1970, s'est traduite par l'assèchement progressif des résurgences, des sources et des Khettaras. Actuellement, la contribution de la nappe dans le débit de base de l'Oued Souss est négligeable alors qu'elle était importante durant la période 1950 – 1970 (ABHSM).

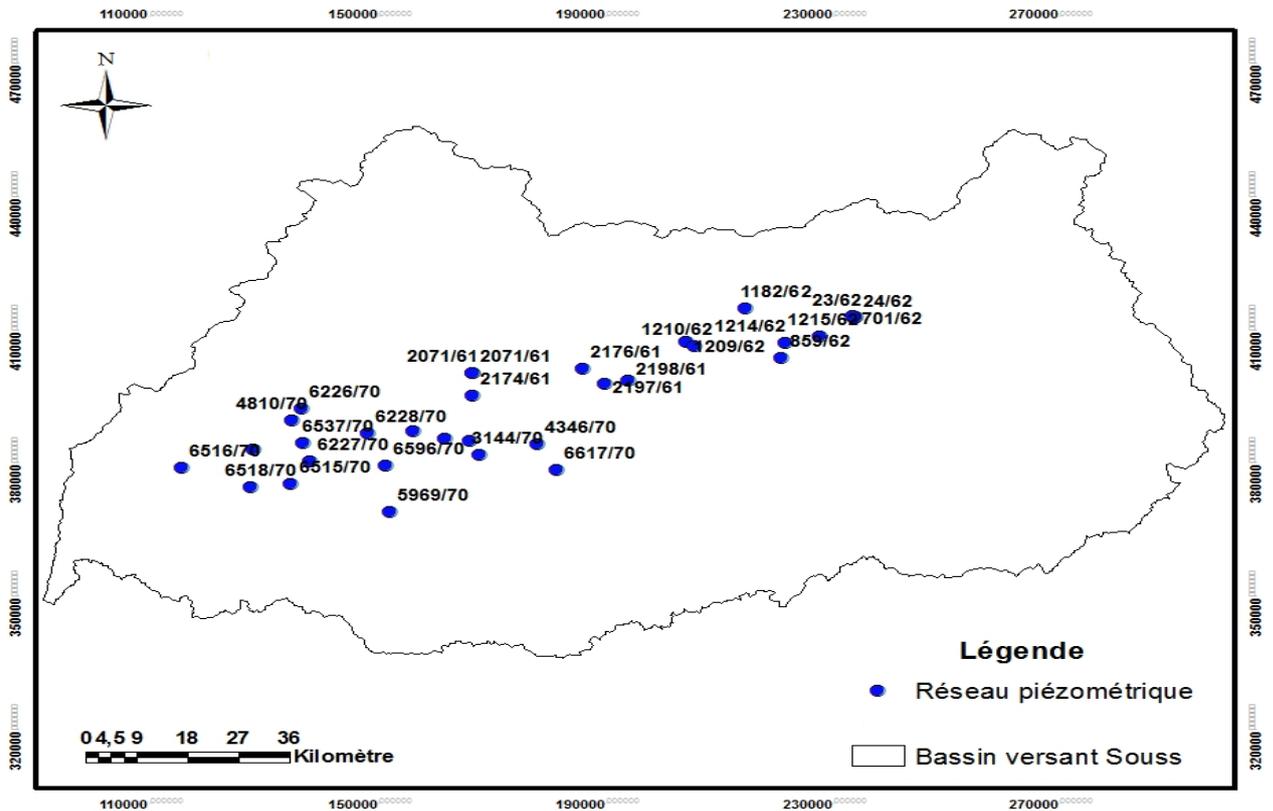


Figure 35 : Carte de situation du réseau piézométrique de la nappe de Souss.

Les cartes suivantes récapitulent l'évolution des niveaux piézométriques de la nappe du Souss durant la période 2001-2010.

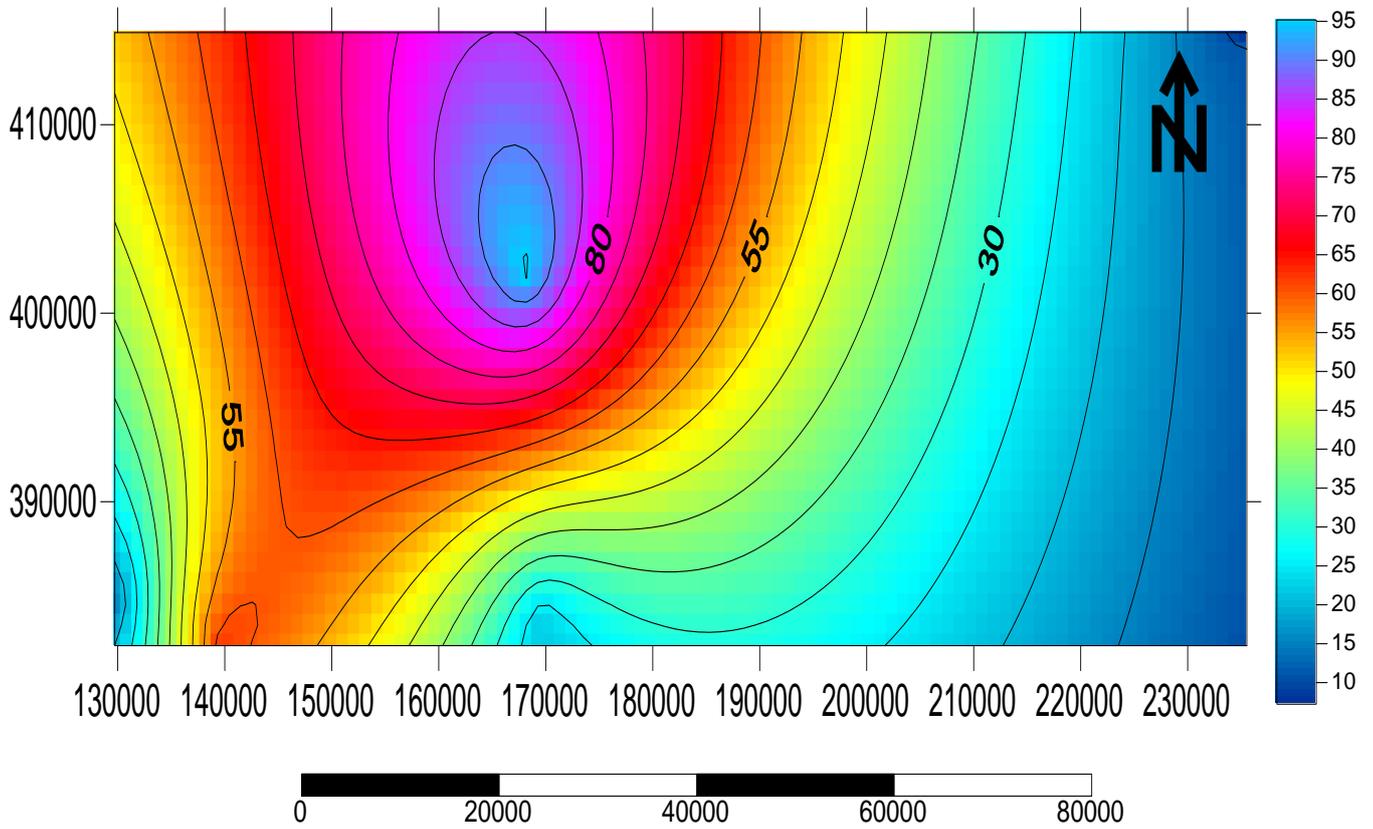


Figure 36 : Carte piézométrique de la nappe de Souss (2001).

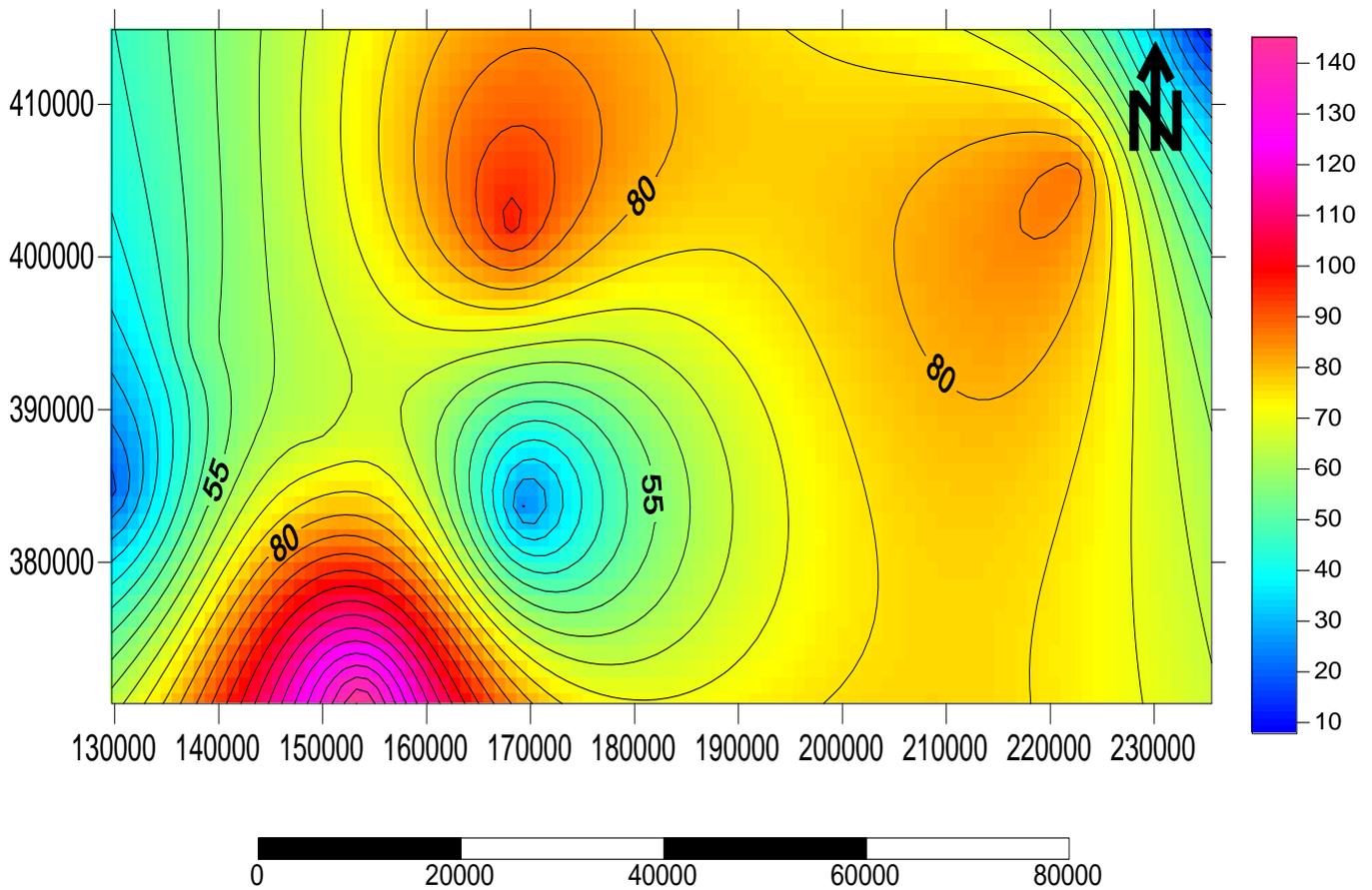


Figure 37 : Carte piézométrique de la nappe de Souss (2002)

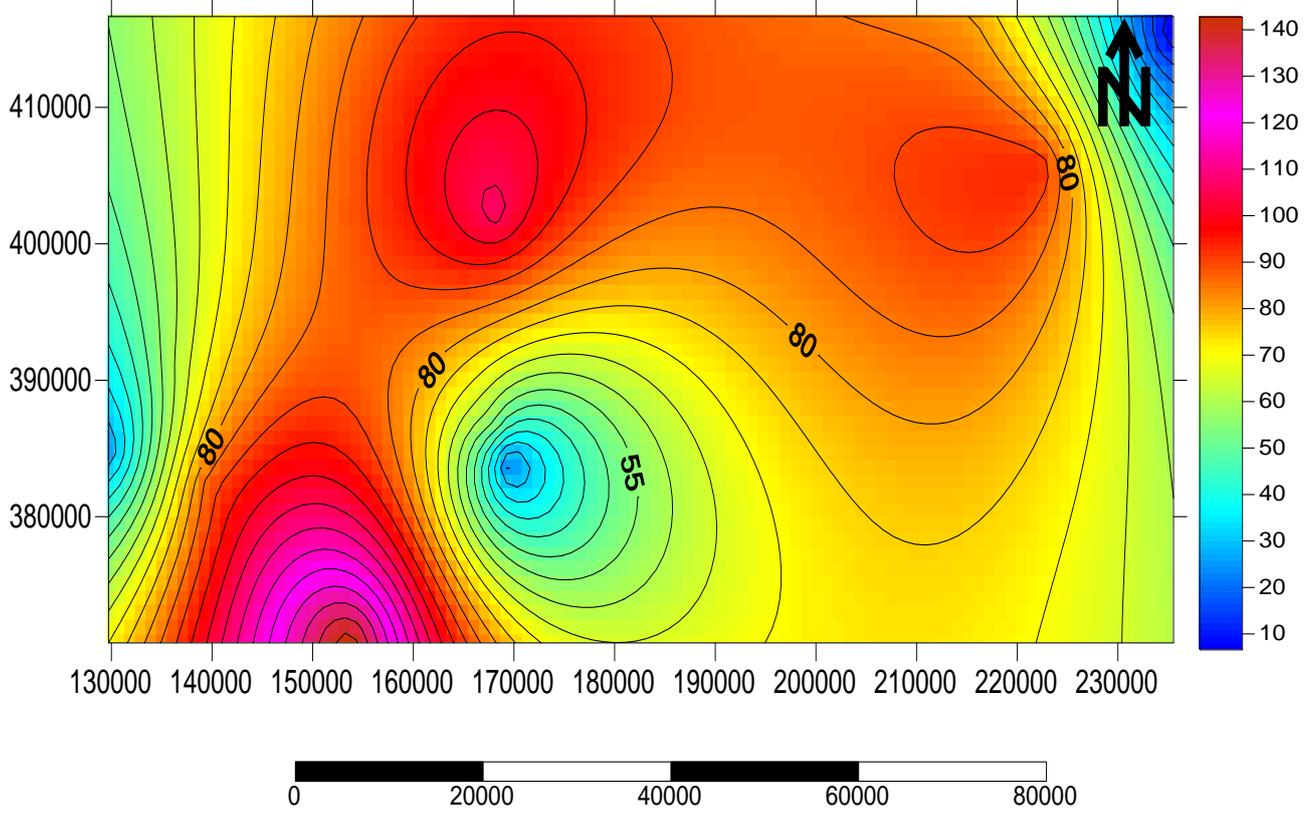


Figure 38 : Carte piézométrique de la nappe de Souss (2006)

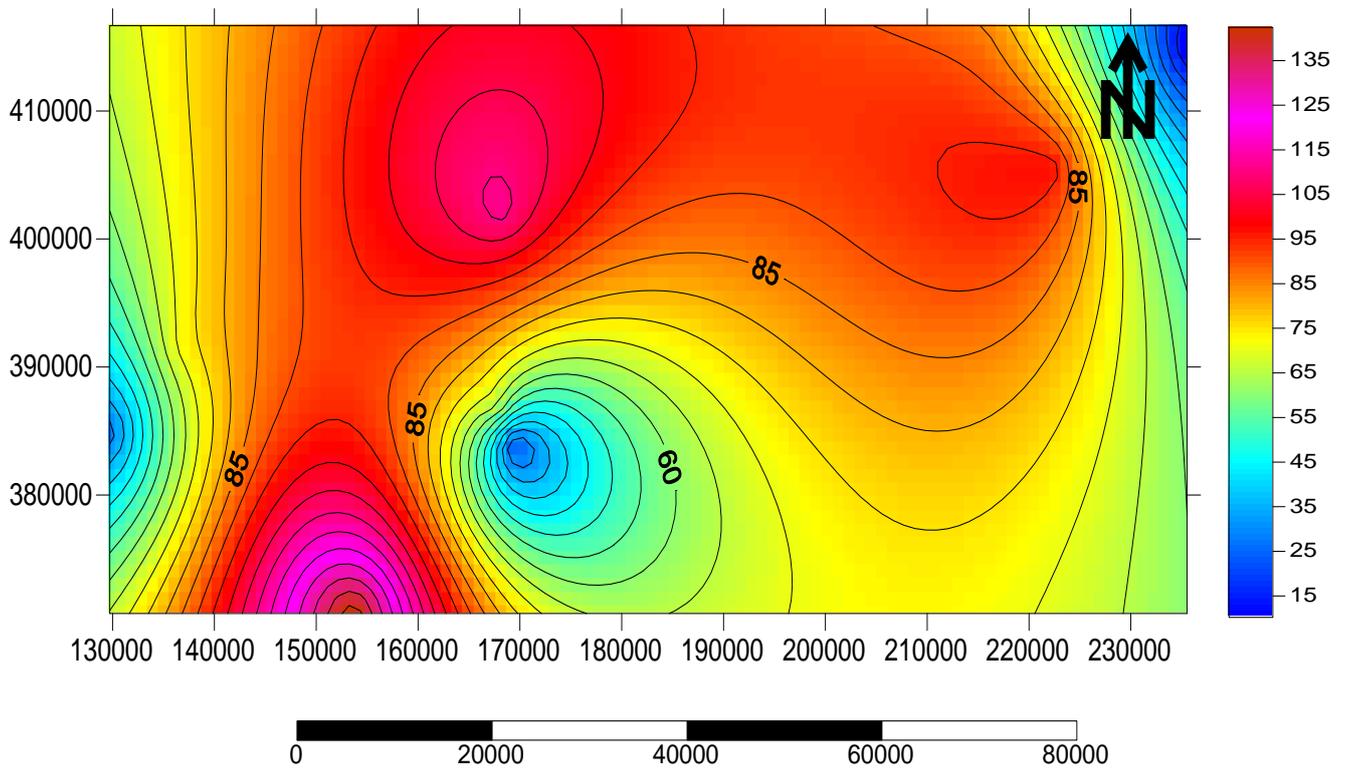


Figure 39 : Carte piézométrique de la nappe de Souss (2008).

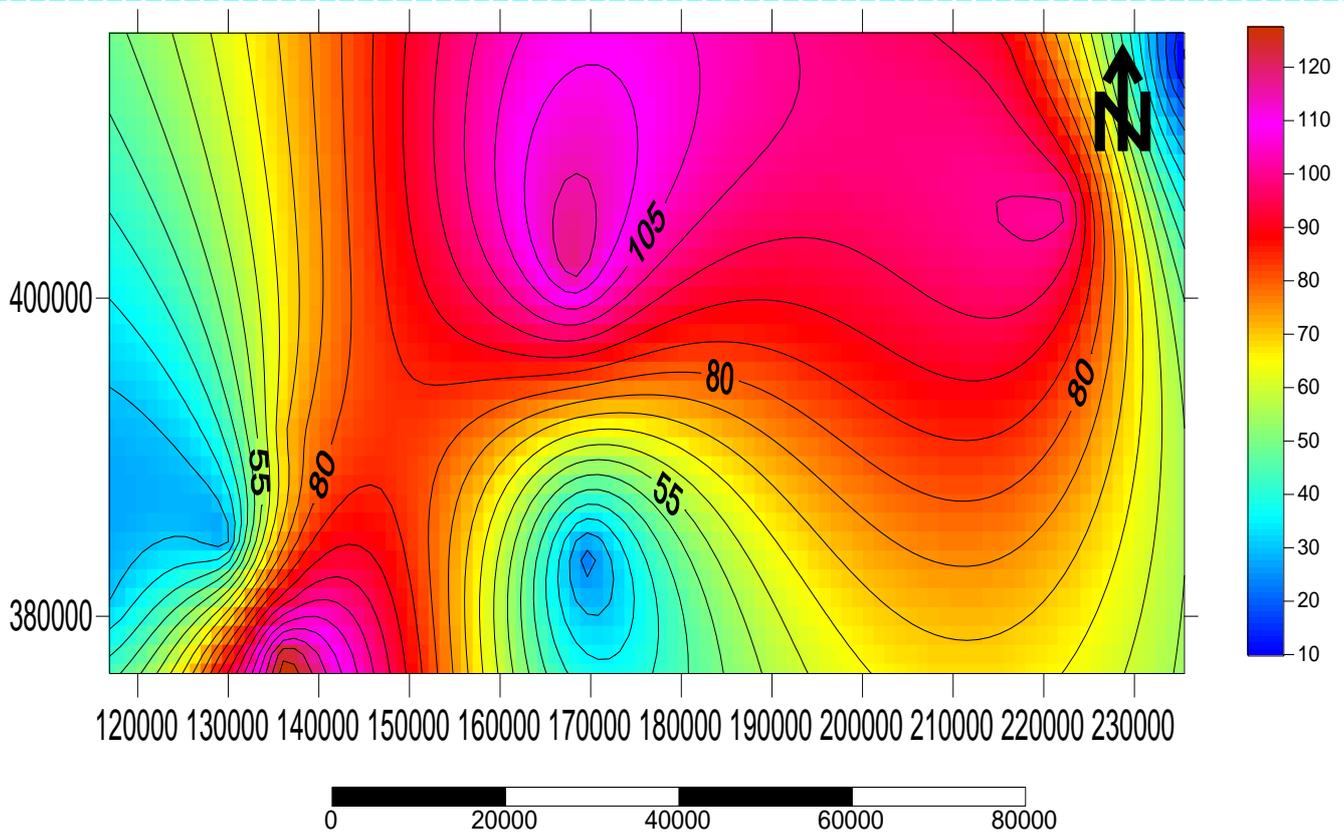


Figure 40: Carte piézométrique de la nappe de Souss (2010).

L'analyse de l'évolution des niveaux piézométriques permet de déceler une baisse accrue des niveaux piézométriques, atteignant 45 m durant une année (période 2001-2002). Cette baisse est due à la surexploitation de la nappe et à la réduction des ressources renouvelables suite à la succession des années de sécheresse. Alors que la période de 2008-2010 a connu une recharge de la nappe et donc un remonté du niveau piézométrique de 15 m suite à la pluviométrie qui a connu la région pendant ces deux années.

#### *b. La nappe de Chtouka :*

- *Contexte hydrogéologique :*

L'aquifère principal de cette nappe est constituée par des grés dunaires à faciès sableux et des niveaux de calcaires du quaternaire. Dans la région de Biougra, l'épaisseur de la nappe varie de 50 m à 300 m. Le long de l'Oued Massa, la nappe est peu profonde, à l'exception du secteur du cordon dunaire où la nappe peut se trouver à des profondeurs de 65 m au dessous du sommet des formations dunaires. L'écoulement général s'effectue d'Est en Ouest et le gradient hydraulique moyen décroît de l'amont vers l'aval.

- *Analyse des évolutions piézométriques de la nappe :*

La nappe de Chtouka est considérée comme une nappe équilibrée puisque le volume de la recharge globale annuelle est égal au volume prélevé annuellement et atteint 40 Mm<sup>3</sup>. Cependant, l'effet conjugué de la sécheresse et des pompages agricoles a influencé une partie de la nappe de Chtouka (entre 5 et 10 m de rabattement entre 1986 et 1994). (ABHSM).

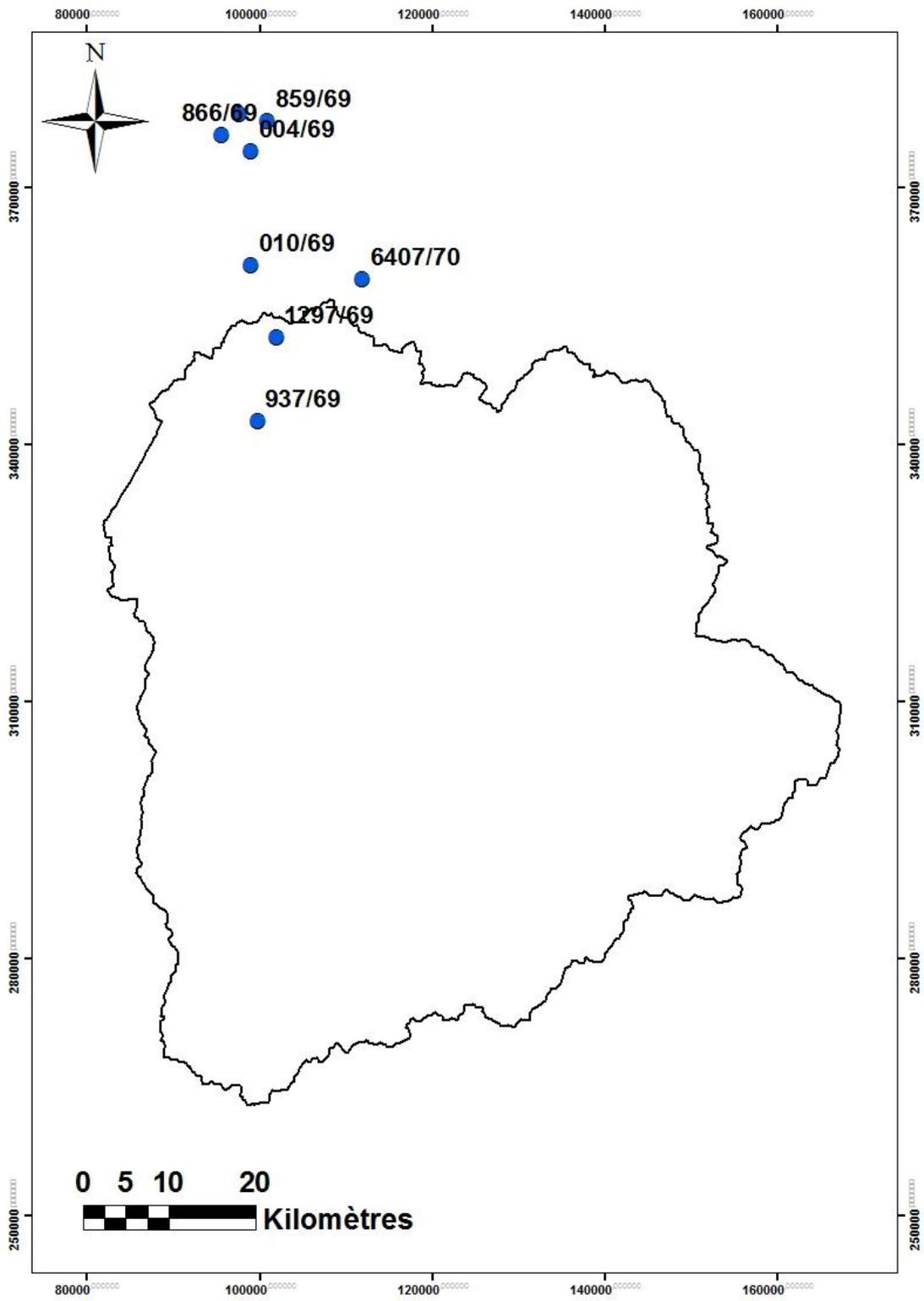


Figure 41: Carte de situation du réseau piézométrique de la nappe Chtouka.

Les cartes si dessous montrent l'évolution de la piézométrie durant la période de 2005 à 2010.

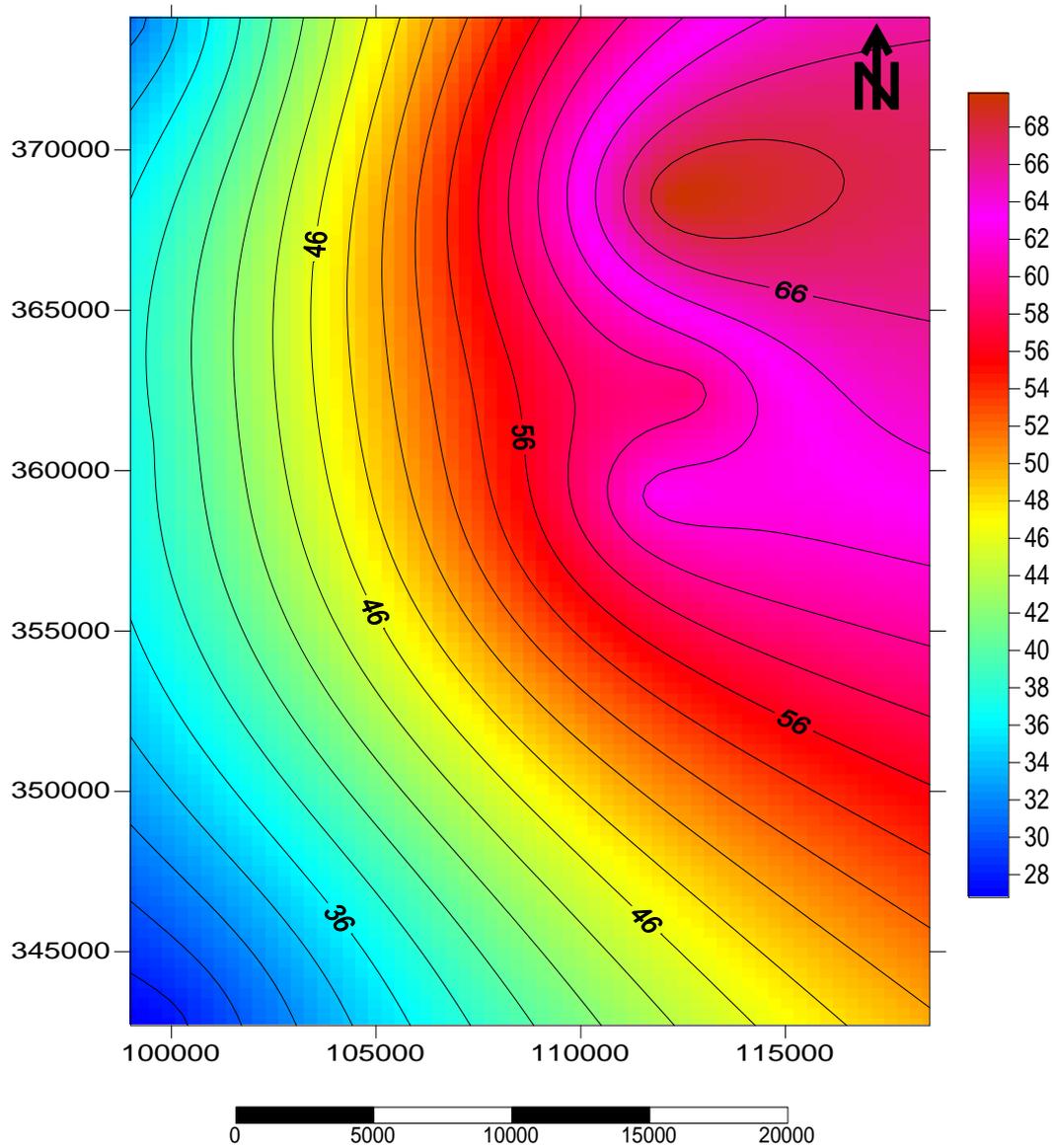


Figure 42: Carte piézométrique de la nappe de Chtouka (2005).

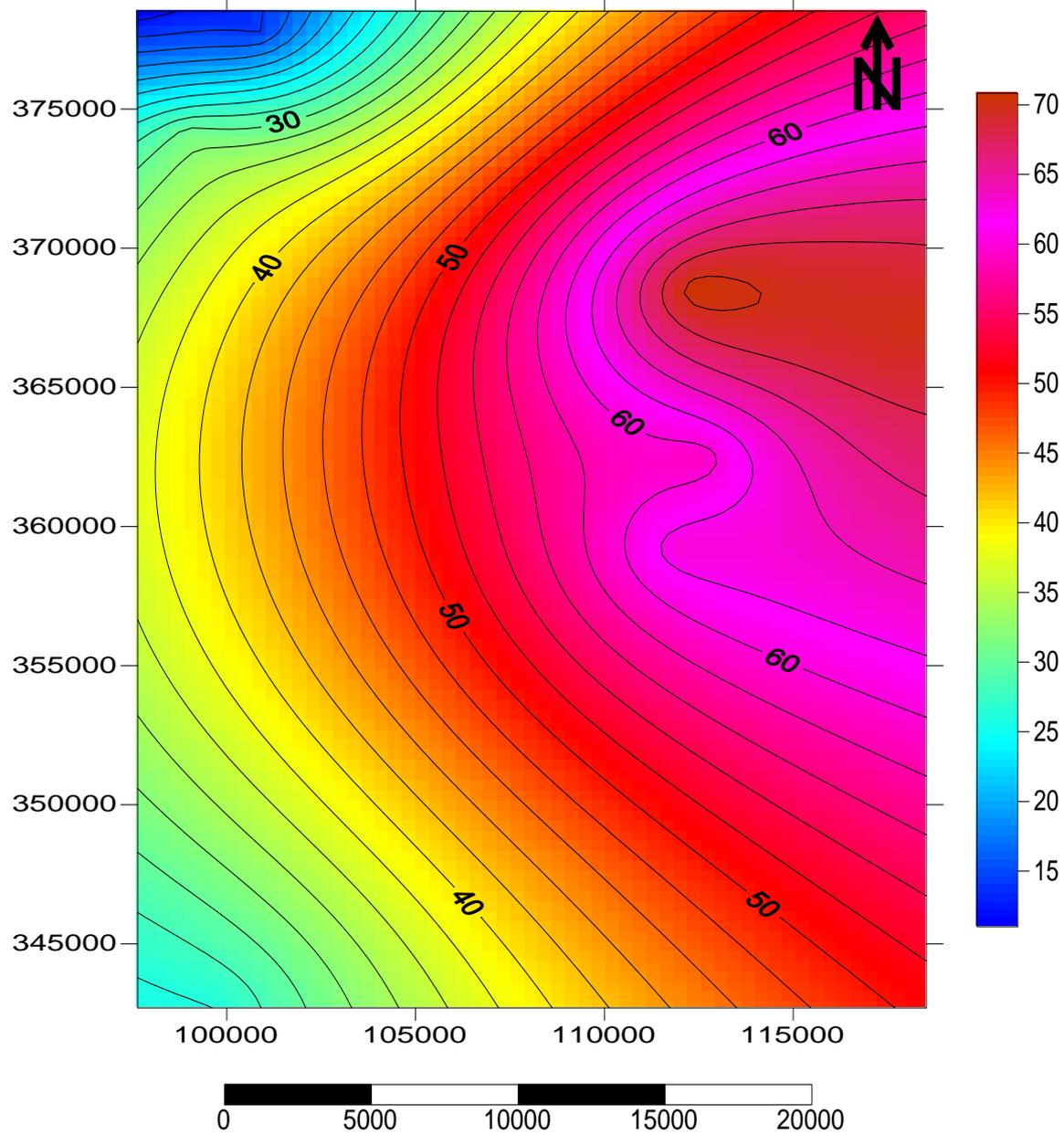


Figure 43: Carte piézométrique de la nappe de Chtouka (2006).

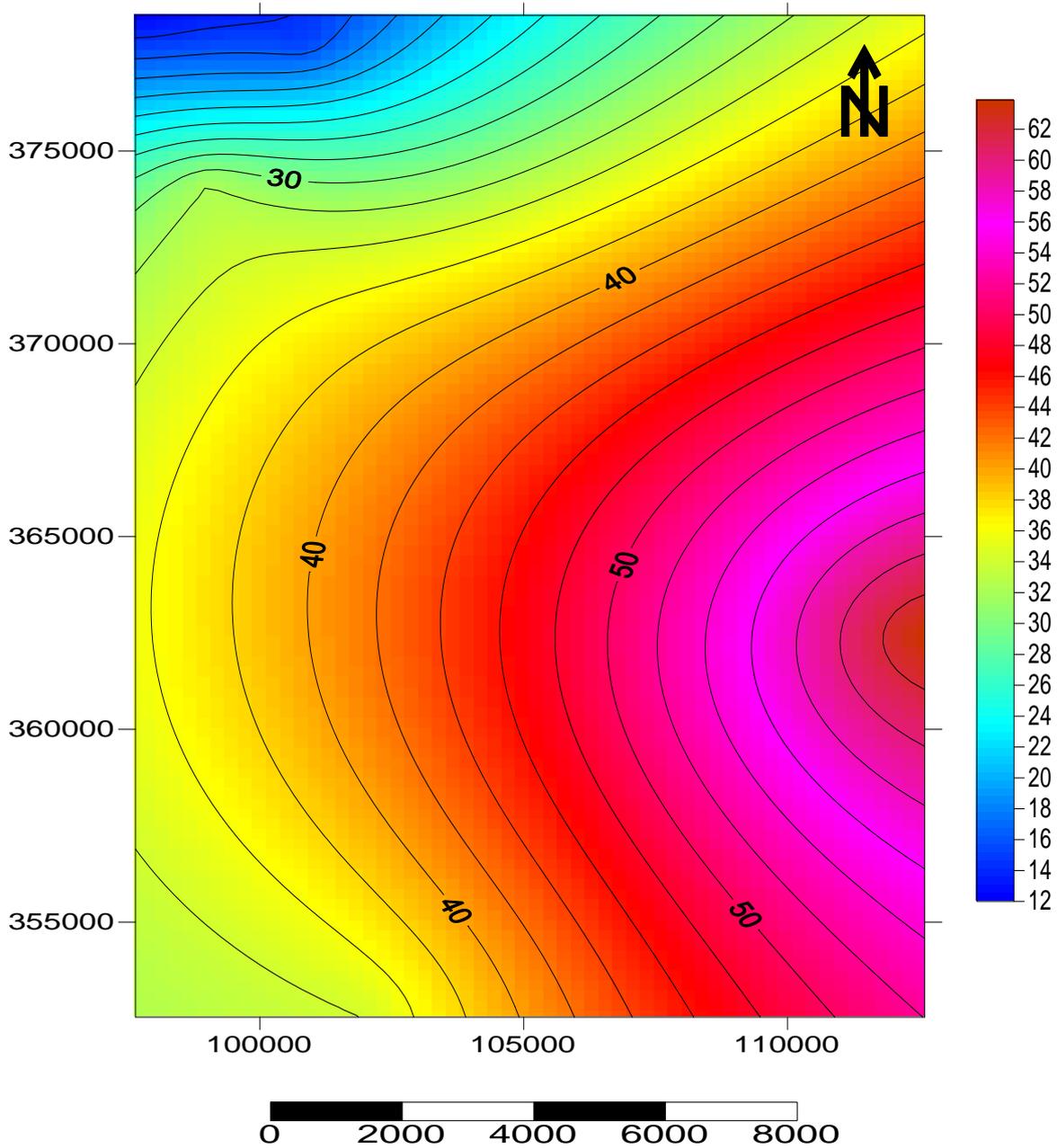


Figure 44: Carte piézométrique de la nappe de Chtouka (2008).

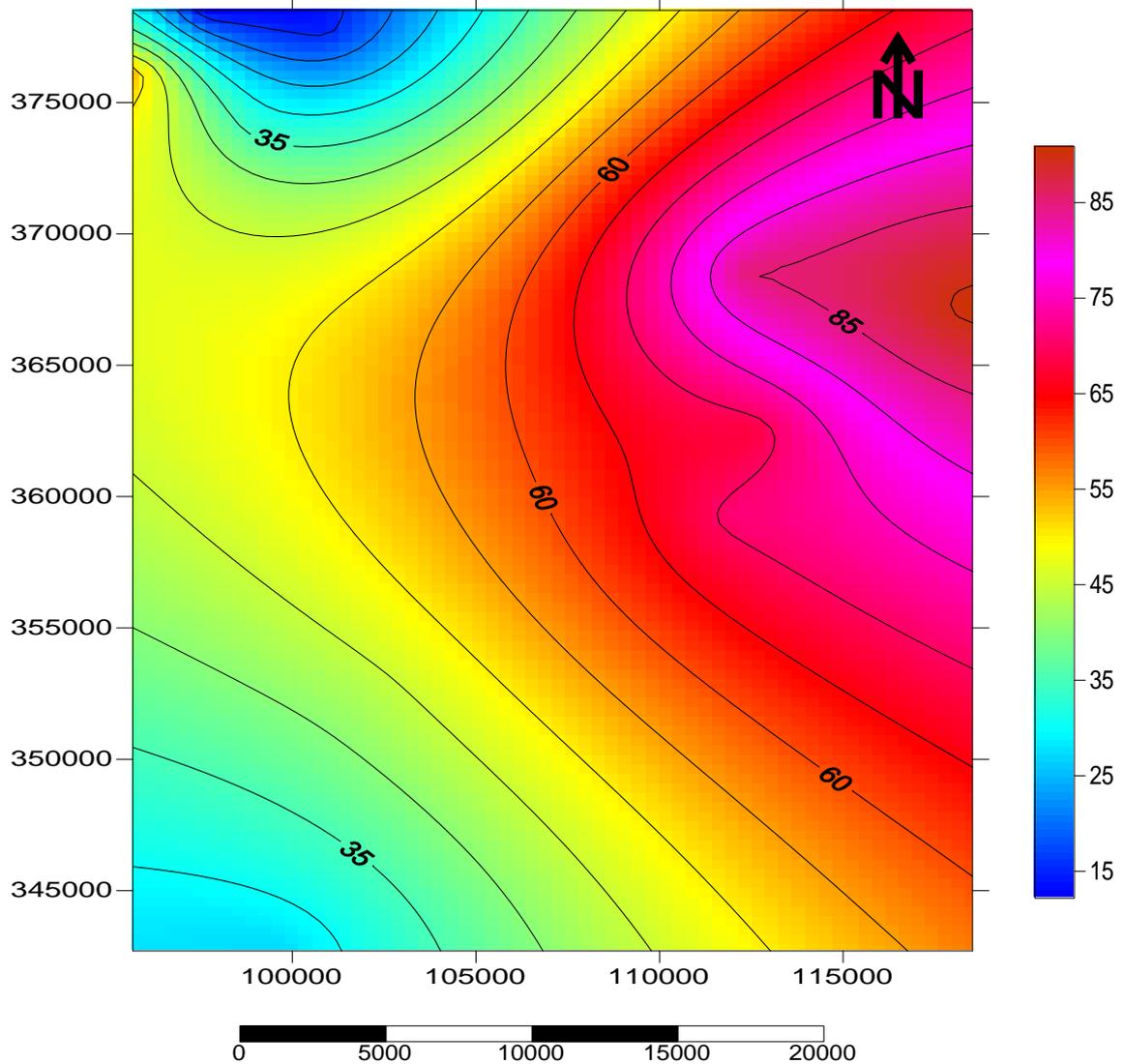


Figure 45 : Carte piézométrique de la nappe de Chtouka (2010).

Les fluctuations du niveau piézométrique de la nappe de Chtouka montrent en gros un rabattement du niveau de l'eau dans la nappe. L'abaissement du niveau de la nappe qui est d'environ 22 m (durant 5 ans) s'explique par l'effet de la sécheresse et de la surexploitation de la nappe dans ce secteur.

D'après l'analyse des différentes cartes piézométriques des nappes de Souss et de Chtouka on a constaté une baisse accrue du niveau d'eau dans les deux nappes durant une courte période (2001-2010). Cette tendance de baisse des niveaux d'eau des deux nappes, coïncide avec les périodes de sécheresse révélée par indice de précipitation standardisé (SPI), ce qui témoigne l'impact de la sécheresse météorologique sur la disponibilité des réserves d'eaux souterraines.

## II. Les stratégies d'adaptation proposée pour la sauvegarde des ressources hydriques :

Le bassin hydraulique du Souss-Massa compte parmi les zones les plus riches et les plus importantes du pays. Ses potentialités économiques (agricoles, touristiques, industrielles,...) peuvent lui insuffler un nouvel essor à même de lui permettre de surmonter les défis et les contraintes actuelles.

L'une de ces contraintes, qui pourrait constituer un facteur limitant et un obstacle de ce développement, est la disponibilité des ressources en eau. En effet, le bassin hydraulique du Souss-Massa est l'un des bassins du Maroc où le problème de l'eau se fait sentir avec le plus d'acuité. Les besoins en eau sont en constante augmentation sous la pression des demandes en eau potable et industrielle et en eau agricole. Le plan directeur d'aménagement intégré des ressources en eau (PDAIRE) du Souss-Massa a évalué ces demandes à l'horizon 2020 à 1.165 millions de mètres cubes.

Malgré l'importance des efforts déployés en matière de recherche et de mobilisation des ressources en eau depuis plusieurs décennies, pour permettre l'essor économique que connaît actuellement cette région en la dotant d'infrastructures hydrauliques lui permettant de faire face aux épisodes de sécheresse, l'équilibre entre l'offre et la demande en eau a toujours été fragile. Cette fragilité s'accroît par la succession des épisodes de sécheresse de plus en plus sévères que connaît la région depuis le milieu des années 70. La conjugaison des effets de ces sécheresses et la multiplication des pompages imposés par le développement agricole dans la région s'est traduite par une surexploitation intense des ressources en eau souterraine. A ce rythme, le développement de la région risque d'être compromis.

L'effort de mobilisation des ressources en eau par la réalisation de nouveaux aménagements telle que préconisée par le PDAIRE, ne pourra pas à lui seul résorber le déficit déjà important. Ce PDAIRE a souligné à cet égard que, même en mobilisant la quasi totalité des apports en eau de surface, les besoins en eau ne pourront être satisfaits, à l'horizon 2020, qu'au prix du maintien de la surexploitation des nappes de Souss et de Chtouka.

Afin de réduire le déficit et de préserver les ressources en eau, pour faire face au déséquilibre persistant entre la demande et la disponibilité des ressources en eau, un schéma d'aménagement de l'eau susceptible d'assurer la conservation et la préservation des ressources en eau et leur adéquation avec les besoins, est proposé, basé sur la mobilisation maximum des eaux conventionnelles et non conventionnelles et sur la gestion du demande. Ce schéma favorise une utilisation efficiente de l'eau pour atténuer d'une manière significative le déficit en eau au niveau des nappes d'eau souterraine en vue d'assurer leur durabilité.

Les dispositions proposées pour la préservation des ressources en eau dans la région porteront sur les aspects suivants :

- La mobilisation des eaux de surface ;
- L'économie de l'eau en irrigation;
- La réutilisation des eaux usées traitées des grandes agglomérations.
- Le développement et la mobilisation des ressources en eau souterraines.

## **1. La mobilisation des eaux de surface :**

- La mobilisation de la ressource en eau pour l'eau potable du grand Agadir par le barrage Amir Moulay Abdellah et par la construction du barrage Tamri (12 Mm<sup>3</sup>) en 2017.
- La réalisation de 15 barrages collinaires permettant le stockage d'un volume de 15,4 Mm<sup>3</sup>. Ce volume sera également déduit des prélèvements uniformément dans les nappes du Souss et du Chtouka

## **2. L'économie de l'eau d'irrigation :**

- La conversion à l'irrigation localisée de 30.000 ha.
- La valorisation de l'eau d'irrigation, le choix des cultures moins exigeantes en eau moyennant les actions d'incitation et de démonstration et le renforcement de l'encadrement des agriculteurs,
- Le renforcement des activités de contrôle et de police des eaux en moyens humains et matériels,
- L'utilisation de la micro-irrigation

## **3. La réutilisation des eaux usées traitées des grandes agglomérations :**

- Afin de promouvoir la réutilisation des eaux usées épurées, il est recommandé que les pouvoirs publics prennent en charge la réalisation et l'exploitation des stations d'épuration et des ouvrages nécessaires au transport d'eau vers les zones d'utilisation. Des redevances conséquentes et appropriées ainsi que des incitations devraient être adoptées.

## **4. Le développement et la mobilisation des ressources en eau souterraines :**

- Le recours à la recherche des eaux profondes constitue une alternative intéressante pour la mobilisation des ressources en eau additives pour soulager la pression sur les nappes du Souss et du Chtouka.
- Par le biais de la recharge artificielle, la nappe du Souss bénéficie de 100 Mm<sup>3</sup>/an, ce qui contribue à la réduction de la baisse du niveau de l'eau et à l'atténuation du déficit constaté. Le dispositif de la recharge est composé des barrages Aoulouz-Mokhtar Soussi, Imi El kheng et les seuils d'infiltration.
- Le contrat de nappe.

## Conclusion générale

Dans la région de Souss Massa Drâa, comme en zones arides et semi-arides, l'étude des extrêmes pluviométriques, notamment la sécheresse météorologique, est devenue un domaine de recherches prioritaire, vu les impacts étendus sur différents secteurs socio-économiques.

L'étude pluviométrique au niveau de trois stations de la région, a montré, par l'application de méthodes statistiques, des fortes irrégularités du régime pluviométrique avec des fluctuations à dominance sèches. Les périodes de sécheresse révélées par cette analyse statistique s'étalent sur toute la période d'étude de 1960 à 2010 et alternent avec des périodes humides. Ces épisodes de sécheresse correspondent aux années 1961, 1975, 1981, -1994, 2000, 2001 et 2007 et sont généralisées sur tout le bassin, selon une intensité allant de modérée à forte.

Le calcul de l'indice pluviométrique standardisé (SPI) des précipitations des trois stations a permis de déterminer l'intensité ainsi que les fréquences des périodes sèches qui ont affecté la région durant la période de 1960 à 2010. Les résultats obtenus par cet indice ont validé les tendances observées des cumuls pluviométriques. Les périodes de sécheresse repérées ont été qualifiées de modérément à extrêmement sévères en termes d'intensité.

Les modes de téléconnection de l'hémisphère Nord, en particulier l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) et le mode Scandinavien (SCAND) durant la saison d'hiver, expliquent la majeure partie des variances totales des précipitations saisonnières. Les indices de ces modes, corrélés négativement avec les précipitations, tendent davantage à prendre des valeurs positives sur les périodes de sécheresse. Ces phases positives correspondent à des configurations défavorisant les passages des systèmes pluvieux sur le Maroc, en particulier, pour les régions situées à l'Ouest des montagnes de l'Atlas. Ce régime est de plus en plus senti au cours des années 1992 et 2000 (années les plus sèches de toute la campagne de mesure à l'échelle du bassin). Ces deux années coïncident avec la phase positive de NAO. L'année la plus humide à l'échelle de la région (1963) a coïncidé avec une phase négative de l'ONA.

Ces contraintes climatiques ont accentué la problématique des ressources en eaux dans la région. En effet, la demande en eau est en constante progression du fait des causes précitées. Les ressources en eau sont en forte dégradation : Baisse tendancielle des pluviométries due aux changements climatiques, surexploitation des nappes souterraines, envasement des barrages, pollution liée aux effluents domestiques et industriels. Et, tout cela est conditionné par un contexte spécifique à la zone (climat aride à semi-aride et conflits d'usages) ce qui constitue un obstacle au développement durable de la région.

Au cours de cette étude, nous avons finalement constaté que les ressources en eau de surface sont limitées et très irrégulières avec des débits interannuels des oueds très variables et que l'abaissement de la nappe phréatique est rapide par des prélèvements de quantités supérieures à l'alimentation annuelle. Les rythmes de baisse de ces nappes atteignent 2 m/an au nord de Chtouka et dépassent 5

m/an dans le Souss. Ce rabattement a eu également un effet direct sur la population locale en causant l'assèchement de puits utilisés traditionnellement pour l'irrigation et l'eau potable, une diminution accrue du débit ou l'assèchement totale de sources et khattaras (composantes du système traditionnel d'irrigation) ainsi que le dépérissement des cultures fruitières et le recul de l'apiculture...

La prise de conscience du problème de l'eau dans le Souss-massa-Drâa s'impose donc avec acuité. Plusieurs plans directeurs de gestion de l'eau sont en cours, mais la participation effective de tous les acteurs potentiels, notamment les usagers et les décideurs, est indispensable pour une gestion optimale de la ressource. Les études et recherches académiques sont également vivement souhaitables pour accompagner ces décideurs dans leur tâche, et développer durablement la région pour qu'elle maintienne son rôle dans l'agriculture du pays.

## Références bibliographies :

**Agence du bassin hydraulique du Souss Massa.** (2007) : situation hydrologique du bassin hydraulique du Souss Massa, bulletin de la situation hydrologique dans la zone d'action de l'agence du bassin hydraulique du Souss Massa du 1er septembre 2006 au 31 aout 2007. p.15.

**Agence du bassin hydraulique du Souss Massa.** (2005). Stratégie de préservation des ressources en eaux souterraine dans le bassin du Souss Massa. Plan d'action 2005-2020, p 60.

**Alley wm.** (1984). l'indice de sécheresse de palmer: limitations et hypothèses. Journal du climat et de la météorologie appliquée. p.23.

**Bagayoko f.** (2009) : Impact des changements climatiques sur l'environnement et les ressources en eau, PHD en hydrologie/bioclimatologie, international institute for water and environmental engineering, p.52.

**Barnston AG et RE Livezey,** (1987): Classification, la saisonnalité et la persistance de la circulation atmosphérique de basse fréquence lun. Wea. Rev .115, 1083-1126.

**Barnston, A. G., R. E. Livezey, and M. S. Halpert** (1991) : Modulation of Southern Oscillation-Northern Hemisphere mid-winter climate relationships by the QBO. J. Climate, 4, 203-217.

**Benassi m.** (2008): Drought and climate change in morocco. Analys is of precipitation field and water supply, in : Lopez-fran cos a. (ed.). drought management: scientific and technological innovations. Zaragoza : ciheam, 2008. p. 83-86 (options méditerranéennes : série a. séminaires méditerranéens; n. 80).

**COMBE M. et EL HEBIL A.** (1972) : Plaine du Souss, des Chtouka et de Tiznit : Vallée du Souss. Ressources en Eau du Maroc, Tome 3.Ed. Service géologique du Maroc.

**CSEC** (2001) : Conseil Supérieur de l'Eau et du Climat- plan directeur pour le developement des ressources en eau des bassins du Souss-Massa. Agadir 21-22 juin 2001, 9ème Session.

**Doesken NJ; TB McKee et J. Kleist.** (1991). Développement d'un indice de l'approvisionnement en eau de surface pour l'ouest des États-Unis. Climatologie Nombre 91-3, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.

**Driouech f.** (2006) : Etude des indices de changements climatiques sur le Maroc: Températures et précipitations. Direction de la Météorologie Nationale "infomet", Casablanca, novembre 2006.

**Driouech f.** (2010) : distribution des précipitations hivernales sur le Maroc dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes, thèse doctorat, sciences de l'univers, de l'environnement et de l'espace (sdu2e), (inp Toulouse).p.164.

**Gibbs, WJ, et JV Maher.** (1967). Précipitations déciles comme indicateurs de sécheresse. Bureau de météorologie Bulletin n ° 48, Commonwealth d'Australie, Melbourne.

**Gräbener j.** (2009) : Changement climatique vulnérabilité de la population rurale et des écosystèmes dans quatre zones de la région Souss-Massa-Draa possibles stratégies d'adaptation, fiche. Part.gtz, p.36.

**Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.** (2013) : changements climatiques, cinquième rapport d'évaluation du groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, p.34.

**Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.** (2008) : le changement climatique et l'eau, document technique publié par le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, secrétariat du GIEC, Genève, p. 236.

**Guttman, N.B.,** (1994): On the sensitivity of sample L moments to sample size. Journal of Climate, 7(6):1026–1029.

**Jouilil i, Bitar k, Salama h, Amraoui, Mokssit a., Tahiri m.** (2013) : Sécheresse météorologique au bassin hydraulique Oum er Rbia durant les dernières décennies. Larhyss journal, n° 12, janvier 2013, pp. 109-127.

**Karl, TR et RW Knight.** (1985). Atlas de mois Palmer hydrologiques indices de sécheresse (1931-1983) pour la contigus des États-Unis. Climatologie Historique série 3-7, National Climatic Data Center, Asheville, Caroline du Nord.

**Knippertz p, Christoph m, and Speth p,** (2003): Long-term precipitation and the link to the large scale circulation in recent and future climates. *Meteorology and atmospheric physics*, 83, 67–88 (2003).

**Mckee, Doesken nj, et Kleist j,** (1995). Suivi de la sécheresse avec des échelles de temps multiples. Prépublications, 9<sup>ème</sup> conférence sur la climatologie appliquée, pp 233-236.

**McKee, T.B., N.J. Doesken et J. Kleist,** (1993): The relationship of drought frequency and duration to time scale. In: ,Proceedings of the Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, du 17 au 22 janvier 1993. Boston, American Meteorological Society, 179–184.

**Mo, K. C., and R. E. Livezey,** (1986): Tropical-extratropical geopotential height teleconnections during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 114, 2488-2515.

**Mohamed RIAL.** (2007). Stratégie de sauvegarde des ressources en eau dans le bassin du Souss Massa, Article Edité le : mardi 25 septembre 2007 JOURNAL OPINION.

**Organisation météorologique mondiale (OMM),** (2012) : Guide d'utilisation de l'indice normalisé de précipitations (M. Svoboda, M. Hayes et D. Wood) (OMM-N° 1090), Genève.

**Palmer wc.** (1965). la sécheresse météorologique, document de recherche no 45, département du commerce weather bureau, Washington, Etats-Unis. pp.156-161.

**Palmer WC** (1968). Garder la trace des conditions des cultures d'humidité, à l'échelle nationale. Le nouvel indice des cultures d'humidité *Weatherwise* 21: 156-161.

**Sebbar a, Hsaine m, Fougrach h, et Badri w.** (2012) : Etude des variations climatiques de la région centre du Maroc, 25<sup>ème</sup> colloque de l'association internationale de climatologie, Grenoble 2012. p.709-714.

**Sebbar a, Badri w, Fougrach h, Hsaine m, Saloui a.** (2011) : Etude de la variabilité du régime pluviométrique au Maroc septentrional (1935-2004), article, sécheresse vol. 22, n° 3. p. 139-48.

**Shafer BA et LE Dezman.** (1982). Développement d'un approvisionnement en eau de surface Index (SWSI) pour évaluer la gravité de la sécheresse dans les zones de ruissellement du manteau neigeux. Dans Actes de la Conférence Ouest de neige, pp 164-175.

**Smith, DI; MF Hutchinson et RJ McArthur.** (1993). La sécheresse climatique et agricole australien: Paiements et politique. *Sécheresse Nouvelles du Réseau* 5 (3) :11-12.

**Soro g.e, Anouman d.g .I, Goula bi t.a, Srohorou b, Savane i.** (2013) : Caractérisation des séquences de sécheresse météorologique a diverses échelles de temps en climat de type soudanais : cas de l'extrême nord-ouest de la cote d'ivoire, *Larhyss journal*, n°18, juin 2014, p. 107-124.

**Martin H. Visbeck, James W. Hurrell, Lorenzo Polvani, and Heidi M. Cullen.** (2001) : The North Atlantic Oscillation: Past, present, and future, *PNAS*, November 6, 2001, vol. 98, n°. 23, 12876-12877.

**Wallace, J. M., and D. S. Gutzler,** (1981): Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon. Wea. Rev.*, 109, 784-812.

**Wilhite, D. A., and M. H. Glantz**, (1985) : Understanding the drought phenomenon: The role of definitions, *Water International*, 10, 111-120.

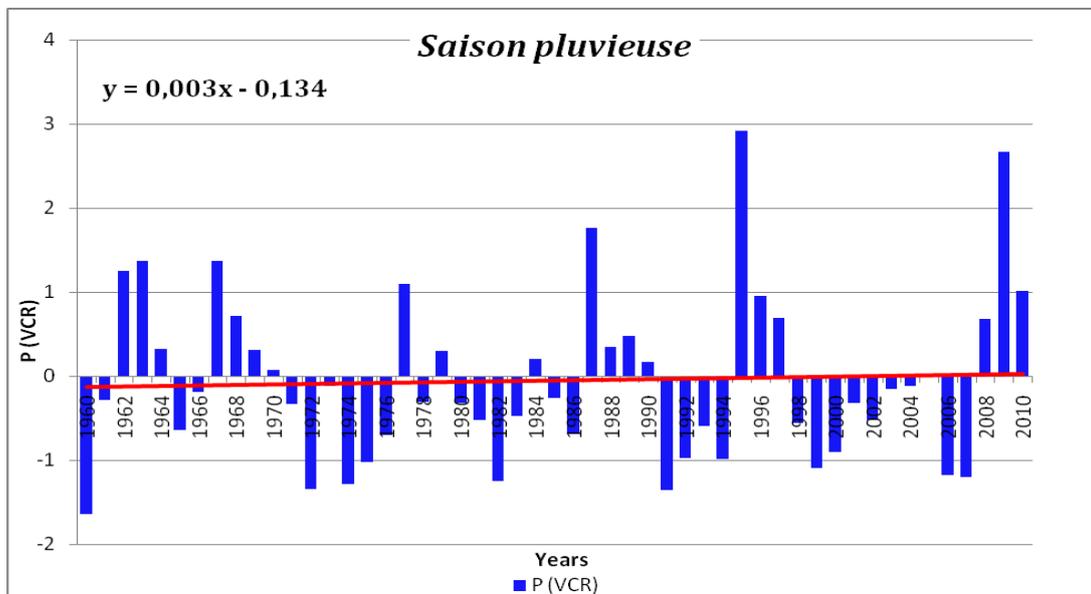
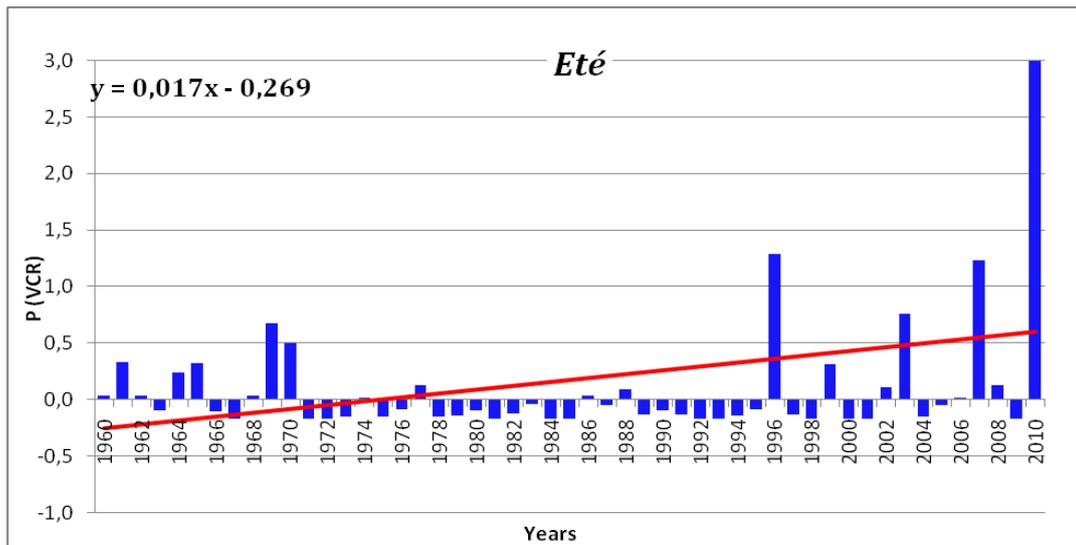
**Willeke G, JRM Hosking, JR Wallis et NB Guttman**. (1994). L'Atlas national sécheresse. Institut pour les ressources en eau Rapport 94-NDS-4, US Army Corps of Engineers.

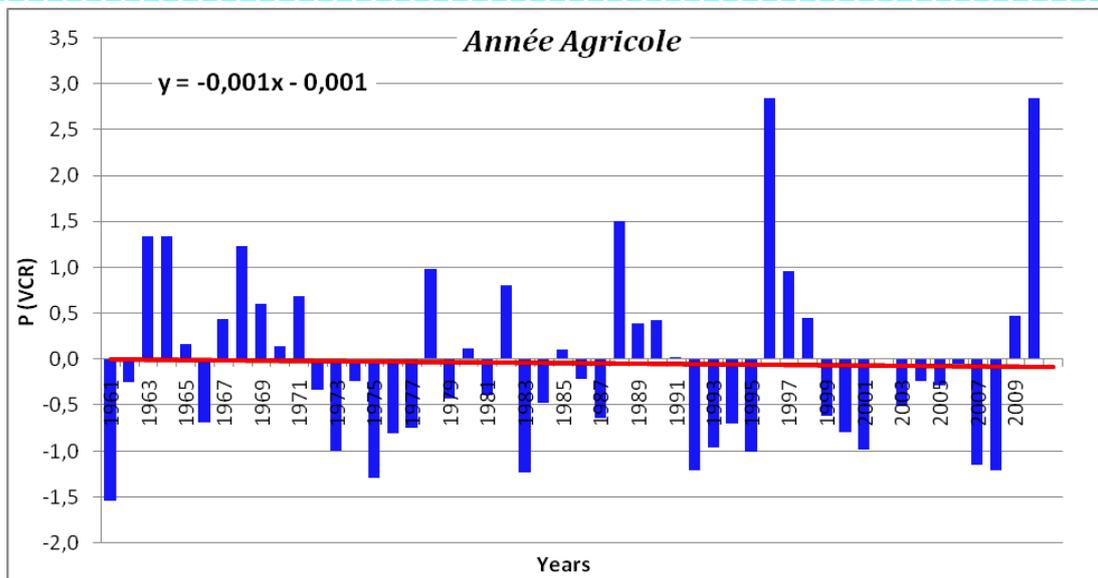
## *Webographie :*

- <http://www.ncl.ucar.edu/Applications/spi.shtml>
- <http://www.ncdc.noaa.gov/wdc/wdcamet-ncdc.html>
- <http://www.ncdc.noaa.gov/sotc/global/2014/1>
- <http://drought.unl.edu>
- <http://www.changement-climatique.fr>.
- <http://drought.unl.edu/MonitoringTools.aspx>
- <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/telecontents.shtml>
- <http://iridl.ldeo.columbia.edu/maproom/Global/index.html>
- <http://www.drought.unl.edu/DroughtBasics/TypesofDrought.aspx>

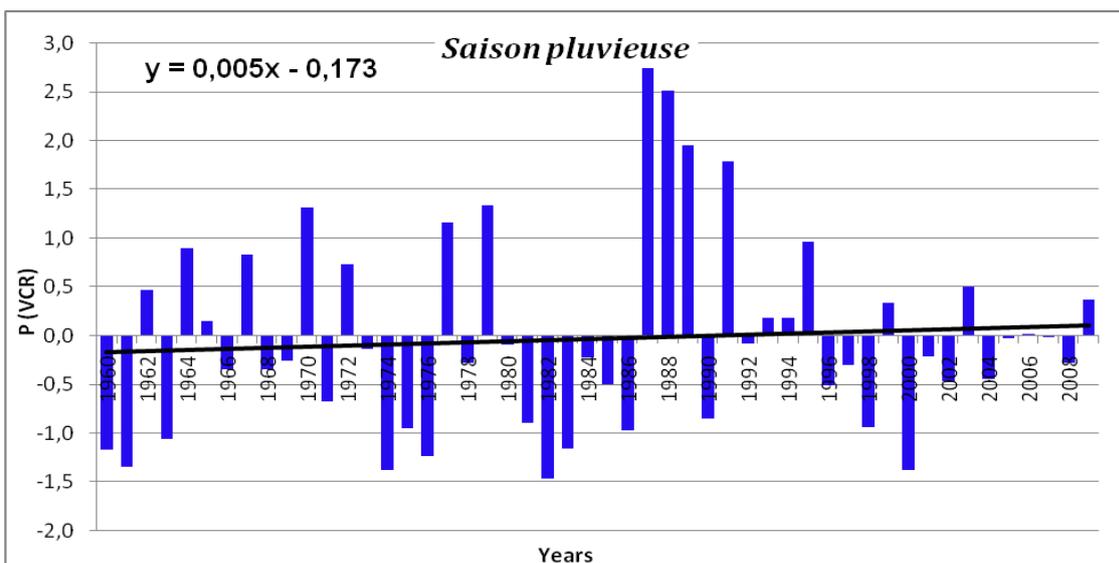
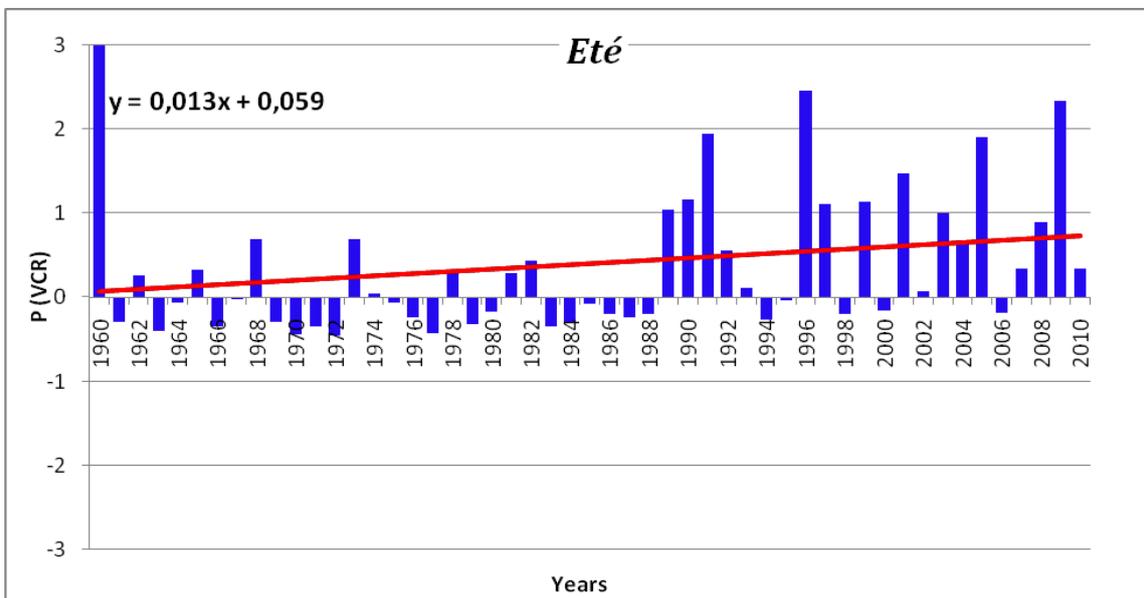
## Annexes

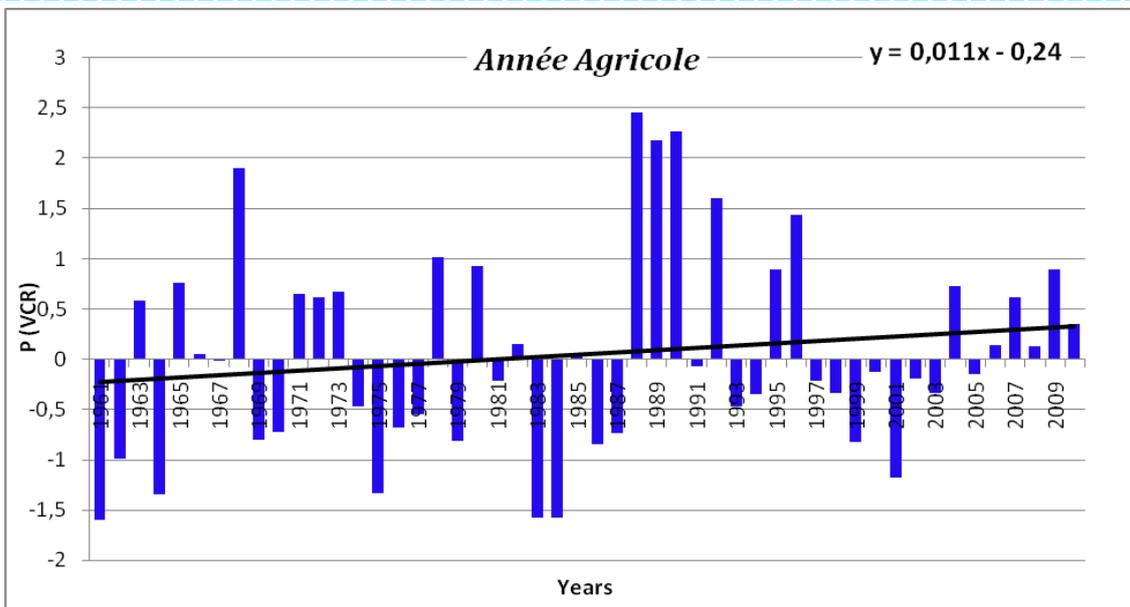
- Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls pluviométriques pour la station Agadir :



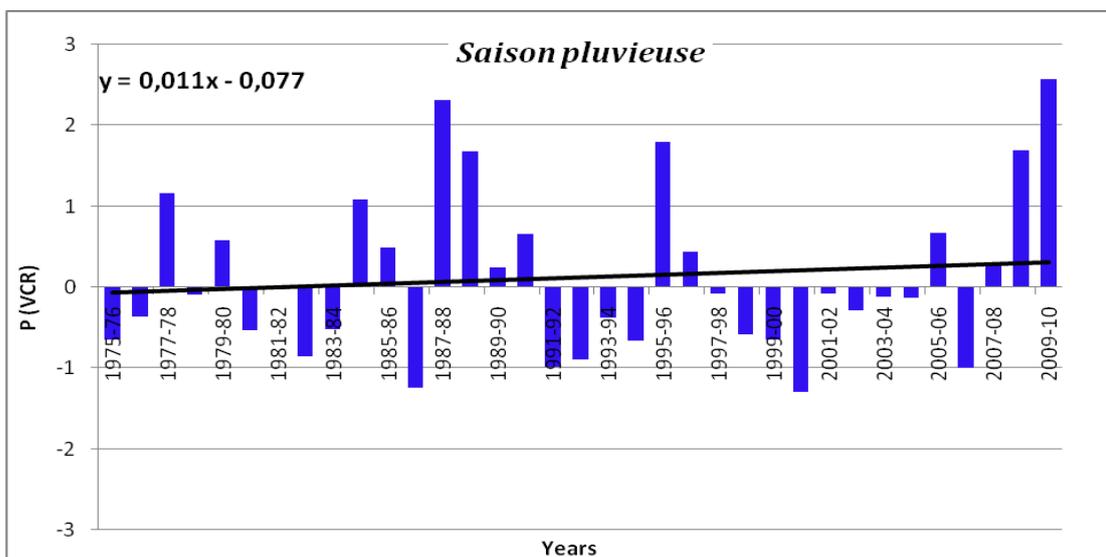
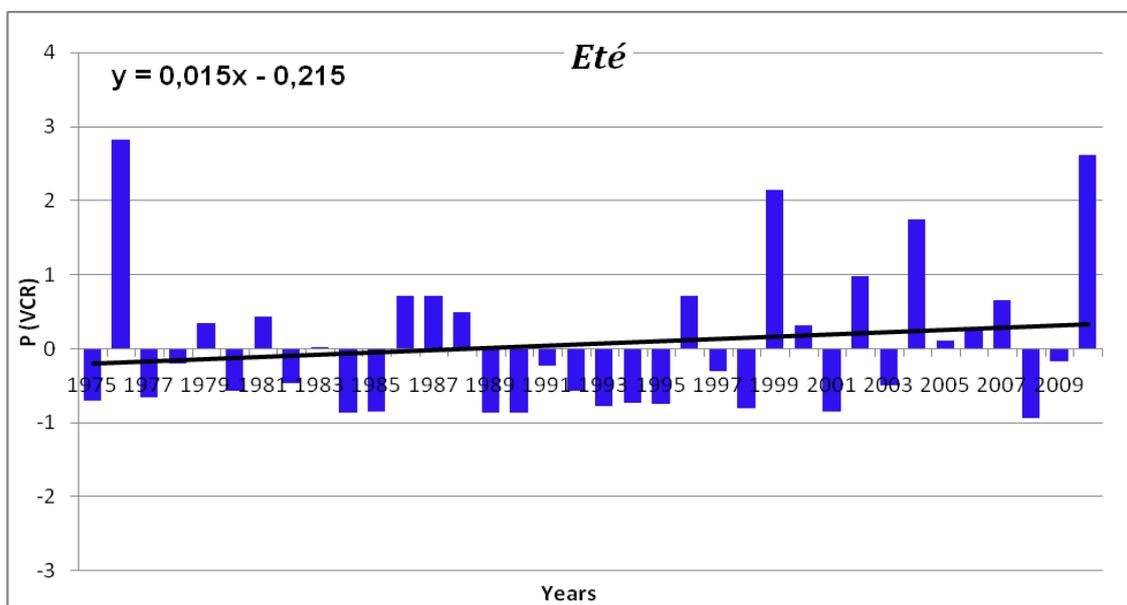


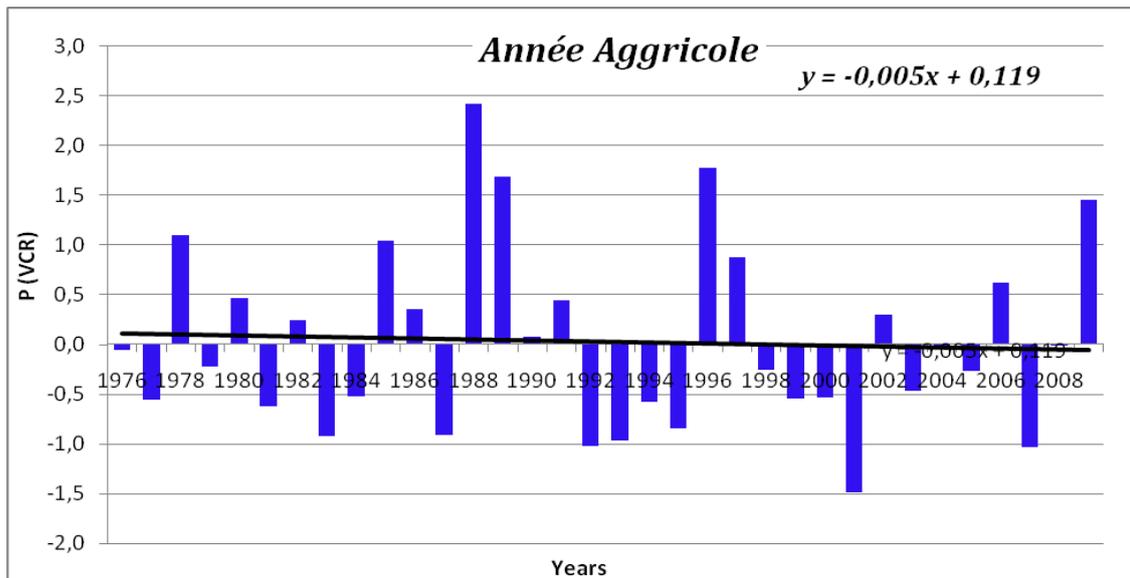
- Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls pluviométriques pour la station Ouarzazate :



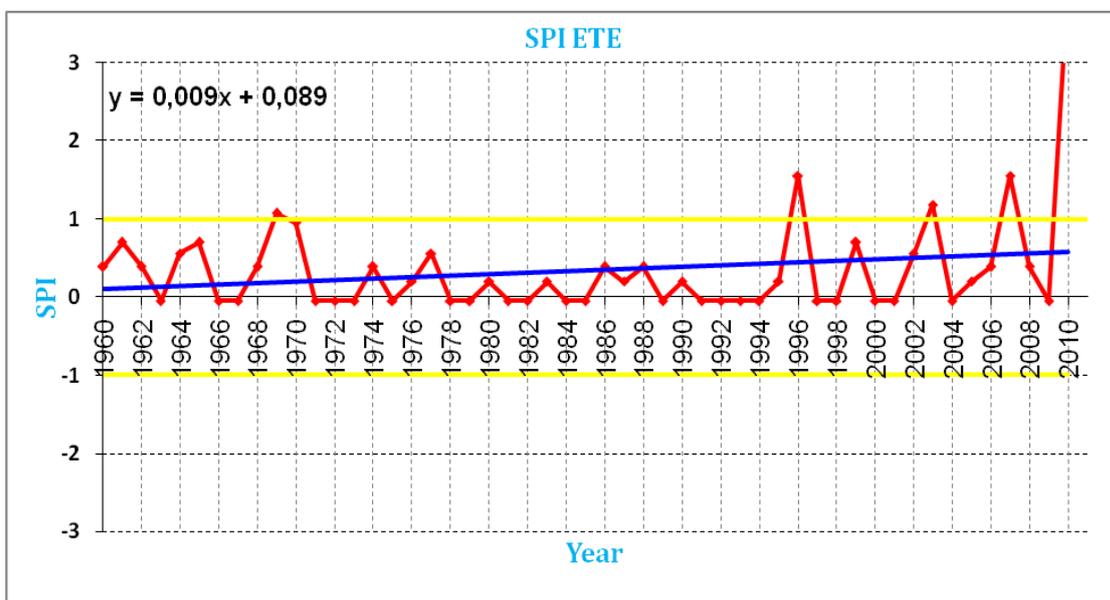


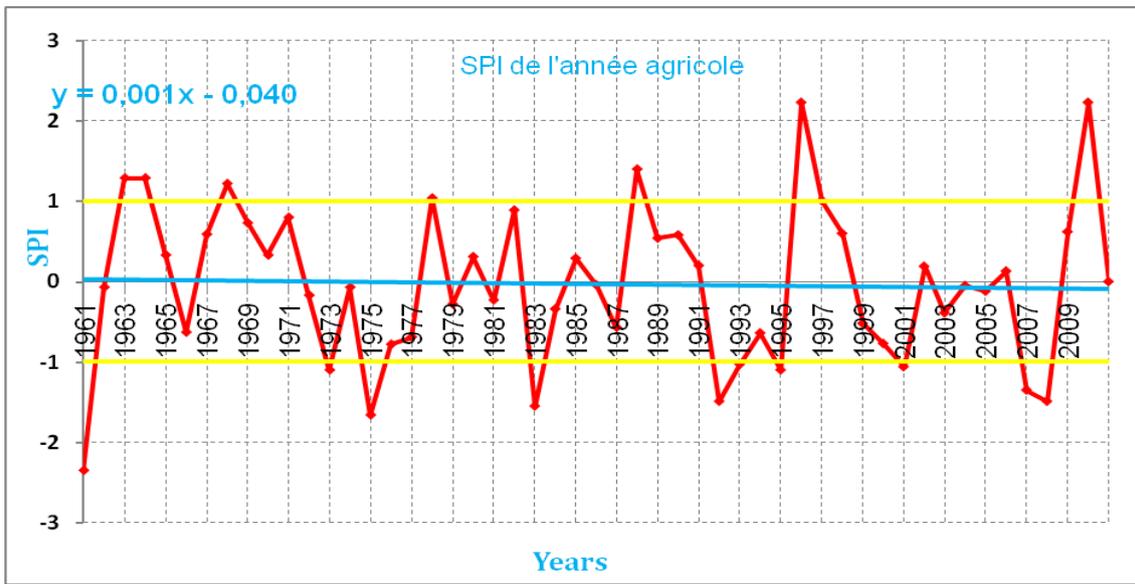
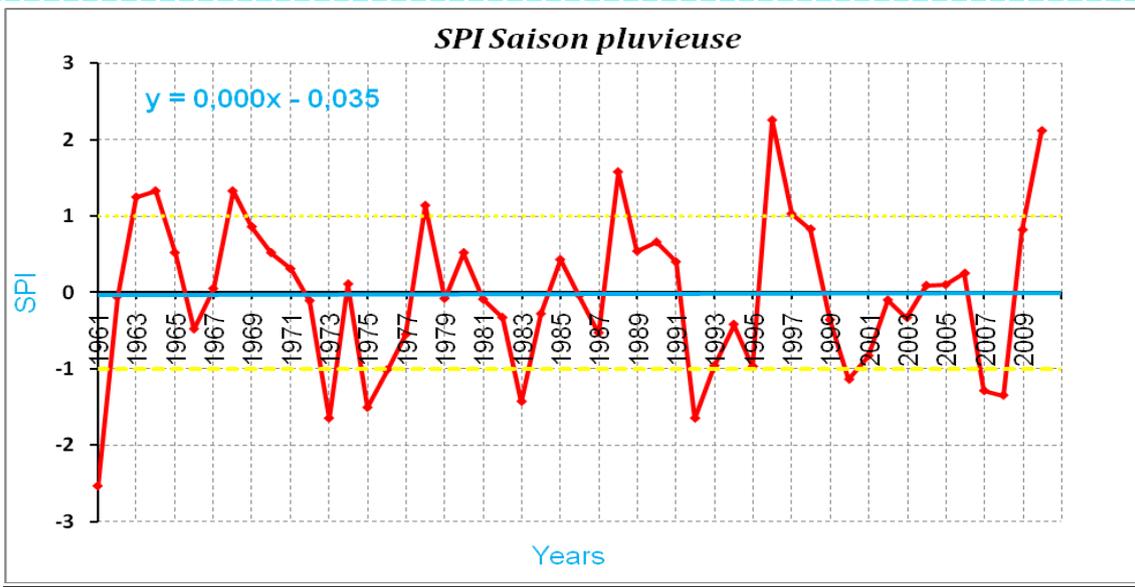
- Valeur centrée réduite (VCR) des cumuls pluviométriques pour la station Sidi Ifni :



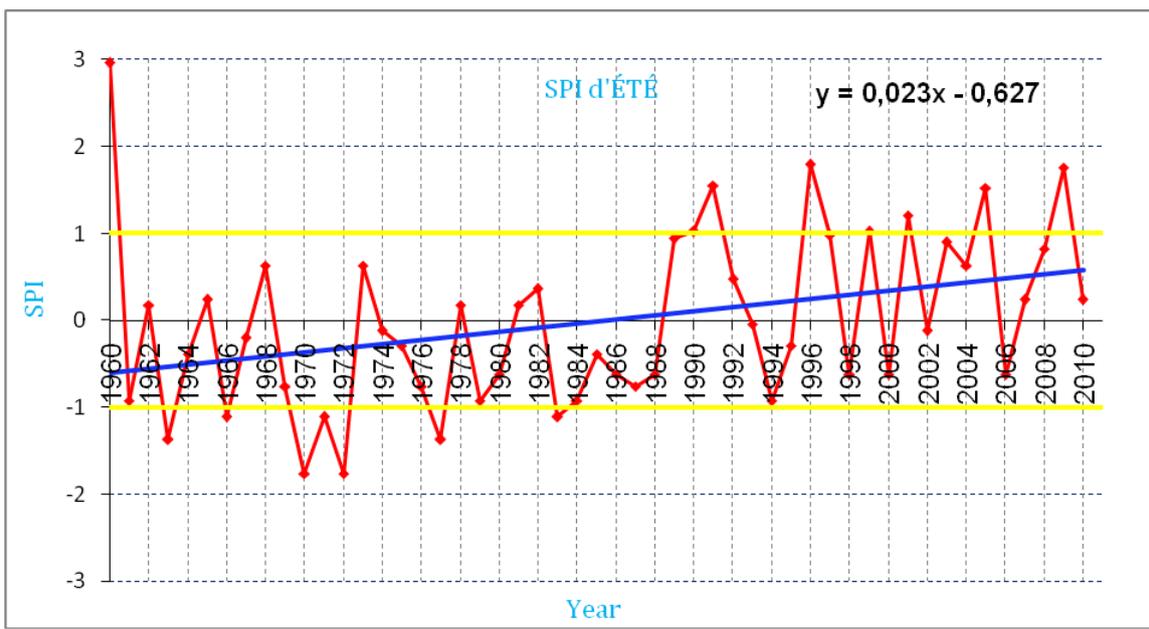


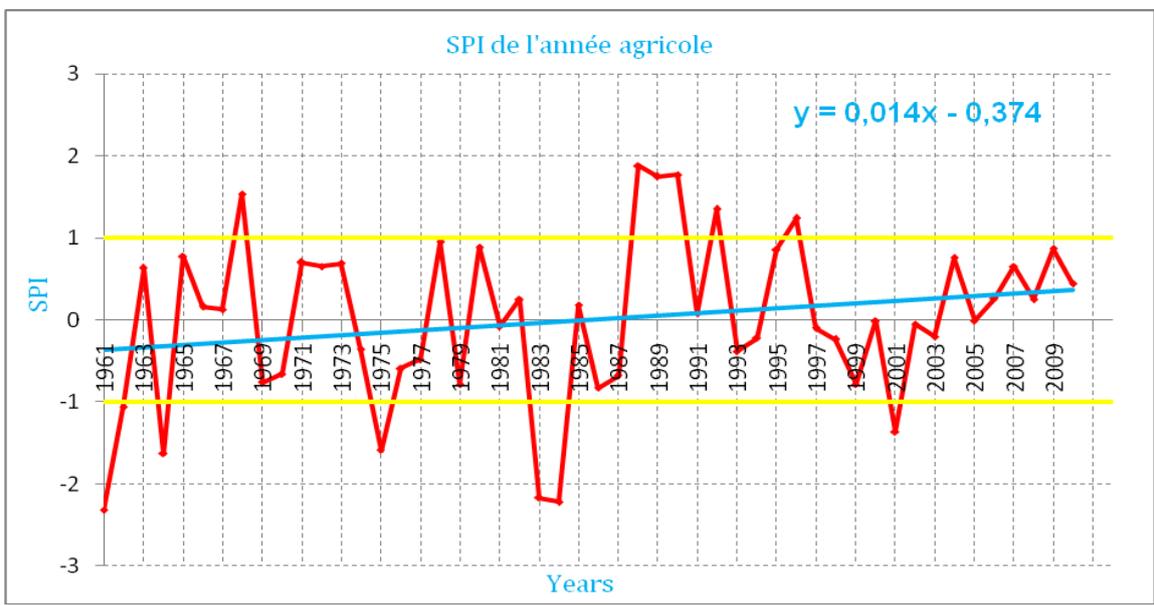
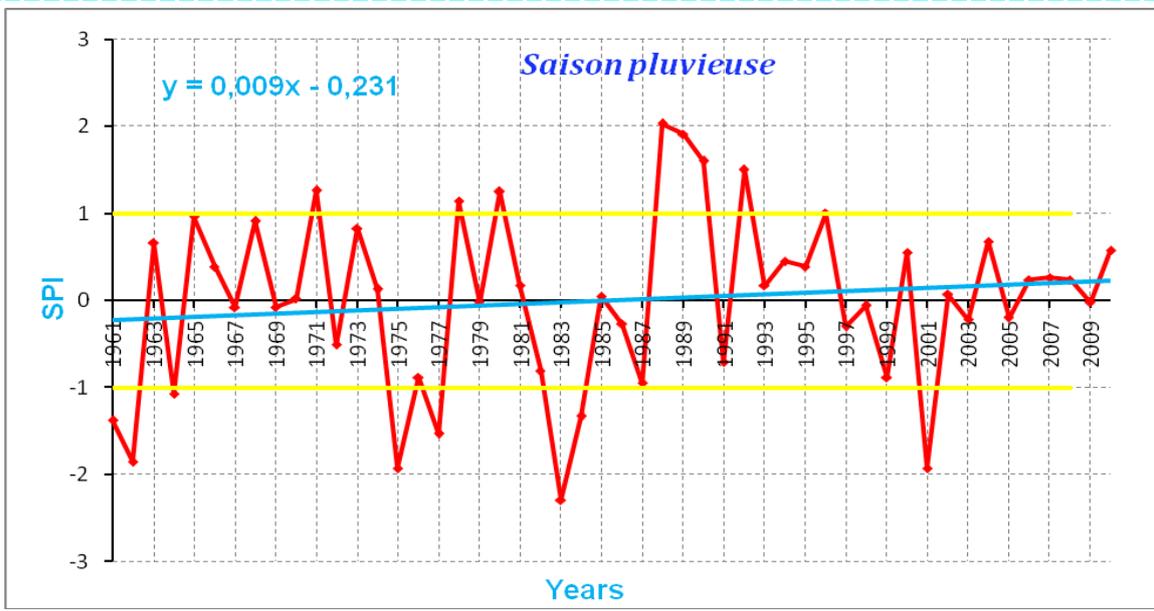
- Tendances de l'indice SPI pour Agadir :



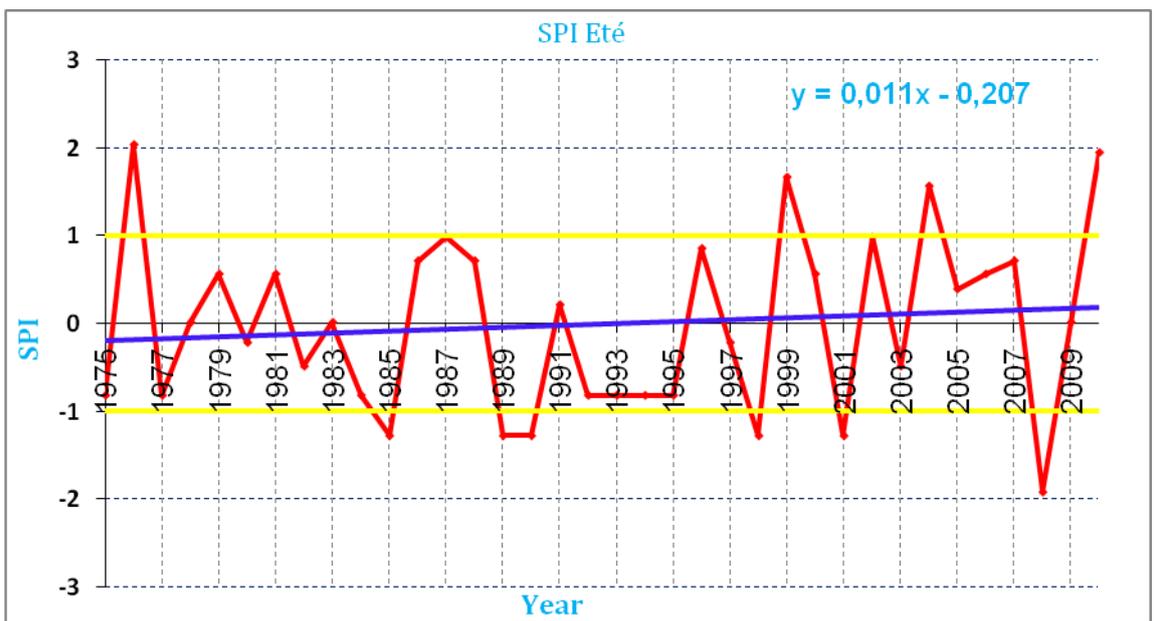


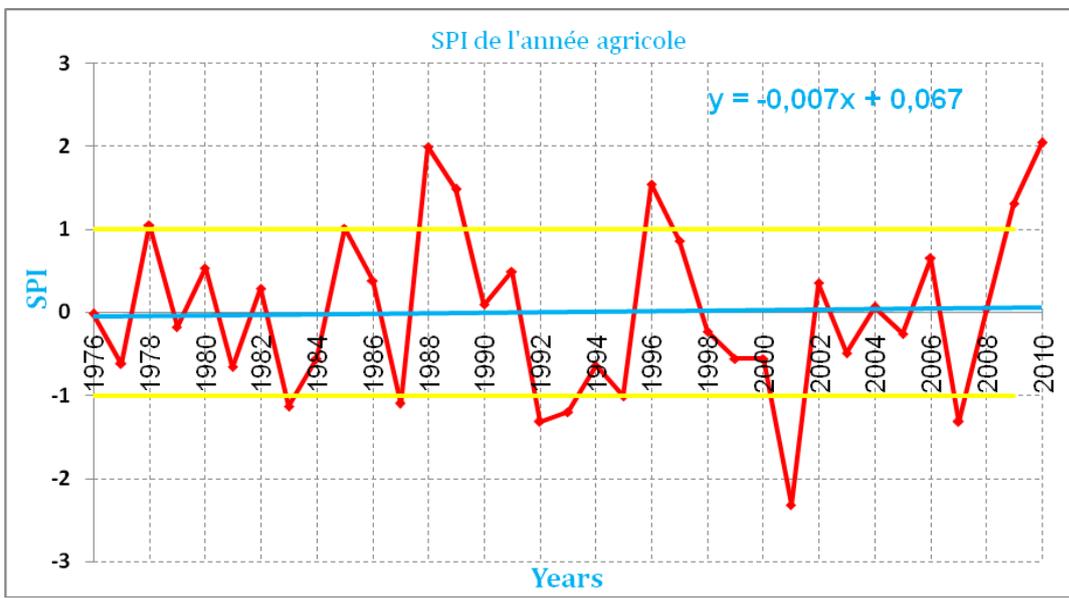
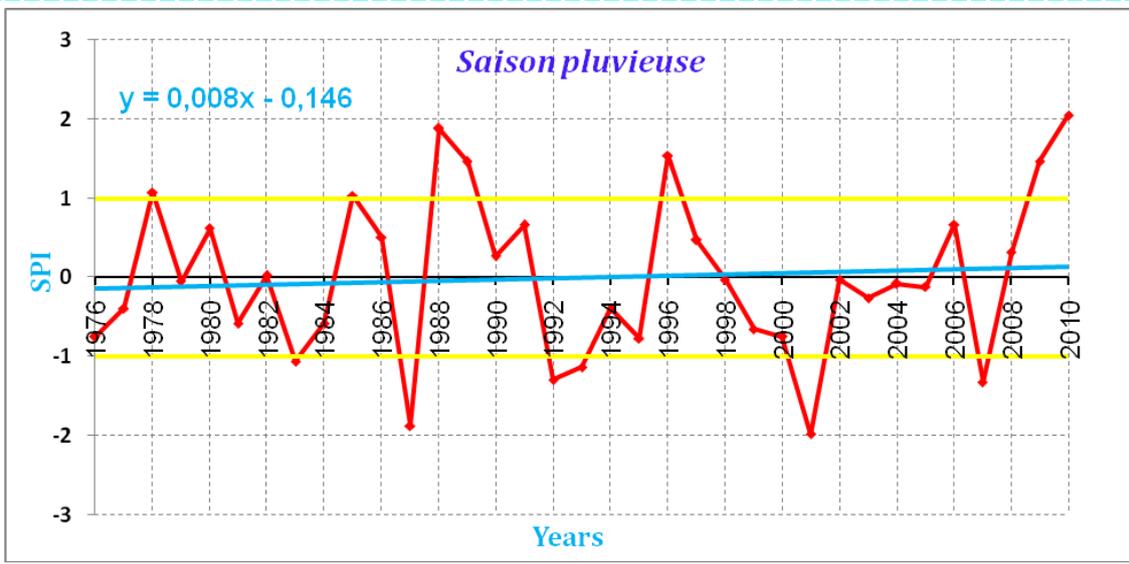
- Tendances de l'indice SPI pour Ouarzazate :



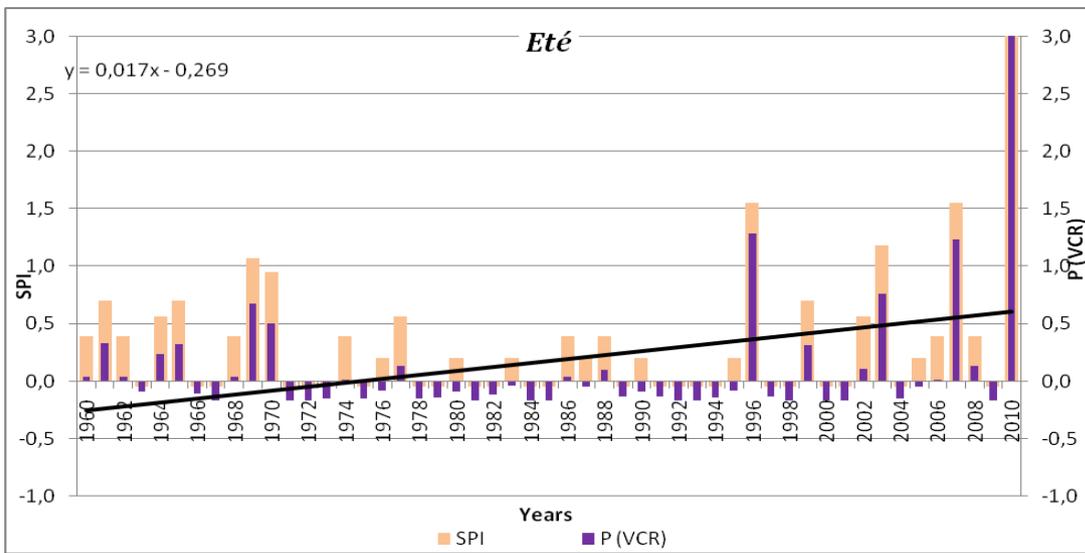


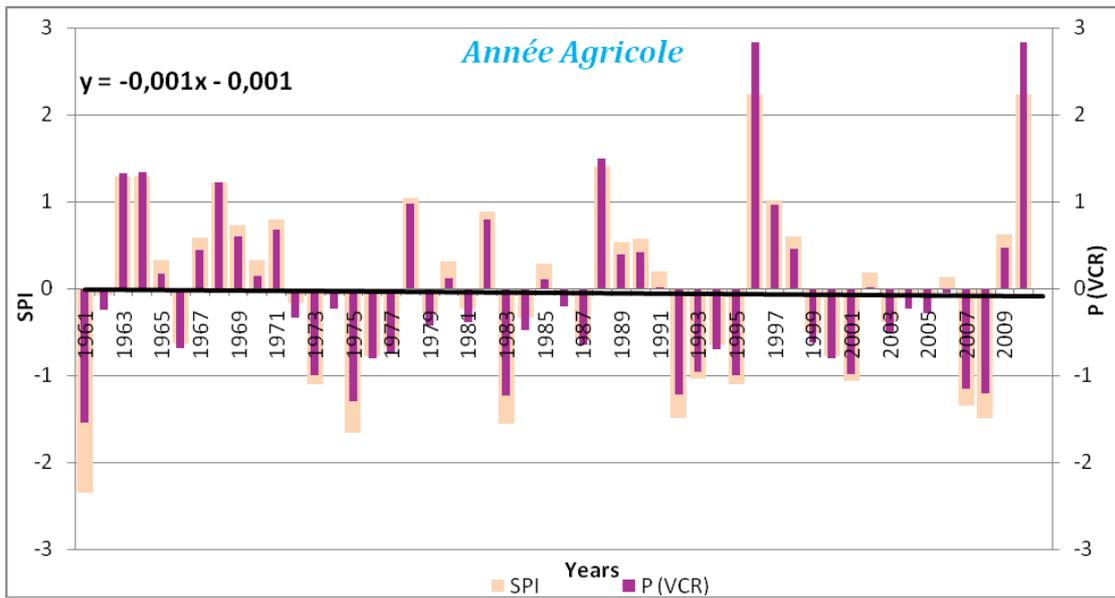
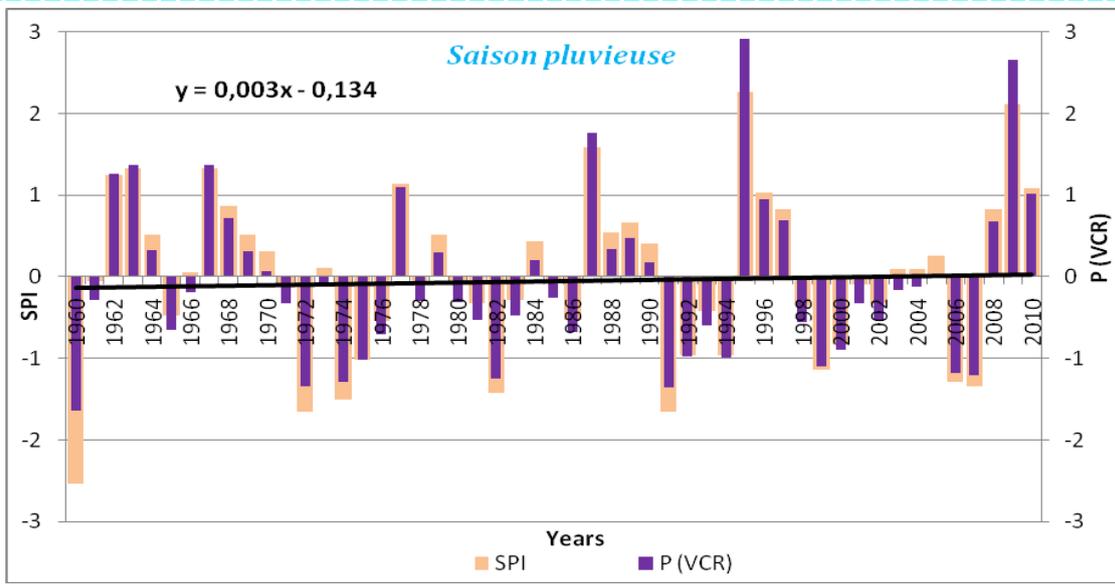
- Tendances de l'indice SPI pour Sidi Ifni :



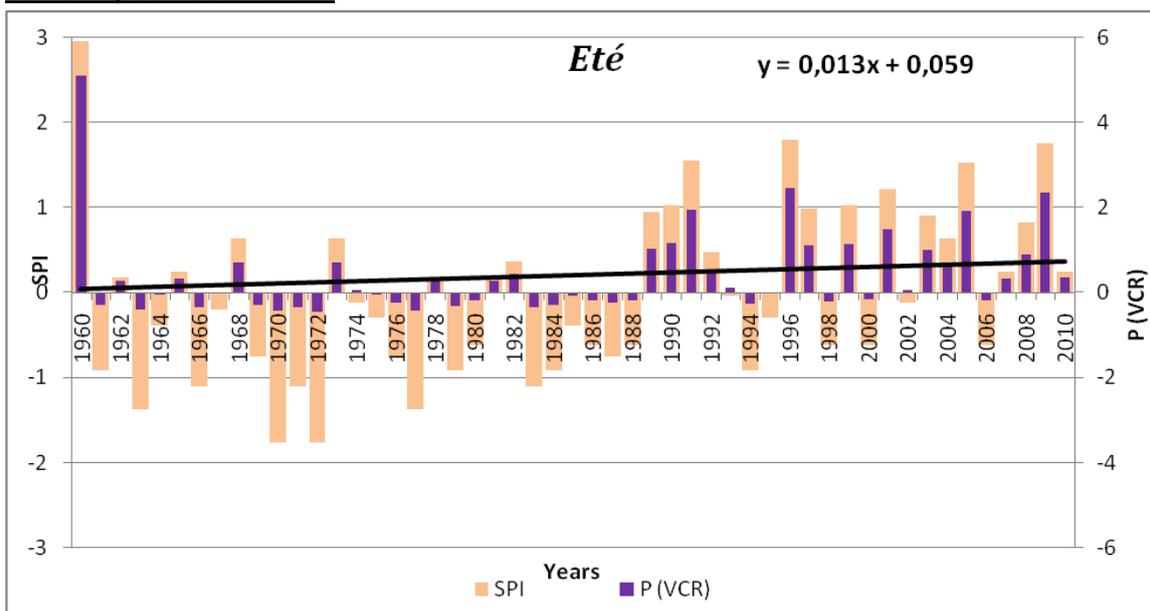


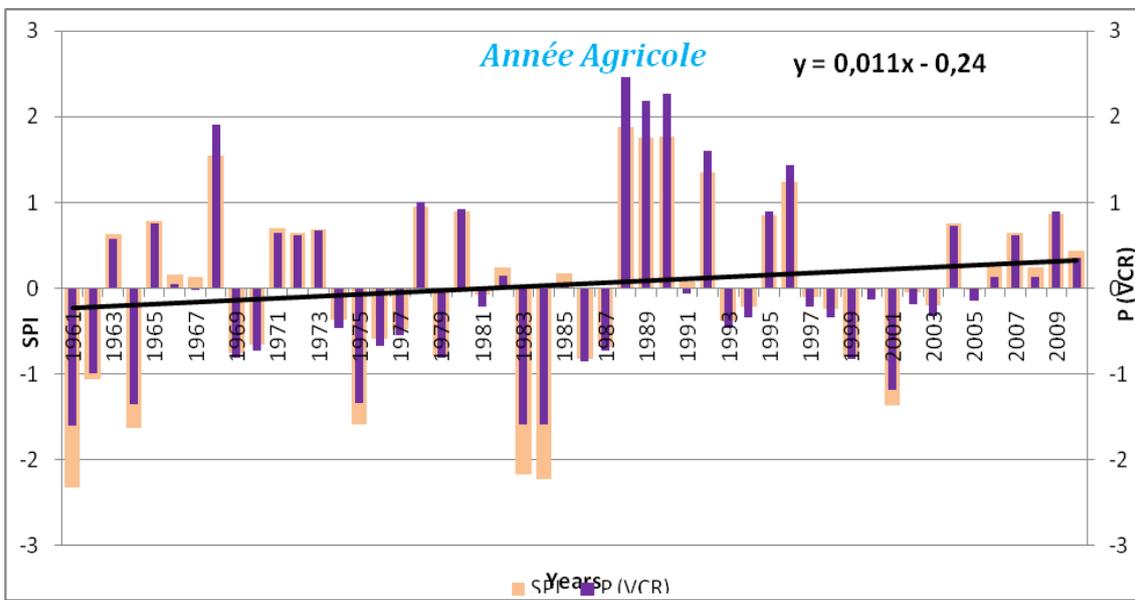
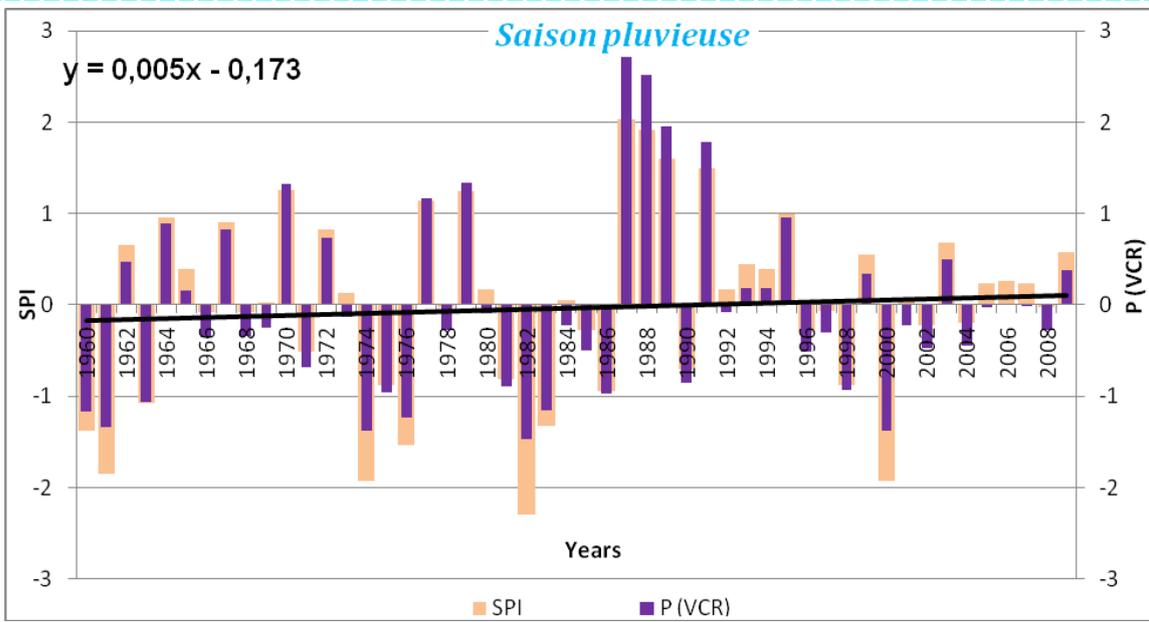
- Comparaison des tendances de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques avec celle de l'SPI pour Agadir :





- Comparaison des tendances de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques avec celle de l'SPI pour Ouarzazate :





- Comparaison des tendances de la valeur centrée réduite des cumuls pluviométriques avec celle de l'SPI pour Sidi Ifni :

