

*Etude d'impact des Changements Climatiques sur les ressources en eau et les
risques d'inondations dans la vallée d'Arghen-Bassin de Souss-Massa*

Préparé par Hind Bouhali, Ecole Hassanya des Travaux Publics

Avec Jean Payen, Experts-Solidaires

Septembre 2019

Rapport Financé par la fondation SIWA FGTO



Résumé : La vallée de l'Arghen face aux changements climatiques.



La vallée de l'Arghen caractérisée par un climat aride et un régime pluviométrique très variable, présente une grande vulnérabilité face aux changements climatiques. Les ressources en eau subissent déjà des pressions climatiques et anthropiques et la fréquence d'occurrence des sécheresses et des inondations est déjà en augmentation.



Les résultats des projections climatiques à l'horizon 2100 prévoient une baisse de la pluviométrie annuelle de - 47% selon le scénario RCP4.5 (le scénario moyen bas) et de - 58% selon le scénario RCP8.5 (le scénario pessimiste). Ces mêmes projections prévoient aussi une augmentation significative des températures moyennes de l'ordre de 2.5°C pour le scénario RCP4.5 et de 5°C pour le scénario RCP8.5.



L'impact de ces variations climatiques prévu dans la région sera fortement ressenti sur le plan hydrique (ressource en eau de surface, eaux souterraines, qualité des eaux, production agricole...).



En effet, la vallée d'Arghen, ne possédant aucune station pluviométrique/hydrométrique, aucun barrage, et très peu d'ouvrages de régulation des crues, une infrastructure insuffisante pour faire face aux risques accrus d'inondations, de sécheresses et de stress hydrique.



La ressource en eau souterraine qui constitue la seule ressource pour l'alimentation en eau potable dans la région, et une grande partie des ressources utilisées pour l'irrigation sera fortement impactée par les changements climatiques. Cette ressource malgré son importance, elle reste très mal gérée, en absence de tout suivi du niveau piézométrique des nappes et des données sur les prélèvements.



On note que la région souffre aussi de plusieurs problèmes de préservation de la qualité des eaux (la gestion des déchets solides, l'absence des périmètres de protection des forages, la collecte et le traitement des eaux usées...). L'agriculture et l'élevage, qui représentent les activités économiques principales de la population d'Arghen, reposent encore sur des systèmes



d'irrigation traditionnels « Les Séguia » qui laissent perdre l'eau par infiltration et par évaporation et présente une grande fragilité face aux crues torrentielles très fréquentes dans la région.



Ces risques climatiques, conjugués aux enjeux économiques et sociaux (l'exode rural, l'absence d'infrastructure, l'éducation...) sont des facteurs de fragilité pour le futur de la vallée et de sa population.



Abreuvement du bétail par le camion-citerne dans le village de Tamdjaoute

Table des matières

Liste des Figures	6
Liste des Tableaux	8
INTRODUCTION	9
CHAPITRE 1	10
PRESENTATION DU BASSIN VERSANT D'ARGHEN	10
1. Contexte géographique :	11
2. Contexte climatique	11
3. Contexte géologique	12
4. Situation administrative	14
5. Contexte socio-économique	15
5.1 Démographie	15
5.2 Economie	16
5.3 Habitat	16
5.4 Eau potable	16
5.5 Assainissement	17
6. Ressource en Eau	17
6.1 Les ressources en eau superficielles	17
6.2 Ressource en eau souterraine	17
CHAPITRE 2	19
ETUDE HYDROLOGIQUE DU BASSIN D'ARGHEN	19
1. Introduction	20
2. Délimitation du bassin versant	20
2.1 Réseau hydrographique :	22
2.2 Détermination des paramètres physiques du BV	22
2.2.1 Carte et courbe hypsométrique	23
2.2.2 Détermination des paramètres géomorphologiques du BV	24
2.3 Calcul du temps de concentration	27
3. Potentiel pluviométrique	29
3.1 Collecte des données historiques	29
3.2 Choix des stations représentatives	29
3.3 Variabilité climatique temporelle des pluies annuelles	30

3.4	Homogénéité des données pluviométriques	32
3.1	Zonage climatique et calcul de pluie moyenne.....	32
4.	L'évapotranspiration potentielle (ETP).....	33
5.	Calcul des débits de pointe	34
5.1	Méthodes empiriques	34
5.1.1	Mallet-Gautier	34
5.1.2	Fuller II	34
5.1.3	Hazan Lazareviç	35
5.1.4	Conclusion	35
5.2	Méthode d'ajustement et transposition	36
5.2.1	Analyse fréquentielle.....	36
5.2.2	Gradex des débits.....	37
5.2.3	Transposition des débits.....	38
5.3	Conclusion	39
CHAPITRE 3		41
ETABLISSEMENT DE LA SITUATION CLIMATIQUE DE REFERENCE, PROJECTIONS ET SCENARIOS CLIMATIQUES A L'HORIZON 2100		41
1.	Situation climatique de référence.....	42
1.1	Situation climatique mondiale	42
1.1.1	5ème rapport du GIEC (2014).....	42
1.1.2	Les constats du 5ème rapport sur l'évolution du climat.....	42
1.1.3	Les projections climatiques du 5ème rapport du GIEC.	42
1.2	Situation climatique nationale	44
1.2.1	Engagement du Maroc au régime international sur le changement climatique	44
1.2.2	La 3 ^{ème} communication nationale du Maroc à la CCNUCC 2016	45
1.2.2.1	Projections climatiques au Maroc.....	45
1.2.2.2	Impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Maroc	47
1.2.3	2 ^{ème} communication nationale du Maroc à la CCNUCC 2010 (cas du bassin du Sous-Massa) 49	
1.2.4	Le Plan Territorial de lutte contre le Réchauffement Climatique de la région de Sous Massa (PTRC SM).....	50
2.	Projections et scénarios climatiques à l'horizon 2100	51
2.1	Scénarios d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES).....	51
2.1.1	Les scénarios A1A2 B1B2 : Rapports (2001-2007).....	51
2.1.2	Les scénarios RCP : 5ème Rapport du GIEC (2014)	52
2.1.3	Comparaison et choix des scénarios d'émission de GES.....	53
2.1.4	Scénarios choisis pour l'étude	53

2.2	Etablissement des projections climatiques à grande échelle	55
2.2.1	Modèles de circulation générale (MCG).....	55
2.2.2	Projections climatiques de CMIP5.....	56
2.2.2.1	Température moyenne mensuelle à l’horizon 2100	57
2.2.2.2	Température maximale mensuelle à l’horizon 2100.....	58
2.2.2.3	Température minimale mensuelle à l’horizon 2100	60
2.2.2.4	Précipitations moyenne mensuelle à l’horizon 2100	62
2.3	Descente d’échelle (Downscaling).....	64
2.3.1	Méthodes de downscaling	64
2.3.1.1	Descente d’échelle dynamique	64
2.3.1.2	Descente d’échelle statistique	65
2.3.2	Projections Climatiques au niveau de la zone d’étude	65
2.3.2.1	Choix des MCG.....	66
2.3.2.2	Projections climatiques	66
2.3.3	Evaluation des changements climatiques	68
2.4	Evaluation qualitative des impacts.....	73
2.4.1	Recommandations et mesures d’adaptation	74
CHAPITRE 4.....		77
SIMULATION HYDRAULIQUE ET ETABLISSEMENT DES CARTES DES ZONES INONDABLE.....		77
1.	Introduction.....	78
2.	Zone d’étude	79
3.	Construction du modèle.....	79
3.1	Présentation des outils informatique utilisé	79
3.2	Données et paramètres nécessaires à l’application du modèle HEC RAS.....	80
3.2.1	Les données de la topographie	80
3.2.2	Coefficient de Manning	81
3.2.3	Les débits de crues pour différentes périodes de retour et les conditions aux limites	81
3.3	Etapas d’élaboration du modèle	81
3.4	Présentation des résultats de la simulation hydraulique.....	81
3.5	Cartes des zones inondables	84
3.6	Remarques et recommandations.....	93
4.	Conclusion	93
CONCLUSION GENERALE		94
Annexe 1 : Résultats des projections climatiques pour les deux stations Taroudant Pont et Immerguen (Source ABHSM).....		96
Annexe 2 : Valeurs du coefficient n de Manning		104

Annexe 3 : Les sections transversales des points à risque d'inondation	105
Annexe 4 : Résultats de la simulation hydraulique pour les zones agricoles.....	109
Annexe 5 : Analyse fréquentielle (ajustement des Pjmax et Qjmax)	112
BIBLIOGRAPHIE.....	115

Liste des Figures

Figure 1: Position géographique du sous bassin d'Arghen	11
Figure 2 : Carte géologique du bassin versant d'Arghen.....	12
Figure 3: Colonne stratigraphique du domaine d'Igherm : (A) stratigraphie d'ensemble ; (B) détail du passage Précambrien III/Adoudounien.....	13
Figure 4 : Carte de la situation administrative du bassin d'Arghen	15
Figure 5 : délimitation du bassin d'Arghen.....	21
Figure 6 : Réseau hydrographique du sous bassin d'Arghen.	22
Figure 7 : Carte hypsométrique du bassin d'Arghen	23
Figure 8: La courbe hypsométrique du bassin d'Arghen.....	24
Figure 9 : Répartition des stations pluviométriques autour du bassin d'Arghen.....	29
Figure 10 : La variation des précipitations annuelles des stations Taroudant Pont et Immerguen.....	30
Figure 11 : Tendence des pluies annuelles de la station Immerguen.	31
Figure 12: Tendence des pluies annuelles de la station Taroudant Pont.....	31
Figure 13 : Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Immerguen et Taroudant Pont.	32
Figure 14 : Carte des polygones de Thiessen relative au bassin d'Arghen.....	33
Figure 15: représentation de Pjmax de la station d'Immerguen pour la période 1970/2014.	36
Figure 16 : Ajustement des Pjmax à la loi de Gumbel.....	37
Figure 17: Ajustement de Qjmax à la loi de Gumbel.....	37
Figure 18 : Evolution de la température moyenne en surface (entre la période 1986-2005 et 2081-2100).....	43
Figure 19 : Evolution des précipitations moyennes (entre 1986-2005 et 2081-2100)	43
Figure 20 : Variation des précipitations moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario RCP 2.6) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC)	45
Figure 21 : Variation des températures moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario RCP 2.6) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC)	46
Figure 22 : Variation des précipitations moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario RCP 8.5) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC)	47
Figure 23 : Variation des températures moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario RCP 8.5) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC)	47
Figure 24 : Projection du Capital Eau (m3/habitant/an) Scénario optimiste Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC Sinan M. et Belhouji A., 2015)	48
Figure 25 : Projection du Capital Eau (m3/habitant/an) Scénario pessimiste Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC Sinan M. et Belhouji A., 2015)	48
Figure 26 : Projection du Capital Eau (m3/habitant/an) Moyenne des scénarios optimiste et pessimiste Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC Sinan M. et Belhouji A., 2015)	48

Figure 27 : Evolution du bilan radiatif de la terre "Forçage radiatif" en W/m ² sur la période 2000-2100 selon les scénarios RCP (GIEC).....	52
Figure 28: Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m ² sur la période 1850-2250 selon les différents scénarios.....	53
Figure 29 : Mesures d'atténuation reflétées par les scénarios RCP.....	54
Figure 30 : Ordures jetées dans le lit de l'oued (Tidriouine).....	73
Figure 31 : Seuil de dérivation des crues de l'oued Imounarim envasé.....	75
Figure 32 : Canal d'irrigation de Tidriouine détérioré.....	75
Figure 33: Inondation de l'Oued Souss en Novembre 2014 au niveau de Taroudant.....	78
Figure 34 : Photographies des ouvrages de franchissements détruits sur la route en direction de Maguenoun.....	79
Figure 35: représentation schématique du dispositif informatique utilisé.....	80
Figure 36: Profils topographiques utilisés pour la simulation hydraulique de l'oued Arghen.....	80
Figure 37: Profil en long de l'oued Arghen montrant la côte d'eau pour différentes périodes de retour. ...	82
Figure 38 : Section transversale en aval du tronçon étudié montrant le plan d'eau pour différentes périodes de retour.	82
Figure 39: Section transversale en amont du tronçon étudié montrant le plan d'eau pour différentes périodes de retour.	83
Figure 40: Vitesse d'écoulement en fonction des débits le long du tronçon étudié.....	83
Figure 41: les points identifiés à risque d'inondation.....	84

Liste des Tableaux

Table 1 : Données démographiques des communes selon le recensement de 2014.	15
Table 2: Taux d'accès à l'eau potable pour chaque commune	16
Table 3 : Hypsométrie du bassin d'Arghen.....	23
Table 4:Nature du relief selon Ds.....	27
Table 5 : Caractéristiques physique du bassin d'Arghen.....	27
Table 6 : Formules de calculs de temps de concentration.	28
Table 7 : Résultat du calcul du temps de concentration en min et en h.....	28
Table 8 : Les stations pluviométriques représentatives du bassin d'Arghen (Source ABHSM).....	30
Table 9 : calcul des précipitations annuelles moyennes du bassin d'Arghen.	33
Table 10 : Valeurs moyennes journalières de l'ETP selon les mois (Source ORMVA SM, subdivision Taroudant).....	33
Table 11 : Débit de pointe calculé par les méthodes empirique pour les différentes périodes de retour...35	
Table 12 : Résultats d'ajustement de Pjmax et Qjmax à la loi de Gumbel.....	37
Table 13: Calcul des débits par la méthode de Gradex pour différentes périodes de retours	37
Table 14 : Débits de pointes du bassin d'Arghen pour différentes périodes de retours	39
Table 15 : Récapitulatif des débits de pointe calculés par les différentes méthodes.....	39
Table 16 : Projections climatiques selon le scénario RCP 2.6 (Scénario optimiste) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC).....	45
Table 17 : Projections climatiques selon le scénario RCP 8.5 (Scénario pessimiste) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC).....	46
Table 18 : Projection du capital Eau (m3/habitant/an) Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC Sinan M. et Belhouji A., 2015).....	47
Table 19:Evolution de la température et des précipitations dans les sous-bassins du Souss Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC).....	49
Table 20 : Résultats des changements climatiques globaux - Souss-Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC).....	49
Table 21 : Taux de changement des apports annuels en eau en fonction des bassins à l'horizon 2080 dans la région de Souss Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC)	49
Table 22 : Taux de changement des apports annuels en eau en fonction des bassins à l'horizon 2050 dans la région de Souss Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC)	49
Table 23 : Taux de changement des apports annuels en eau de la région de Souss Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC).....	50
Table 24 : Caractéristiques principales des RCP (Moss et al, Nature 2010).....	54
Table 25 : Projection des températures moyennes mensuelles à l'horizon 2100.	57
Table 26 : Projections des températures maximales mensuelles à l'horizon 2100	58
Table 27 : Projection des températures minimales mensuelles à l'horizon 2100	60
Table 28 : Projections des précipitations moyennes mensuelles à l'horizon 2100.....	62
Table 29: Récapitulatif des résultats des projections climatiques dans le bassin d'Arghen	70
Table 30 : Les débits retenus pour l'oued Arghen pour différentes périodes de retour en m3/s.	81
Table 31: Coordonnées des points noirs identifiés.	84
Table 32 : Caractéristiques de l'écoulement au point 1.....	85
Table 33 : Caractéristiques de l'écoulement au point 2.....	86
Table 34 : Caractéristiques de l'écoulement au point 3.....	87
Table 35: Caractéristiques moyennes de l'écoulement dans la zone 4	88
Table 36 : Caractéristiques de l'écoulement au point 5.....	90
Table 37: Caractéristiques moyennes de l'écoulement dans la zone 6	91
Table 38 : Caractéristiques moyennes de l'écoulement dans la zone 7	92

INTRODUCTION

Le réchauffement climatique représente le phénomène d'augmentation de la température des océans et de l'atmosphère. A l'échelle mondiale, il est mesuré sur plusieurs décennies et traduit une élévation de la quantité de la chaleur de la surface terrestre.

Toutes les récentes publications scientifiques (particulièrement les rapports du GIEC) sont unanimes sur la réalité d'un réchauffement climatique global de la planète, et affirment que la situation est quasi irréversible si les mesures nécessaires ne sont pas entreprises par les différents pays du Monde.

La problématique environnementale est, en effet, très liée à celle de la disponibilité de la ressource en eau. La tendance du climat à l'assèchement, observée durant les dernières décennies au Maroc, serait certainement accompagnée d'une réduction des ressources hydriques, ce qui affecterait les activités de production, la santé humaine, et les écosystèmes naturels. La ressource en eau possède une très grande acuité socioéconomique dans la région de Souss et notamment dans la vallée d'Arghen, puisque l'activité économique principale de la population repose sur l'agriculture et l'élevage.

Quant aux inondations, ils représentent un risque climatique majeur qui peut causer des pertes en vies humaines, des dégâts matériels et la dégradation de l'environnement. A l'échelle du bassin d'Arghen, ce risque devient de plus en plus fréquent menaçant la population, les infrastructures et les champs agricoles situés sur les berges de l'oued. Et dans un contexte du changement climatique, ce risque ne peut que gagner en intensité en multipliant les dégâts.

La connaissance et la prévision de l'évolution future du climat et notamment de son impact sur la ressource en eau s'avère indispensable afin de prendre en considération ces enjeux dans les stratégies du développement de la région. C'est dans ce cadre que s'inscrit l'objectif de notre étude, qui se présente en quatre grands chapitres.

Le premier chapitre sera consacré à une présentation générale de la zone d'étude à savoir son cadre géographique, climatique, géologique et socioéconomique.

Le deuxième chapitre comprend une étude hydrologique du bassin d'Arghen, l'analyse des différents paramètres physiques et géomorphologiques en utilisant le SIG, l'analyse des tendances des précipitations, l'évaluation de la qualité des données hydrologiques et le calcul des crues de différentes périodes de retours qui seront par la suite utiliser dans la modélisation hydraulique de l'oued Arghen dans le dernier chapitre.

Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation du changement climatique dans le bassin d'Arghen en se basant sur des projections des températures et des précipitations selon des scénarios d'émission de GES issus du 5^{ème} rapport du GIEC, à l'horizon 2100.

Le quatrième chapitre est dédié à l'étude des risques de débordement de l'oued Arghen et l'élaboration des cartes des zones inondables.

CHAPITRE 1

PRESENTATION DU BASSIN VERSANT D'ARGHEN

1. Contexte géographique :

Oued Arghen est un affluent rive gauche de l'oued Souss, le bassin versant de l'oued Arghen draine le versant nord de la chaîne montagneuse de l'Anti-Atlas. Il fait partie du grand bassin versant de l'oued Souss.

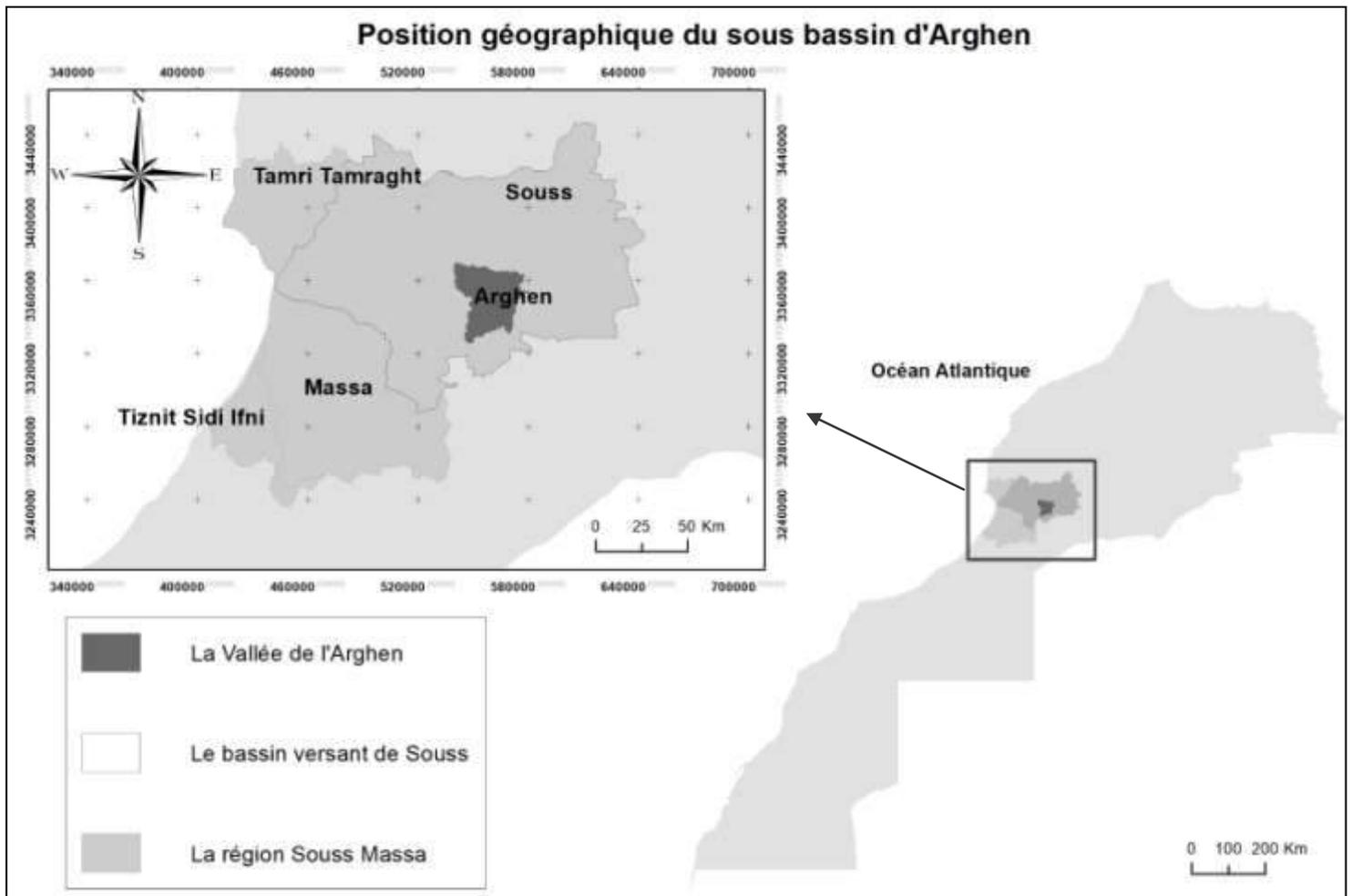


Figure 1: Position géographique du sous bassin d'Arghen

2. Contexte climatique

Aucune station météorologique ne se trouve dans le bassin versant d'Arghen, pourtant on peut bien approcher les caractéristiques du climat du bassin versant d'Arghen en se référant aux stations les plus proches : Immerguen, Taliouin et Pont Taroudant.

Trois facteurs déterminent le climat méditerranéen semi-aride de la région de Souss, 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. La vallée de l'Arghen, qui se trouve dans la zone occupant le contrebas du relief de l'Atlas, connaît un climat aride malgré une large ouverture sur l'Atlantique. Les précipitations dans le sous bassin d'Arghen ont une moyenne de 235

mm par an, l'évaporation moyenne annuelle est estimée à 1640 mm (Source ORMVA SM, subdivision Taroudant).

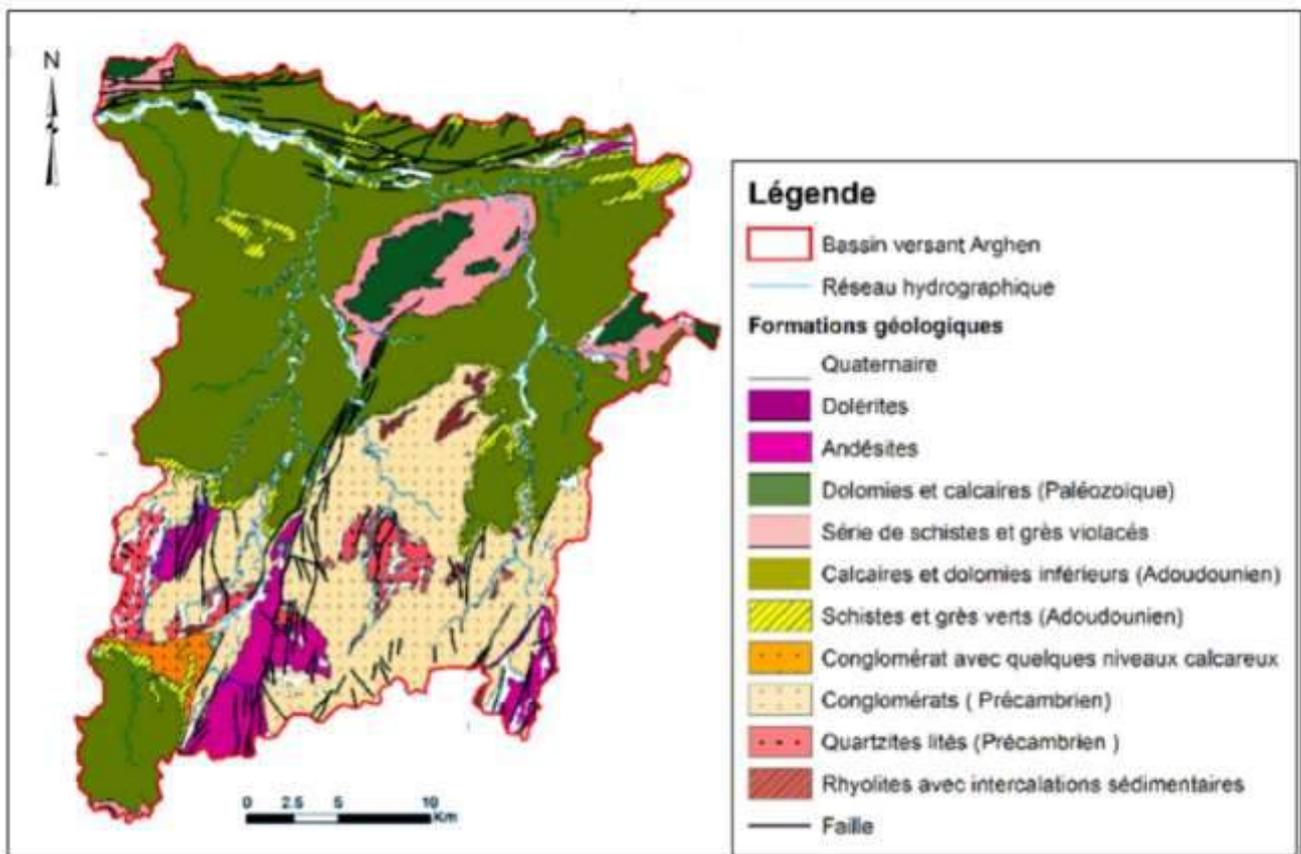
Les températures sont régulières, avec une moyenne annuelle de 20°C, Le mois le plus froid est celui de Janvier, qui connaît des températures minimales moyennes de 11.6°C, les mois les plus chauds sont Juillet et Aout, avec des températures maximales moyennes de 30 °C (Analyse de la température moyenne de la station Pont Taroudant (1970-2005).

L'humidité relative mensuelle moyenne est de l'ordre de 58% (Analyse des données de l'humidité relative fournies par l'ABHSM de la station Pont Taroudant (1970-2001)).

Le vent qui souffle dans la région est généralement sec et chaud connu sous le nom de « Chergui » sa vitesse moyenne est de 1,26m/s de l'Est (Analyse des données du vent fournies par l'ABHSM de la station Pont Taroudant (1970-2001)).

3. Contexte géologique

Carte géologique du Bassin versant d'Arghen (extraite de la carte géologique d'Igherm au 1 :100.000)



La vallée de l'Arghen fait partie intégrante du massif d'Irherm, avec une géologie très variée, les figures ci-dessous montrent la nature lithologique des roches :

Figure 2 : Carte géologique du bassin versant d'Arghen

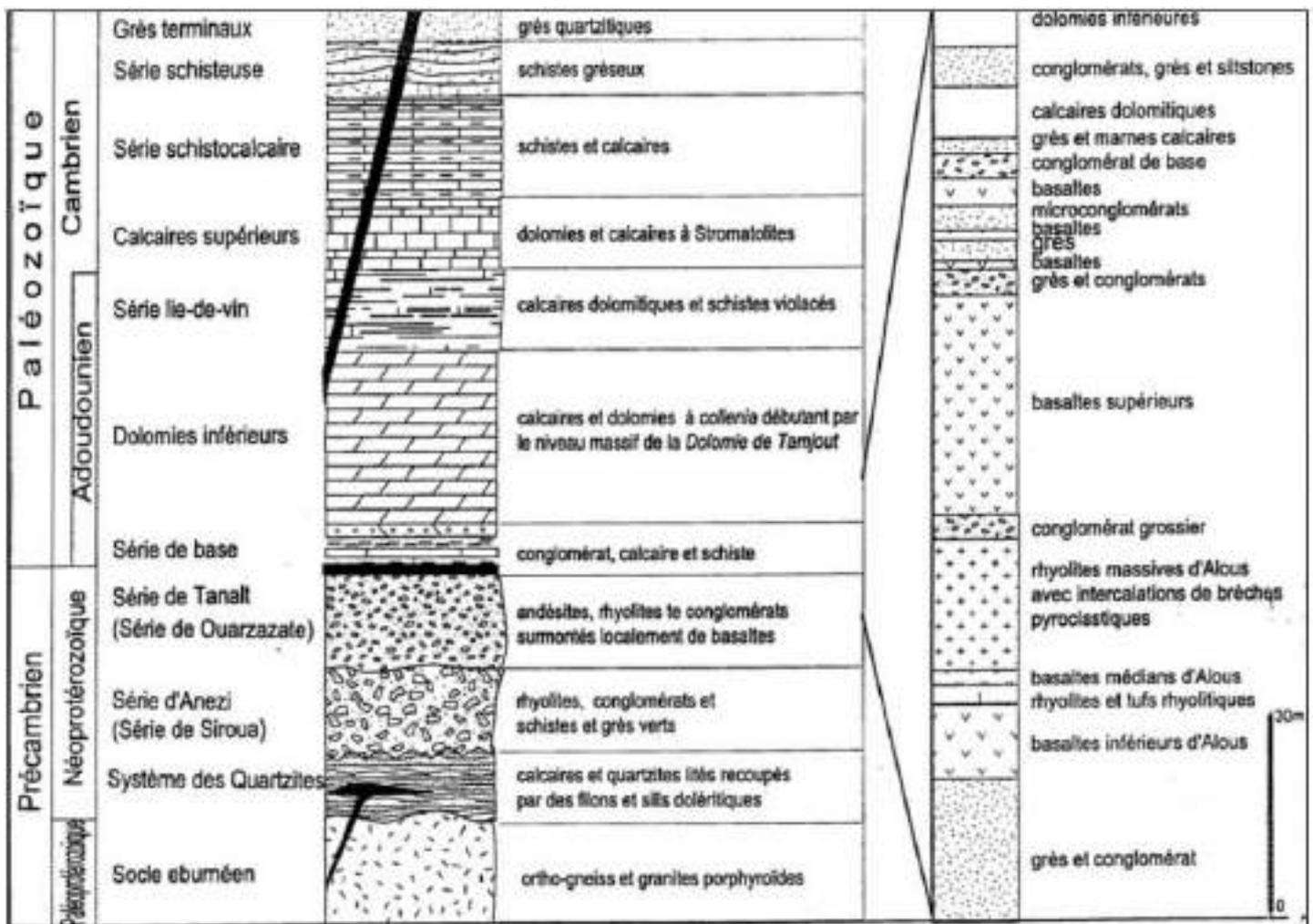


Figure 3: Colonne stratigraphique du domaine d'Igherm : (A) stratigraphie d'ensemble ; (B) détail du passage Précambrien III/Adoudounien. (Source Thèse Robert Ambroggi Etude géologique du versant méridional du haut Atlas occidental et de la plaine de Souss)

La géologie du bassin d'Arghen peut être décrite comme suit :

- Les alluvions et les terrasses limoneuses du quaternaire (Rharbien et Soltanien), et le quaternaire très ancien à cailloutis de la haute vallée d'Aït Kourbane et les plateaux d'Aït Amar au sud du J.Imchchach.
- Les synclinales d'Adrar Ildemtent et de Ait Abbas (le nord d'Imi N'Tayart) : dolomies et calcaire lités à niveau marneux blanc et rose (Paléozoïque), entouré par des séries « lie de Vin » composés de schiste et grès violacés (Taliwinien du précambrien) ;
- Les calcaires inférieurs formés de calcaires et dolomies (Cambrien inférieur), représentant l'essentiel du plateau carbonaté (Adoudounien);
- La série de base formé de schiste et grès verts (Adoudounien);
- Les conglomérats du massif d'Ida ou Gnidif et d'Agouni Ougram, entourant les formations du quartzite lités (Précambrien II) ;
- Les massifs d'Ida ou Kensous (Tanamert et J.Fidoust) et d'Ida ou Nadif (J.Aklim et Tagragra), formés par des Andésites et des conglomérats du Précambrien III .

4. Situation administrative

Administrativement, le bassin d'Arghen se situe dans sa grande partie sur les communes de la province de Taroudant :

- Adar : 22.75 % de la superficie
- Imi Ntayart : 22.63 %
- Toughmart : 18.29 %

Et dans une moindre mesure sur les communes :

- Azaghar Nirs : 9.31 %
- Nihit : 6.93 %
- Igherm : 8.32 %
- Arazane : 2.15 %

La figure ci-dessous représente la situation administrative du bassin d'Arghen.

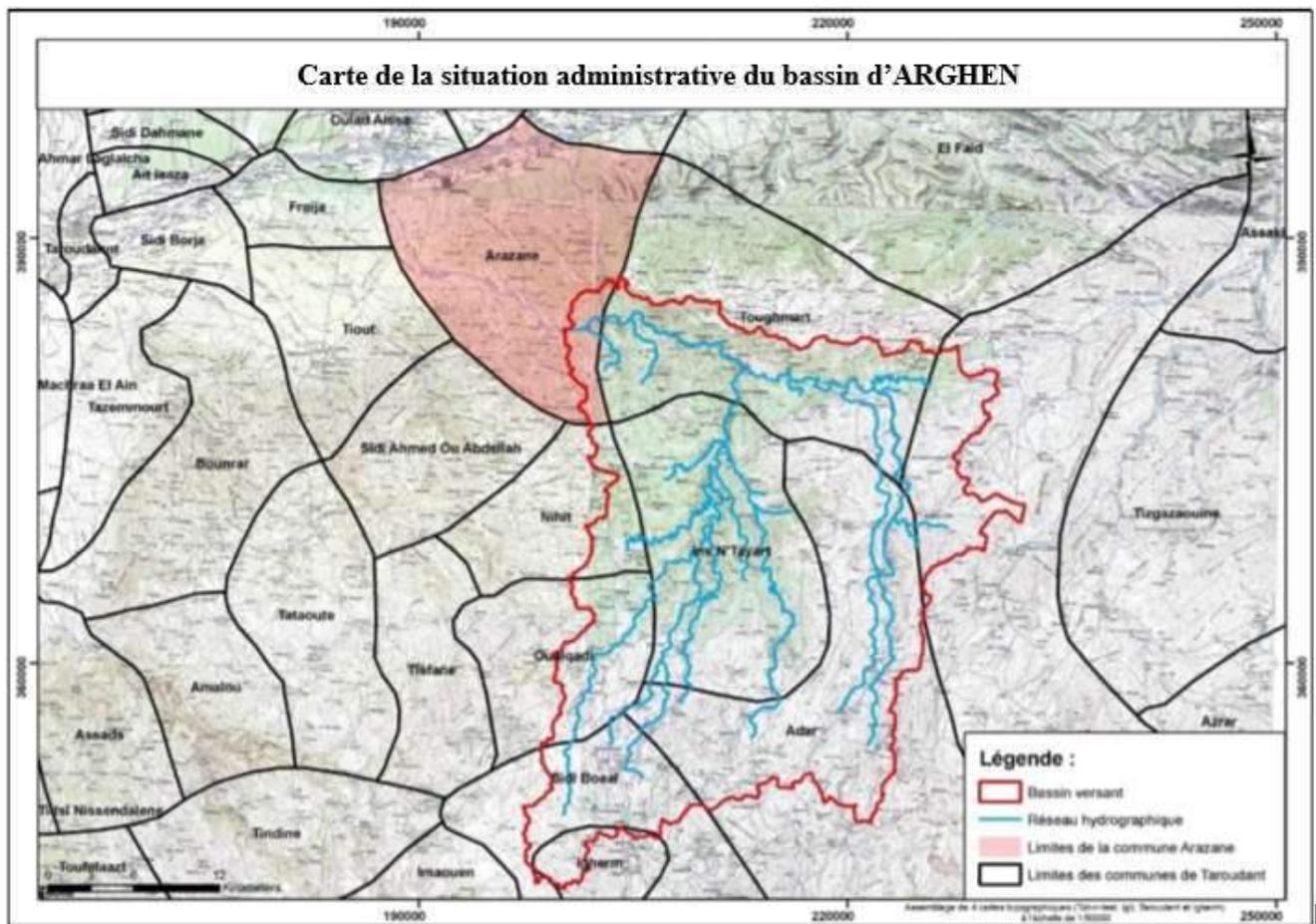


Figure 4 : Carte de la situation administrative du bassin d'Arghen (Source Service eau DPETL)

5. Contexte socio-économique

5.1 Démographie

Le Tableau ci-dessous représente les résultats du recensement national établi en 2014 sur les habitants de la vallée d'Arghen :

Table 1 : Données démographiques des communes selon le recensement de 2014 (Source les Communes Territoriales).

communes	Population			Taux d'analphabétisme		Age moyen du premier mariage		Taux de chômage	
	Total	Masculin	Féminin	Masculin	Féminin	Masculin	Féminin	Masculin	Féminin
Adar	4272	35%	65%	38.70%	68.10%	31.3	32.7	19.00%	76.80%
Imi N'Tayart	1164	35%	65%	55.50%	71.50%	31.8	34.5	15.30%	13.80%
Nihit	1850	39%	61%	19.30%	61.30%	31.9	31.4	42.20%	98.00%

Arazane	7964	48%	52%	32.20%	55.90%	30.8	26.8	5.00%	14.50%
Toughmert	6746	42%	58%	46.90%	69.80%	29.5	29.5	9.40%	21.00%
Arghen	21996	42%	58%	37.76%	64.25%	31.06	30.98	11.94%	37.47%

Toutes ces communes et villages du bassin d'Arghen ont en commun un fait marquant : un très fort exode rural (seule Arazane présente une croissance démographique en hausse, mais cela est dû à la partie Nord de son territoire, plus attractive. Sa partie Sud correspondant au bassin d'Arghen étant en fait peu peuplée). Beaucoup d'habitants préfèrent en effet quitter le contexte difficile de la zone pour aller chercher un emploi dans les grandes villes du pays. C'est notamment le cas des hommes et jeunes hommes.

5.2 Economie

Les activités principales des habitants sont l'élevage, avec la présence de nombreux cheptels d'ovins et caprins, et la culture de l'arganier qui est emblématique de la région. Les autres cultures restent rares, compte tenu du manque de ressources en eau. On compte enfin la présence d'enseignants qui assurent l'éducation des enfants dans des écoles souvent modestes.

5.3 Habitat

Les douars présentent sinon un habitat principal en pisé, quelques ménages plus aisés ayant cependant fait construire des maisons en maçonnerie moderne. Enfin tous ces villages sont desservis par un réseau électrique.

5.4 Eau potable

Après l'établissement du Schéma d'aménagement et gestion intégrée de l'eau SAGIE de la vallée d'Arghen en 2010, il y eut la mise en œuvre de plusieurs projets d'alimentation en eau potable dans la vallée. De ce fait le taux d'accès à l'eau potable a connu un avancement important dans la région pendant ces dix années dernières.

Le tableau ci-dessous résume la situation d'accès à l'eau potable dans les communes de la vallée d'Arghen.

Table 2: Taux d'accès à l'eau potable pour chaque commune (Source les Communes Territoriales).

communes	Nombre de Douars	Nombre de Douars raccordés	Taux d'accès
Adar	60	40	66%
Imi N'Tayart	34	24	70%
Nihit	21	16	76%
Arazane	35	27	77%
Toughmert	47	38	80%
Arghen	197	145	74%

5.5 Assainissement

Actuellement, la commune d'Arazane est la seule commune qui a réalisé des projets d'assainissement, notamment le projet d'assainissement du Douar Ben Ali (filtre à sable planté de roseaux), ainsi que le projet d'assainissement du village Arazane, où se trouve le siège de la commune d'Arazane.

D'autres projets d'assainissement sont en cours d'étude ou de réalisation notamment le projet d'assainissement d'Ighir N'Ouamane dans la commune de Nihit, le projet d'assainissement du douar Maguenoun dans la commune de Toughmert et l'assainissement du douar Tizirt dans la commune d'Imi N'Tayaght.

6. Ressource en Eau

6.1 Les ressources en eau superficielles

Le bassin versant d'Arghen est drainé par une multitude d'oueds plus ou moins importants, ces cours d'eau sont caractérisés par des régimes hydrologiques connus par leurs irrégularités. Ces régimes sont tributaires d'une pluviométrie irrégulière et souvent violente survenant après de longues périodes de sécheresse.

Aucun barrage ne se trouve dans le bassin versant d'Arghen, pourtant l'approvisionnement en eau d'irrigation se fait à l'aide d'un système archaïque nommé « Séguia », c'est un canal à ciel ouvert généralement construit en terre et alimenté par les eaux de crue de l'oued, cette dérivation laisse perdre l'eau par infiltration et par évaporation et présente une grande fragilité face aux crues torrentielles très fréquentes dans la région.

6.2 Ressource en eau souterraine

Dans le sous bassin d'Arghen, il n'existe aucun aquifère généralisé, la ressource en eau souterraine se résume à des nappes d'extensions limitées et de productivité très variable, on distingue les unités hydrogéologiques suivantes :

- Les petites nappes en relation avec des cours de surface et drainées par des résurgences.
- Les réseaux de fissures dans les schistes, les schisto-calcaires ou dans les formations volcano-sédimentaires du Précambrien (andésites et conglomérats), ainsi que les formations carbonatées de l'Adoudounien.

Du point de vue hydrogéologique, la tectonique de l'Anti-Atlas a contribué à la mise en place des conditions favorables à la constitution des nappes. Cependant, quand elle est forte, elle crée dans le massif ancien des fissures profondes qui drainent les eaux en grande profondeur économiquement non exploitables.

Les deux contextes cités ci-dessus sont souvent associés au fond des oueds où les circulations d'eau dans les alluvions continuent dans la frange supérieure des schistes et des formations volcano-sédimentaires. La productivité des captages varie en fonction des formations captées. Les débits fournis sont généralement inférieurs à 0.5 l/s et les conductivités électriques sont en majorité inférieures à 1 mS/cm.

Dans ce contexte, le comportement hydrogéologique des principales formations peut être synthétisé comme suit (source PDAIRE SM Volume 3) :

- L'imposante série des « calcaires supérieurs » du Cambrien inférieur qui forme un alignement des crêtes bordant la boutonnière au Sud est stérile dans le voisinage d'Igherm, parce qu'elle est très épaisse. Les infiltrations d'eau circulent en profondeur et rejoignent les niveaux de base.
- Il en est de même pour la série des « calcaires inférieurs » de l'Adoudounien.
- Entre les deux, la série « lie-de-vin » de nature schisto-calcaire et dolomitique est imperméable dans la région. Sur la bordure des dépressions Précambriennes existent parfois de petites sources de faible débit au contact des schistes de base. La formation adoudounienne des calcaires et dolomies inférieures est non productive, ainsi que la série sus-jacente (« série lie de vin »).
- Au SE, la zone d'Adar est occupée par les conglomérats du Précambrien II supérieur traversés par des filons rhyolitiques du Précambrien III.

Dans les conditions hydro-lithologiques d'Igherm, les formations pouvant présenter un intérêt hydrogéologique sont les suivantes

- Les formations rhyolitiques et andésitiques du Précambrien III, imperméables dans leur masse contenant une nappe en réseau circulant dans les zones de fissuration de surface. Ces zones volcano-sédimentaires présentent un intérêt certain dans cette région caractérisée par la rareté de l'eau. Les sondages les ayant reconnues (une dizaine) sont positifs avec des productivités allant de 0,1 à 0,6 l/s ;
- Les quartzites (Précambrien II) fracturées possèdent une perméabilité de fissures et malgré la raideur générale des pentes, elles constituent un niveau porteur d'eau. Quand ces quartzites présentent un impluvium étendu, avec des bancs fortement fracturés, ils constituent un piège pour les eaux et fournissent des débits relativement élevés ;
- Les conglomérats du Précambrien présentent un comportement hydraulique analogue à celui des formations volcano-sédimentaires. Largement développés dans la région d'Igherm, possédant une perméabilité de fissures en relation avec les effets tectoniques locaux, ces conglomérats fonctionnent en général comme un drain de la zone altérée des schistes de base de l'Adoudounien. Les vingt forages ayant touché ces formations ont été tous productifs, avec des débits variants de 0,1 à 0,5 l/s ;
- La série calcaire adoudounienne et la série schisto-calcaire cambrienne constituent un complexe géologique très développé dans la région formant, un réservoir potentiel. Cependant, avec des épaisseurs dépassant les 1000 mètres et une structure généralement plongeante, les eaux infiltrées à travers les failles et les interfaces stratigraphiques s'écoulent en profondeur pour alimenter des niveaux de base (cas de la nappe de la plaine du Souss). En plus de ce caractère les volumes infiltrés étant faibles par rapport à la pluviométrie, ne saturent qu'une faible frange située à de fortes profondeurs. La vingtaine de sondages de reconnaissance y ont été exécutés sont en majorité stériles sauf 5 ayant fourni un débit de 0 à 0,3 l/s.

CHAPITRE 2

ETUDE HYDROLOGIQUE DU BASSIN D'ARGHEN

1. Introduction

L'objectif de cette partie est de délimiter notre bassin versant afin d'établir sa superficie, la longueur de son cours d'eau le plus long ainsi que ses hauteurs min et max, ces données vont servir comme données d'entrée pour le calcul des différents paramètres du bassin, du temps de concentration et du débit.

2. Délimitation du bassin versant

La délimitation du bassin versant est effectuée à l'aide de la composante ArcMap du logiciel ArcGIS, programme de traitement géospatial d'Esri. Il est principalement utilisé pour afficher, éditer, créer et analyser des données géospatiales.

La méthodologie du travail consiste en l'exploitation du modèle numérique de terrain MNT de notre zone d'étude qui sera objet à un ensemble de traitements permettant d'avoir vers la fin une schématisation de notre modèle de bassin.

Après avoir chargé le MNT, on a effectué les opérations suivantes sous **Arc Hydro Tools** :

- ⇒ **Correction du MNT (Fill sinks)** : Lors de la réalisation du MNT plusieurs erreurs ont été commises et qui sont dues essentiellement aux prélèvements et aux interpolations effectuées. Dans cette étape on procède à une correction du MNT par le remplissage des dépressions en augmentant l'altitude des cellules au niveau du terrain environnant afin de déterminer le sens d'écoulement. Cette opération permettra à l'eau de couler à travers le paysage ;
- ⇒ **Détermination du sens d'écoulement (Flow direction)** : Elle a nécessité en entrée le MNT corrigé ci-dessus. Elle génère en sortie une grille de même pas que le MNT brute, tout en donnant pour chacun de ces éléments la direction que prendrait une goutte d'eau tombée dessus ;
- ⇒ **Détermination de l'accumulation des écoulements (Flow accumulation)** : L'accumulation de l'écoulement détermine le nombre de cellules ascendantes s'écoulant dans une cellule donnée. Elle permet la définition du réseau hydrographique qui résulte de la classification de toutes les cellules dont l'accumulation est supérieure à un certain seuil. Naturellement, les cellules présentant des altitudes élevées ou celles situées au niveau de sources des cours d'eau possèdent des valeurs faibles. Par contre, celles situées dans les embouchures ou confluences ont des valeurs élevées puisqu'elles réceptionnent l'ensemble des eaux générées par les bassins ;
- ⇒ **Définition du cours d'eau (Stream définition)** : A partir de la grille de l'accumulation des flux, la fonction Stream Définition permet de sélectionner les cellules dont les valeurs sont supérieures à un certain seuil. Cette fonction nécessite donc en entrée la grille de l'accumulation des flux et le seuil minimal. Le résultat obtenu est un raster binaire, dans lequel les valeurs 0 représentent les cellules dont l'accumulation des écoulements est inférieure au seuil, et 1 sinon ;
- ⇒ **Segmentation du cours d'eau (Stream Segmentation)** : Cette fonction nécessite en entrée le Flow direction et le Stream Définition. Elle va différencier les sections du réseau hydrographique

généralisé précédemment. Toutes les cellules appartenant à un même tronçon hydrographique auront la même valeur numérique ;

- ⇒ **Détermination des sous bassins versants (Catchment Grid delineation)** : Cette fonction nécessite en entrée le Flow direction et le Stream Segmentation. Elle génère en sortie une grille qui met en évidence les limites des sous-bassins versants pour chaque segment du réseau hydrographique ;
- ⇒ **Vectorisation des sous bassins versants (Catchment Polygon Processing)** : Cette étape permet de convertir le raster précédemment obtenu en un fichier vecteur de type polygone représentant les sous bassins versants ;
- ⇒ **Vectorisation du réseau hydrographique (Drainage line Processing)** : Cette étape permet de transformer le stream segmentation en une représentation vectorielle de type ligne, dont l'ensemble constitue le réseau hydrographique ;
- ⇒ **Regroupement des sous-bassins (Adjoint Catchment Processing)** : Cette fonction génère le regroupement des sous-bassins versants à l'amont à partir de la classe d'entités des sous-bassins.

En choisissant l'exutoire de coordonnées X= 193782.855m et Y= 387161.823m dans le système de projection Mercator Lambert zone II, on obtient la délimitation suivante.

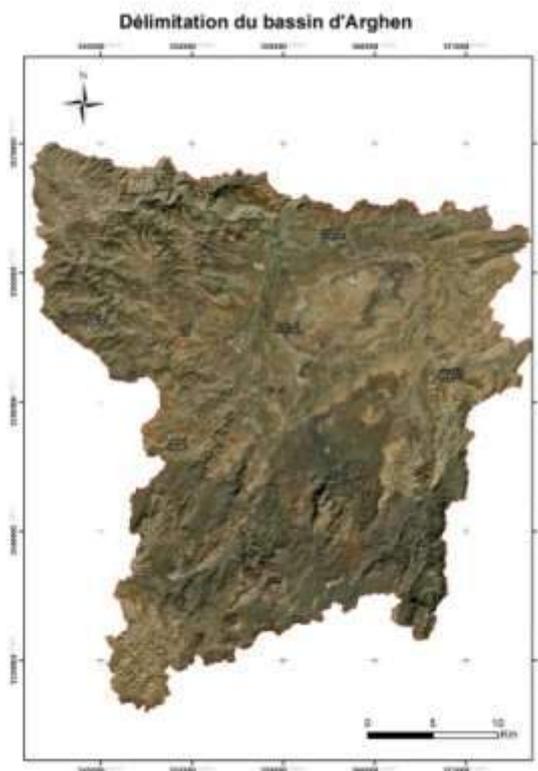


Figure 5 : délimitation du bassin d'Arghen

2.1 Réseau hydrographique :

La figure ci-après représente le réseau hydrographique du sous bassin d'Arghen.

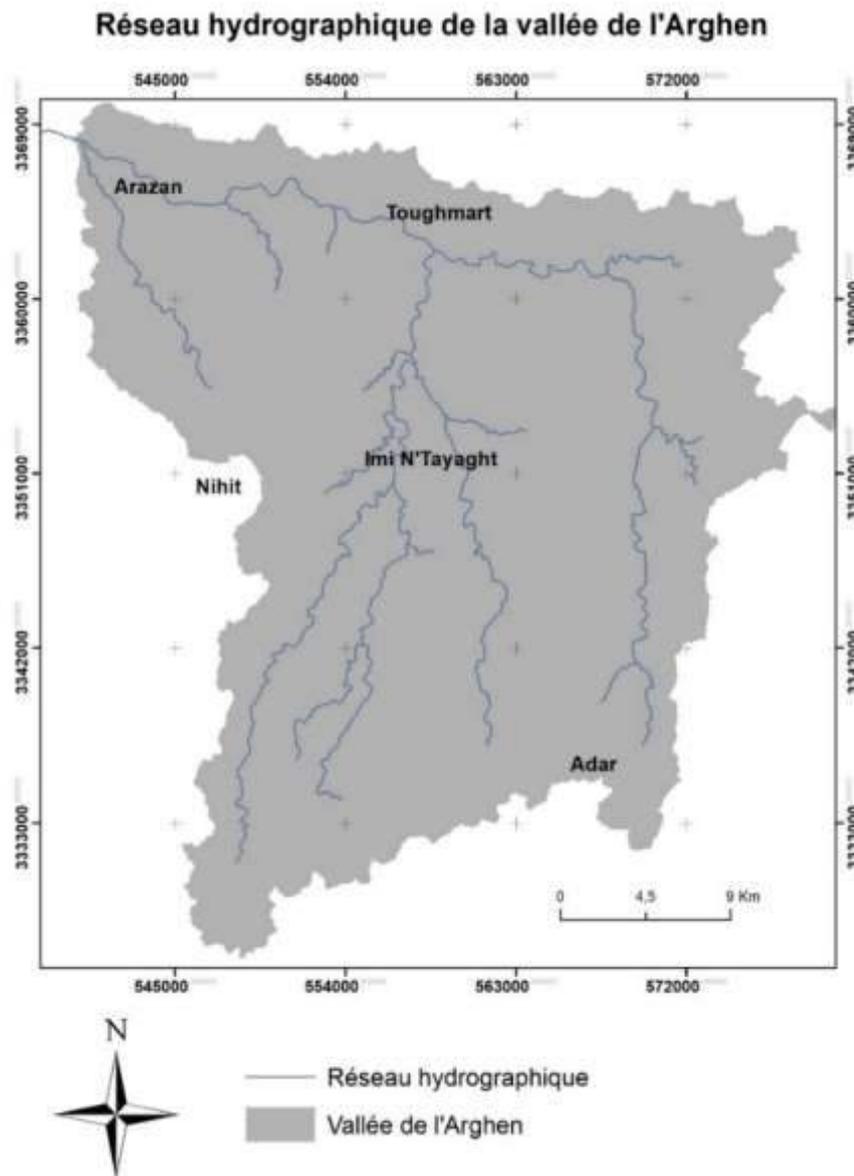


Figure 6 : Réseau hydrographique du sous bassin d'Arghen.

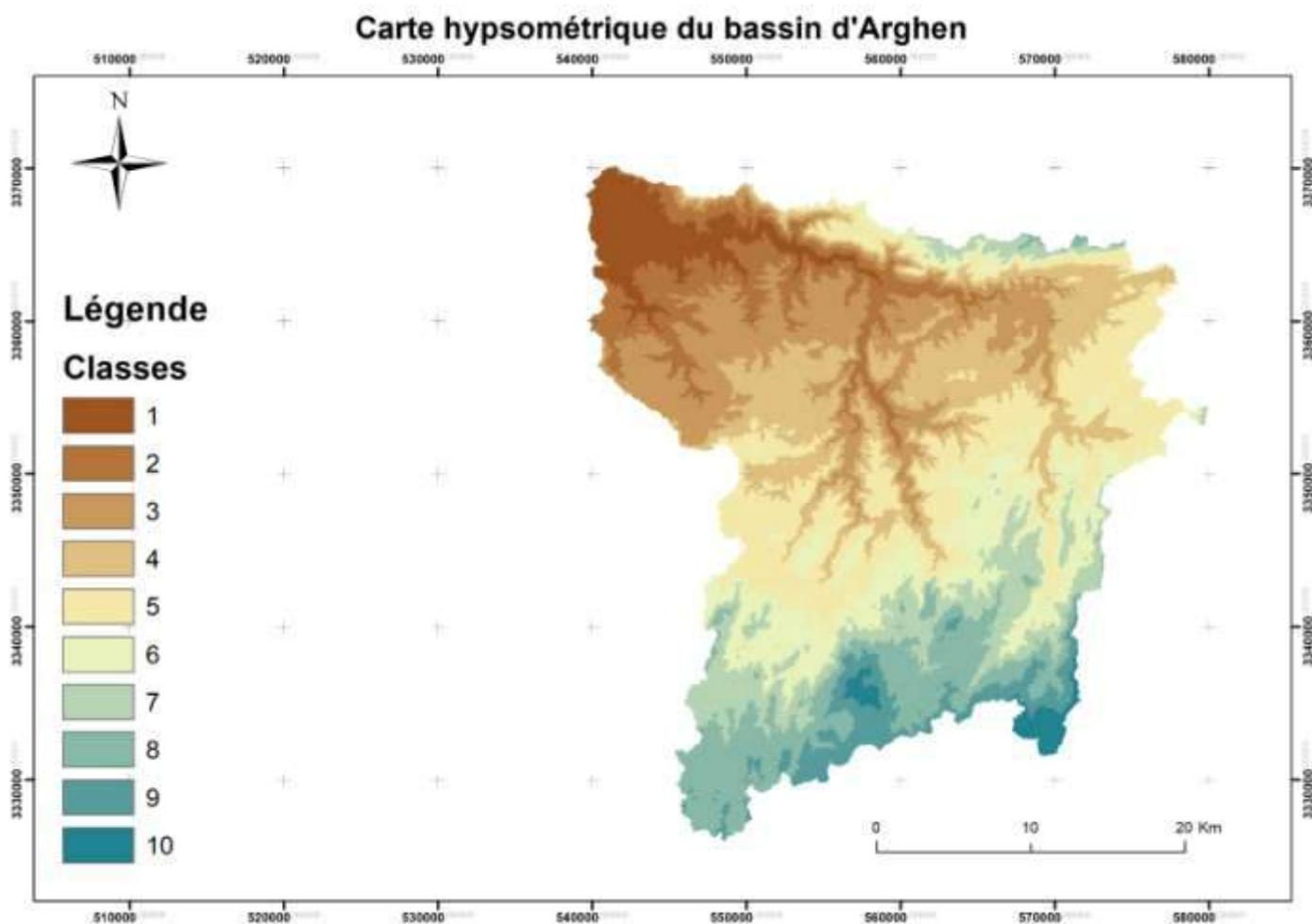
2.2 Détermination des paramètres physiques du BV

Les caractéristiques principales de notre bassin versant, calculé par ArcMap, sont les suivantes.

Surface en Km ² =	1031.21
Périmètre en Km =	278.3
Longueur du Talweg en Km =	80.9

2.2.1 Carte et courbe hypsométrique

La carte hypsométrique donne la répartition des intervalles d'altitudes dans la surface du bassin versant, la figure ci-dessous représente le bassin d'Arghen où évidemment les altitudes diminuent de



l'amont vers l'exutoire.

Figure 7 : Carte hypsométrique du bassin d'Arghen

ArcGIS calcule automatiquement la superficie associée à chaque classe d'altitude, les résultats sont montrés sur le tableau suivant.

Table 3 : Hypsométrie du bassin d'Arghen

Rang	Classe		Surface en Km ²
1	528	807	52.747
2	807	998	84.096
3	998	1143	156.079
4	1143	1275	168.687
5	1275	1401	185.295

6	1401	1534	134.056
7	1534	1680	95.404
8	1680	1837	100.048
9	1837	2094	42.052
10	2094	2555	12.747

La courbe hypsométrique est représentée dans la figure ci-dessous.

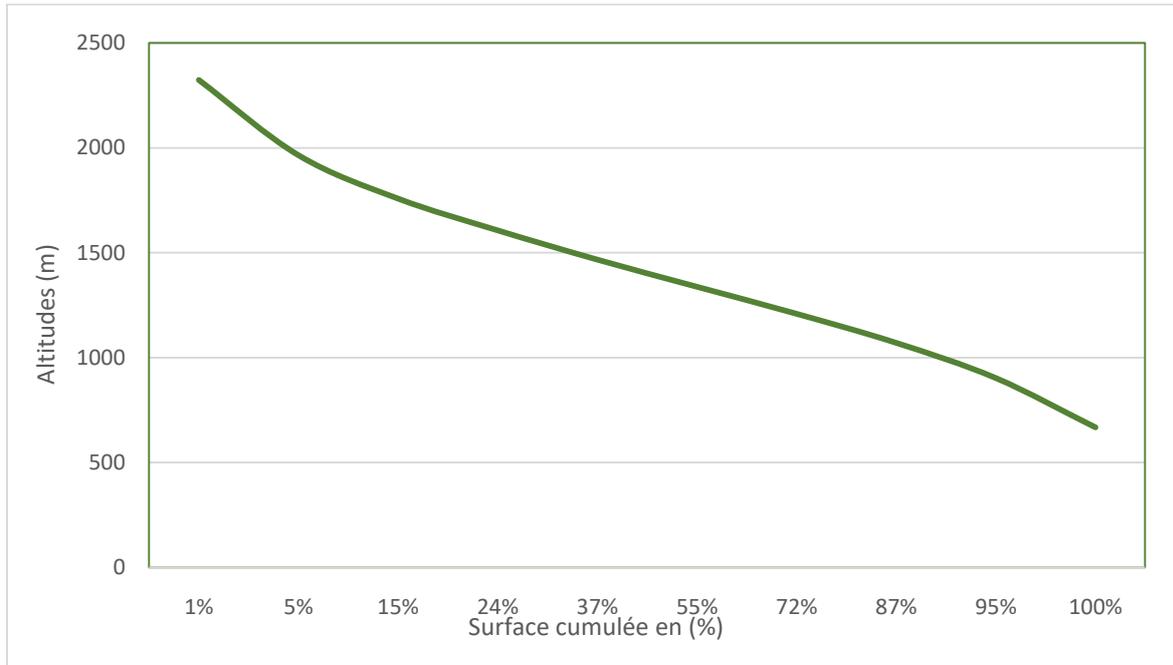


Figure 8: La courbe hypsométrique du bassin d'Arghen

Cette courbe nous permet d'établir l'altitude moyenne dans le BV dont la méthode de calcul est expliquée dans la partie suivante.

2.2.2 Détermination des paramètres géomorphologiques du BV

Les principales caractéristiques géomorphologiques étudiées pour tout bassin versant hydrologique sont détaillées ci-après. Elles constituent des paramètres d'entrée des formules et des modèles de calcul hydrologiques.

a. INDICE DE GRAVELIUS

La forme du bassin versant est approchée par l'indice de compacité de Gravelius (K_c).

$$K_c = 0,28 \frac{P}{\sqrt{S}}$$

Avec : P : périmètre du bassin en Km ;

S : surface en Km² ;

Kc : adimensionnel, plus il est grand, plus le bassin présente une forme allongée.

b. INDICE DE HORTON

Il exprime le rapport de la largeur moyenne du bassin versant à la longueur du cours d'eau principal.

$$K_h = \frac{S}{L_c^2}$$

Avec : S : surface en Km² ;

Lc : Longueur du cours d'eau principal ;

Kh : adimensionnel, inférieur à 1 pour les bassins allongés.

c. RECTANGLE EQUIVALENT

On assimile par convention le bassin versant à un rectangle qui lui est équivalent en superficie. Sa longueur et sa largeur sont définies à partir de son indice de compacité Kc et de sa superficie S, par la relation suivante :

$$L_k = \frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} \times \left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right)$$

$$l_k = \frac{Kc\sqrt{S}}{1.12} \times \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc}\right)^2} \right)$$

d. ALTITUDES CARACTERISTIQUES

L'une des finalités des courbes hypsométriques est le calcul des altitudes caractéristiques suivantes :

- L'altitude maximale Hmax ;
- L'altitude minimale Hmin ;
- L'altitude moyenne du bassin Hmoy ;

Elle est calculée en pondérant la hauteur moyenne d'une tranche d'altitude par la surface partielle de cette tranche selon la formule suivante :

$$H_{moy} = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{H_{i-1} + H_i}{2} \right) \times S_i \right]$$

- L'altitude H_{5%} au-dessus de laquelle est située 5 % de la superficie du bassin ;
- L'altitude H_{95%} au-dessus de laquelle est située 95 % de la superficie du bassin versant.

e. PENTES CARACTERISTIQUES

On distingue pour les pentes celles du bassin versant et celles des oueds.

⇒ Pentes du Bassin Versant

Les principales pentes qu'on calcule pour les bassins versants sont les suivantes :

- Indice de Pente De Roche

L'indice de pente de ROCHE I_p est calculé à partir du rectangle équivalent. C'est un indice adimensionnel qui rend compte de l'influence de la pente du bassin sur son régime hydrologique. Il est défini par :

$$I_p = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \left[H_i \times \sqrt{\left(\frac{H_i - H_{i-1}}{L_i} \right)} \right]$$

Avec : L : Longueur du rectangle équivalent en m ;

$H_i - H_{i-1}$: Dénivelé de la tranche des altitudes H_i à H_{i-1} en m ;

L_i : Longueur sur le rectangle équivalent de la surface partielle correspondante à la tranche d'altitude H_i, H_{i-1} en m.

- Indice de Pente Globale

L'indice de pente globale I_g exprimé en m/m ou en pourcentage, et défini par :

$$I_g = \frac{H_{5\%} - H_{95\%}}{L}$$

Avec : $H_{5\%}$: Altitude au-dessus de laquelle se situe 5 % de la superficie du bassin en m ;

$H_{95\%}$: Altitude au-dessus de laquelle se situe 95 % de la superficie du bassin versant en m ;

L : longueur du rectangle équivalent en m.

Ces indices dénotent d'un relief montagneux.

- Dénivelée Spécifique

La dénivelée spécifique D_s en m, est définie par :

$$D_s = I_g \sqrt{S}$$

Avec : I_g : Indice de pente globale en m/m.

S : superficie du bassin versant en m^2 .

La classification d'ORSTOM (Office Régional Scientifique et Technique d'Outre-Mer : office français), permet de se prononcer sur la nature du relief des bassins versants.

Table 4: Nature du relief selon Ds

Classe	Nature du relief	Valeur de Ds
R1	Relief très faibles	Moins de 10 m
R2	Relief faibles	De 10 à 25 m
R3	Relief assez faible	De 25 à 50 m
R4	Relief modéré	De 50 à 100 m
R5	Relief assez fort	De 100 à 250 m
R6	Relief fort	De 250 à 500 m
R7	Relief très fort	500 m et plus

⇒ Pentes de l'oued

La pente moyenne du cours d'eau I_{moy} en m/m est définie par :

$$I_{moy} = \frac{H_{max} - H_{min}}{L}$$

Avec : H_{max} : Altitude maximale du bassin versant en m.

H_{min} : Altitude minimale du bassin versant en m.

L : Longueur du cours d'eau principal

f. CONCLUSION

Les caractéristiques physiques et géomorphologiques de notre bassin sont résumées dans le tableau ci-dessous.

Table 5 : Caractéristiques physique du bassin d'Arghen

S (Km ²)	1031.21205	Indice de compacité de Kc	2.426595
P (Km)	278.3	Indice de Horton	0.157562
Le (Km)	80.9	Longueur du Rectangle équivalent Lk	131.2959
Hmax (m)	2555	Largeur du Rectangle équivalent lk	7.854107
Hmin (m)	528	Indice de pente De Roche	0.046325
H95% (m)	902.5	Indice de pente Globale	0.01314
H5% (m)	1965.5	Dénivelée Spécifique	421.9478
Hmoy (m)	1326.900645	Pente moyenne De L'oued	0.025056

2.3 Calcul du temps de concentration

Le temps de concentration est un paramètre utilisé en hydrologie pour mesurer la réponse d'un bassin versant à un événement pluvieux (réponse hydrologique). Il est défini comme le temps nécessaire à une goutte d'eau de pluie pour parcourir la distance depuis le point le plus éloigné de l'exutoire d'un bassin jusqu'à celui-ci. Le temps de concentration est fonction de nombreux paramètres tels que la topographie, la géologie, l'utilisation des terres dans le bassin versant etc.

Plusieurs formules permettent de le calculer. Parmi celles-ci les plus utilisées dans le contexte méditerranéen et régional sont résumées au tableau suivant.

Table 6 : Formules de calculs de temps de concentration.

Bransby Williams	$14,557 \cdot L \cdot S^{-0,1} \cdot I^{-0,2}$	Superficie entre 810 – 1500 ha, pente entre 1 et 10 et $C > 0,4$.	
Californienne	$8,712 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0,77}$		
Espagnole	$18 \cdot L^{0,77} \cdot I^{-0,1925}$		
Giandotti	$\frac{4\sqrt{S} + 1,5L}{0,8\sqrt{H_m - H_s}} \cdot 60$	Les grands bassins versants Superficie $> 100 \text{ km}^2$	<ul style="list-style-type: none"> - S = superficie du bassin versant en Km^2. - I = pente moyenne du cours d'eau principal en m/m. - L = longueur du cours d'eau principal en Km. - H_m = hauteur moyenne du bassin versant en m, - H_s = hauteur de l'exutoire du bassin (site étudié) en m.
Kirpich	$3,9814 \cdot L^{0,77} \cdot I^{-0,385}$	Bassins versants urbanisés avec : $0,004 < A < 0,453 \text{ km}^2$ et $0,03 < I < 0,1$	
Turazza-Passini	$6,48 \cdot \frac{\sqrt[3]{L \cdot S}}{\sqrt{I}}$	Superficie supérieure à 40 km^2	
US Corps Of Engineers	$16,682 \cdot (L \cdot I^{-0,25})^{0,77}$		
Ven Te Chow	$7,38 \cdot \left(\frac{L}{\sqrt{I}}\right)^{0,64}$	Domaine de validité pour les bassins versants agricoles de $0,01$ à $18,5 \text{ km}^2$ et la pente moyenne comprise entre $0,0051$ et $0,09$.	
Ventura	$7,632 \cdot S^{0,5} \cdot I^{-0,5}$	Entre 1 et 20 km^2 ou supérieur à 10 km^2 selon les ouvrages.	

En tenant compte du domaine de validité de chaque formule, les formules à utiliser dans notre cas sont : Les formules de Giandotti, Turazza-Passini, et Ventura.

Table 7 : Résultat du calcul du temps de concentration en min et en h.

Tc	Tc en minutes	Tc en heures
Giandotti	662.83	11.04
Turazza-Passini	1788.77	29.81
Ventura	1548.31	25.80
Tc retenu	1668.54	27.81

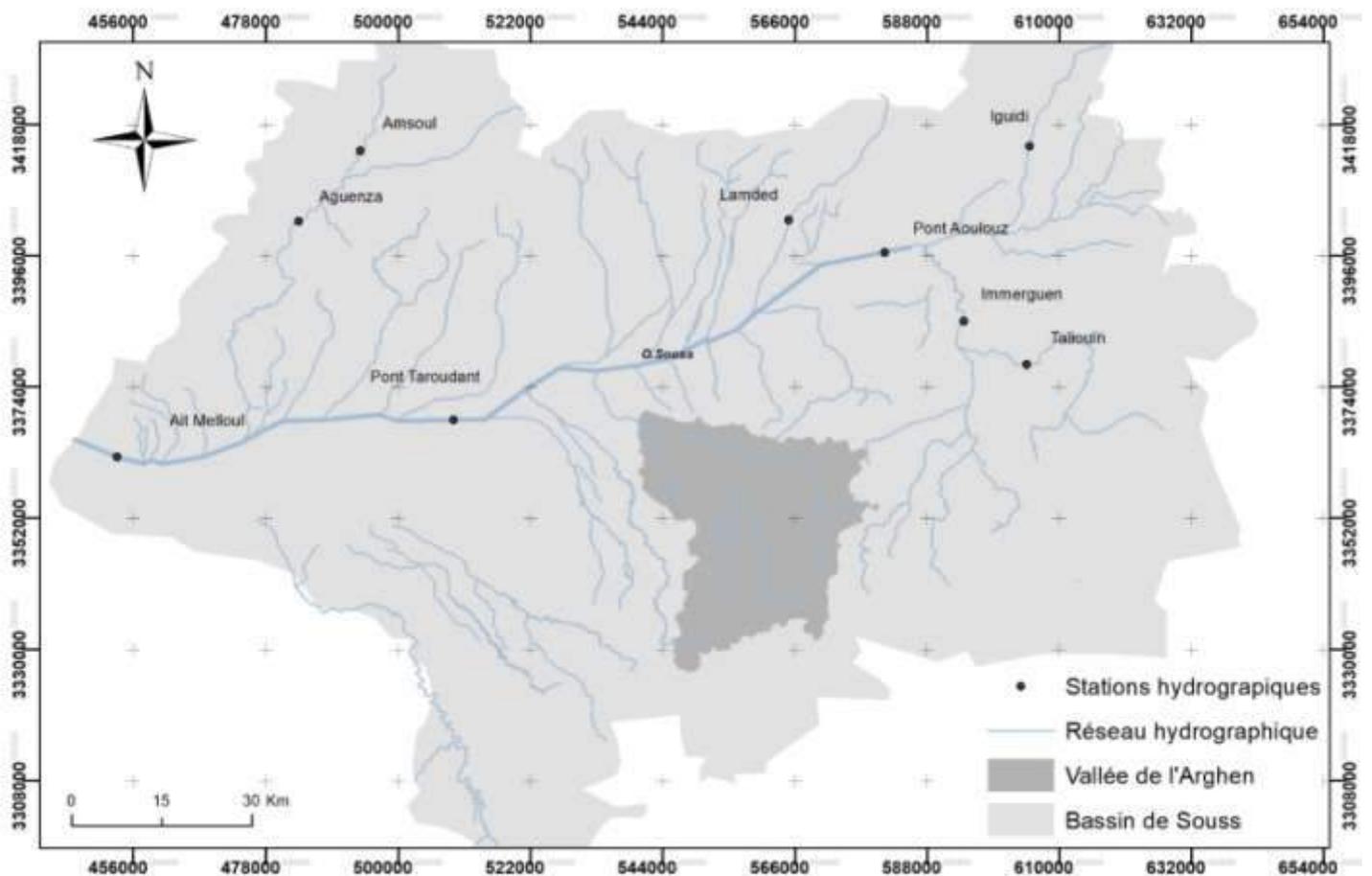
Le Tc retenu est la moyenne de celui donnée par les deux formules : Turazza-Passini et Ventura (deux valeurs les plus proches).

3. Potentiel pluviométrique

3.1 Collecte des données historiques

La collecte des données est faite auprès de l'Agence du Bassin Hydraulique de Souss Massa. Les données reçues sont les précipitations journalières historiques des stations hydrologiques du bassin de Souss, la figure ci-dessous montre la répartition des stations hydrologiques autour du sous bassin d'Arghen.

Figure 9 : Répartition des stations pluviométriques autour du bassin d'Arghen.



3.2 Choix des stations représentatives

Le choix des stations pluviométriques représentatives repose sur 3 critères :

- La proximité de la station avec notre zone d'étude ;
- La longueur de la série des données pluviométriques ;
- Et la qualité des données de la série pluviométrique (Données manquantes).

Les stations qui respectent ces critères sont présentés dans le tableau suivant.

Table 8 : Les stations pluviométriques représentatives du bassin d'Arghen (Source ABHSM)

Poste	Station N°	X	Y	Z	Période d'observation	Pm (mm)
Immerguen	4453	249000	402660	925	1971-2017	264
Taroudant Pont	77984	164150	386400	209	1967-2017	199,4

Avec Pm la moyenne des précipitations annuelles pour la période d'observation commune des deux stations (1971-2017).

3.3 Variabilité climatique temporelle des pluies annuelles

La figure ci-après montre la variation des précipitations annuelles pour les deux stations pluviométriques de 1971 à 2017.

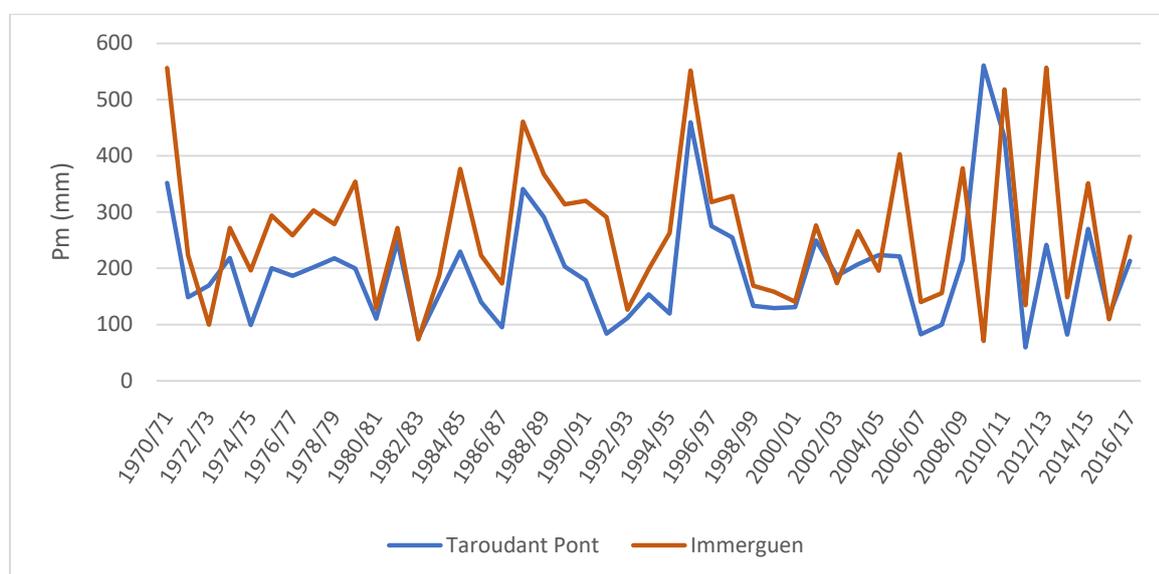


Figure 10 : La variation des précipitations annuelles des stations Taroudant Pont et Immerguen (Source ABHSM).

Pour évaluer la variabilité temporelle des pluies annuelles des stations représentatives, nous avons effectué une étude tendancielle en utilisant la méthode de la régression polynomiale, car les données de la pluie de ces stations fluctuent d'une période à une autre. Donc la courbe de tendance polynomiale de 6ème degré est celle qui représente mieux la tendance des pluies annuelles mesurer dans les stations, et d'ailleurs c'est elle qui a le coefficient de détermination R^2 le plus grand, même s'il reste faible (il ne dépasse pas 0.7). Les résultats sont représentés dans les figures ci-après.

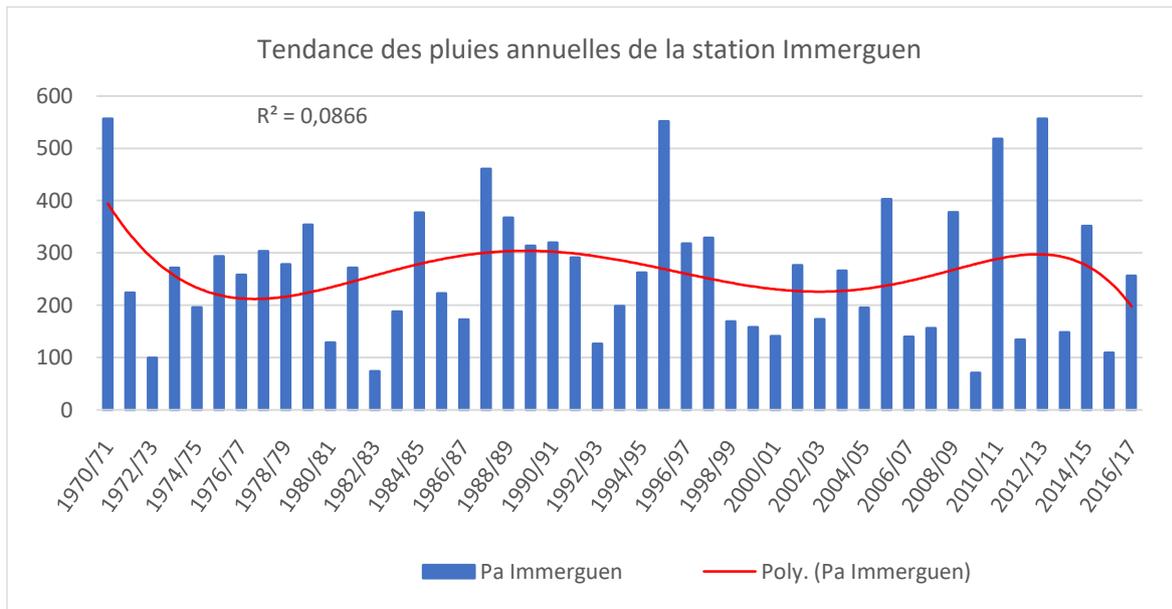


Figure 11 : Tendance des pluies annuelles de la station Immerguez (Source ABHSM)..

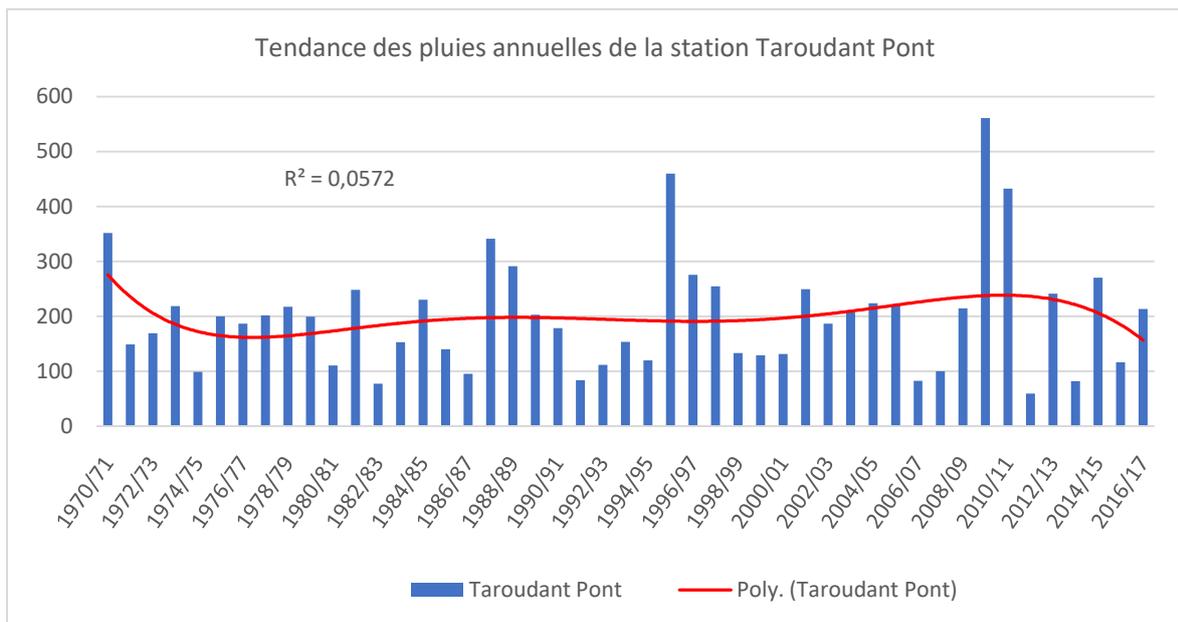


Figure 12: Tendance des pluies annuelles de la station Taroudant Pont (Source ABHSM)..

D'après les graphes, nous constatons une fluctuation de la pluie annuelle des deux stations. Pour la période la plus récente de 10 ans, la pluie a une tendance à la baisse.

3.4 Homogénéité des données pluviométriques

Afin de vérifier l'homogénéité des données des deux stations nous avons utilisé la méthode du double cumul. Les résultats d'analyse de corrélation pour les relevés pluviométriques des stations sont représentés sur la figure suivante.

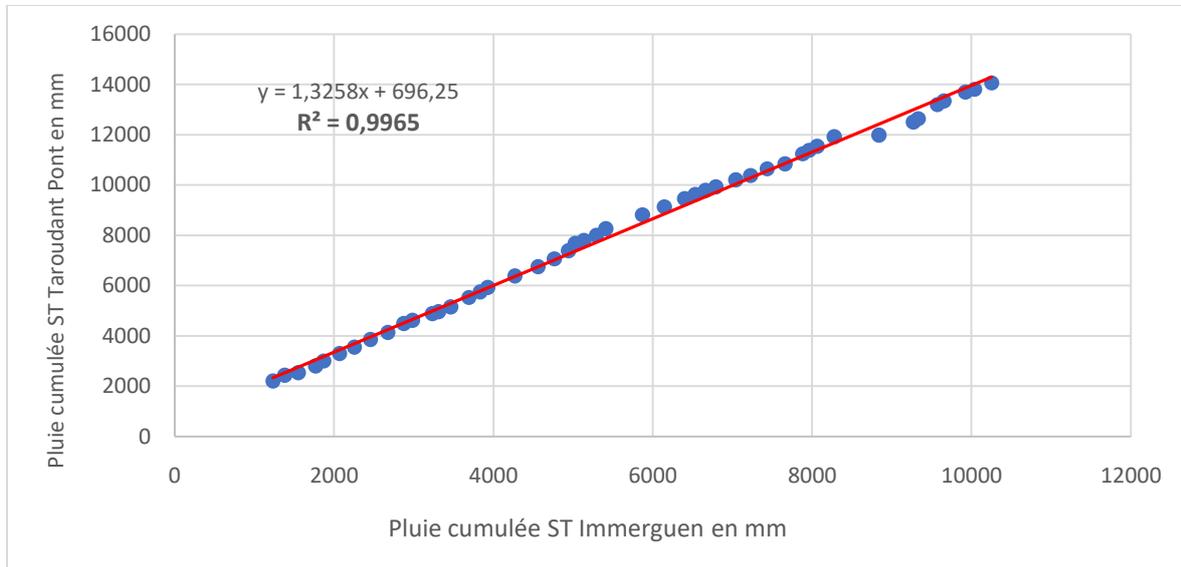


Figure 13 : Régression linéaire entre les pluies annuelles des stations de Immerguen et Taroudant Pont.

D'après le graphe on remarque que l'alignement des points d'observations est acceptable, et la corrélation entre les données de ces stations est satisfaisante, car le coefficient de corrélation est très élevé ($R^2=0.9965$).

3.1 Zonage climatique et calcul de pluie moyenne

Carte des polygones de Thiessen relative au bassin d'Arghen

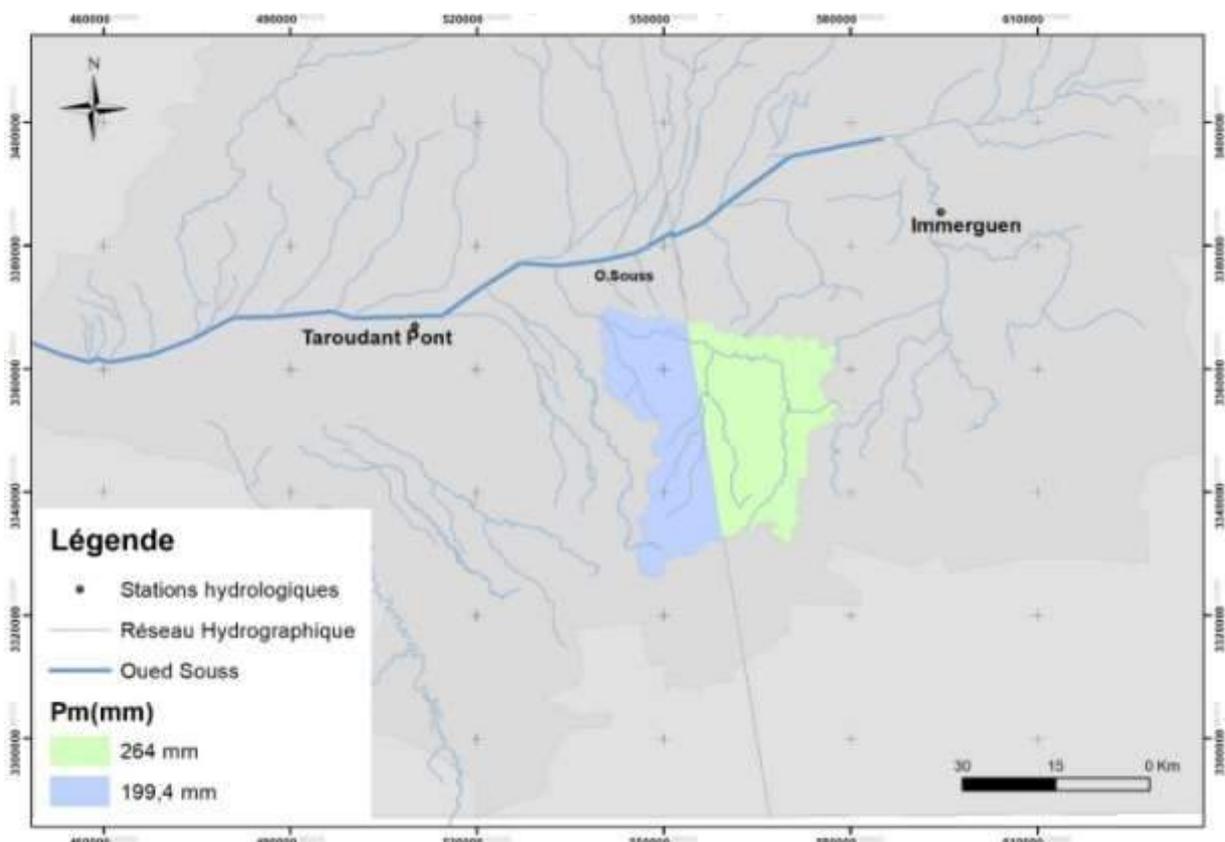


Figure 14 : Carte des polygones de Thiessen relative au bassin d'Arghen.

Pour déterminer les coefficients de pondération utilisé pour le calcul de la moyenne des précipitations annuelles sur le bassin d'Arghen, on a utilisé la méthode des polygones de Thiessen qui permet de délimiter la zone climatique de chaque station.

Les polygones de Thiessen sont créés à l'aide du logiciel ArcGis. Cette méthode ne tient compte que de la distribution spatiale en plan des stations.

Les zones climatiques résultantes sont présentées dans la figure 13.

La superficie de chaque polygone est déterminée par ArcMap. Le calcul des précipitations annuelles moyennes du bassin d'Arghen est montré sur le tableau suivant.

Table 9 : calcul des précipitations annuelles moyennes du bassin d'Arghen.

	Surface (Km)	%	Pm (mm)	P
Zone climatique P.Taroudant	465.56	0.451468	199.41	90.03
Zone climatique Immerguen	565.65	0.548532	264.01	144.82
Bassin d'Arghen	1031.21	1		234.85

Les précipitations annuelles du bassin d'Arghen sont donc d'une moyenne de **235mm**.

4. L'évapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle (ETP) également nommée ETo (évapotranspiration de référence) est une mesure de la capacité de l'atmosphère à éliminer l'eau de la surface d'un sol avec couvert végétal disposant de l'eau en abondance. C'est la quantité maximale d'eau susceptible d'être perdue en phase vapeur, sous un climat donné, par un couvert végétal continu spécifié (gazon) bien alimenté en eau et pour un végétal sain en pleine croissance.

Les valeurs de l'ETP sont montées dans le tableau ci-dessous.

Table 10 : Valeurs moyennes journalières de l'ETP selon les mois (Source ORMVA SM, subdivision Taroudant)

Mois	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Sep	Oct	Nov	Déc
ETP (mm/j)	2.1	3	4	4.5	5	6.2	6.8	6.8	6	5	2.5	2

L'ETP annuelle est donc de **1640 mm** (la somme des évapotranspirations mensuelles)

5. Calcul des débits de pointe

5.1 Méthodes empiriques

Les méthodes de calcul recensées en utilisant différentes formules empiriques tiennent compte de deux facteurs essentiels :

- Le gradient topographique du bassin versant, par le biais de sa pente ou de sa dénivelée.
- La taille du bassin versant, par le biais de sa surface et/ou de sa longueur.

Les formules empiriques ne doivent être utilisées pour la détermination des débits de pointe que lorsque les données hydro-climatologiques sont absentes ou insuffisantes pour accomplir une analyse détaillée et précise.

Les difficultés d'application des relations empiriques ne sont pas tellement causées par l'empirisme des équations, mais plutôt par le manque de connaissance des conditions exactes où on doit les appliquer. Évidemment on peut se fier un peu plus aux équations et aux relations tirées de la région de l'étude.

On donne en ce qui suit les principales formules empiriques utilisées dans les études au Maroc

5.1.1 Mallet-Gautier

La formule de Mallet-Gautier s'exprime comme suit :

$$Q(T) = 2K \text{Log}_{10}(1 + aH) \times \frac{A}{\sqrt{L}} \times \sqrt{(1 + 4\text{Log}_{10}T - \text{Log}_{10}A)}$$

Avec : Q(T) : Débit de pointe en m³/s pour la période de retour ;

L : longueur du plus long talweg (km) ;

A : superficie du bassin versant (Km²) ;

H : Pluie moyenne annuelle en m ;

a: Coefficient variant de 20 à 30 (au Maroc, on prend a = 20) ;

K: Coefficient variant de 0.5 pour les grands bassins versants à faible pente à 6 pour les petits bassin versants à forte pente. Il est fixé à 2 pour le Maroc, par décret du ministre de l'équipement depuis les inondations de 1996

5.1.2 Fuller II

Cette formule est généralement utilisée pour l'estimation des crues originaires des bassins versants de superficies supérieures à 10 km². Elle s'exprime comme suit :

$$Q(T) = (1 + a\text{Log}(T))(A^{0.8} + \frac{8}{3}A^{0.5}) \times \frac{4}{3} \frac{N}{100}$$

Avec : $Q(T)$: Débit de pointe en m^3/s de Période de retour T.

a: Coefficient variant entre 0.7 et 3.5 au Maroc.

- $0.7 < a < 0.8$: Pour les grands bassins versants et pour les régions bien arrosées
- $0.8 < a < 2$: Pour les régions arides
- $3 < a < 3.5$: Pour les oueds sahariens

On prend $a=0.8$

A: Superficie du bassin versant en Km^2 .

N: Coefficient régional pris égal à 80 en plaine, 85 en région accidentée et 100 en montagne.

On prend $N = 85$.

5.1.3 Hazan Lazareviç

La formule d'Hazan Lazareviç a été développée au Maroc. Elle donne le débit millénial en fonction de la superficie du bassin versant. Sa formule est comme suit :

$$Q(1000) = a \times S^b$$

Avec : a et b : Paramètres régionaux de Hazan Lazareviç, dépendent de la situation géographique de la zone et de sa pluviométrie moyenne annuelle, on prend les coefficients relatifs au Haut Atlas Saharien pour une pluviométrie entre 200 et 400mm, $a=9.38$ et $b=0.742$

Les débits de récurrences autres que millénial, sont calculés à partir de celui-ci par la suivante :

$$Q(T) = Q_{1000} \times \frac{(1 + 0.8 \text{Log}T)}{(1 + 0.8 \text{Log}1000)}$$

5.1.4 Conclusion

Les calculs effectués par les différentes formules empiriques sont consignés dans le tableau suivant :

Table 11 : Débit de pointe calculé par les méthodes empirique pour les différentes périodes de retour.

Débit en m^3/s	Q(10)	Q(20)	Q(50)	Q(100)	Q(500)
Mallet-Gautier	488.59	619.20	758.08	848.16	1027.29
Fuller II	699.87	793.51	917.29	1010.93	1228.34
Hazan Lazareviç	854.87	969.25	1120.44	1234.81	1500.38

Les débits calculés par la méthode de FullerII, Mallet-Gautier et Hazan Lazarevick donnent des résultats non similaires

5.2 Méthode d'ajustement et transposition

Cette méthode est basée sur des données de débits instantanés maximaux annuels. Dans le cas de notre zone d'étude, on va ajuster par les débits de la station hydrologique d'Immerguez sise dans le même contexte hydrologique. La période de mesures disponible est du 01 Septembre 1970 et 30 septembre 2014.

5.2.1 Analyse fréquentielle

a. Ajustement des P_{jmax} à la loi de Gumbel

La représentation graphique des mesures de pluies pendant cette période est la suivante.

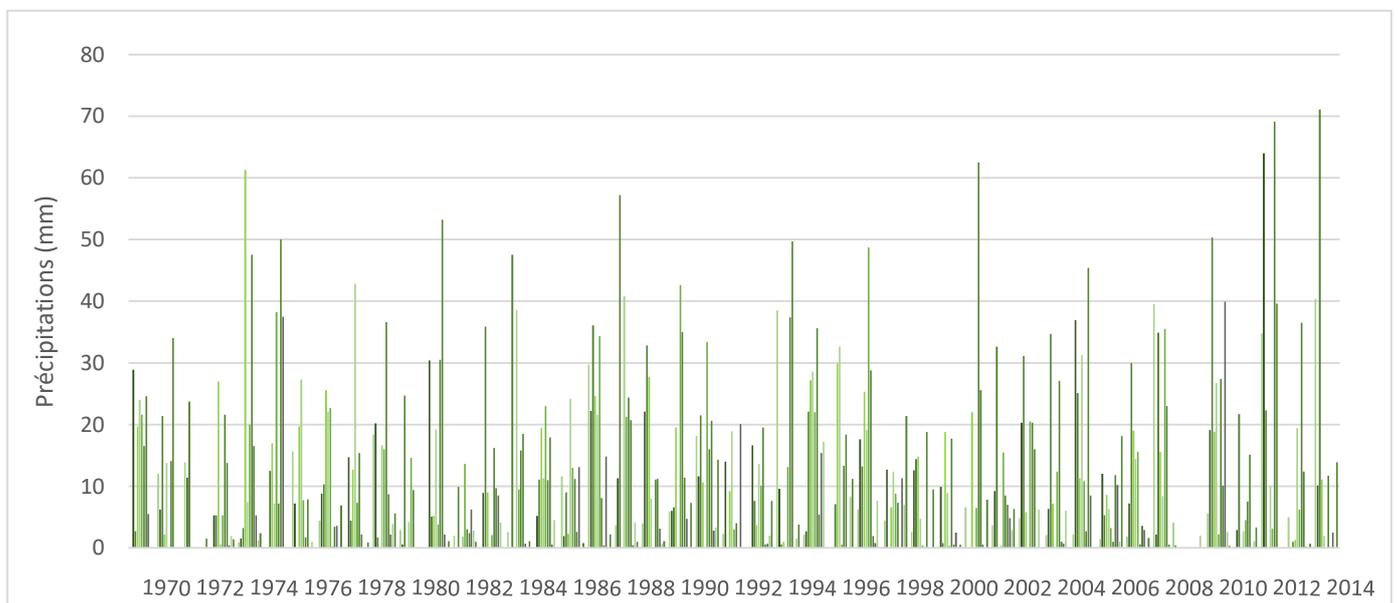


Figure 15: représentation de P_{jmax} de la station d'Immerguez pour la période 1970/2014 (Source ABHSM)..

Les précipitations journalières maximales pour différentes périodes de retours sont déterminées selon l'équation de la droite d'ajustement des pluies $y = 11,152x + 29,832$, avec un coefficient de corrélation élevé $R^2=0,9818$.

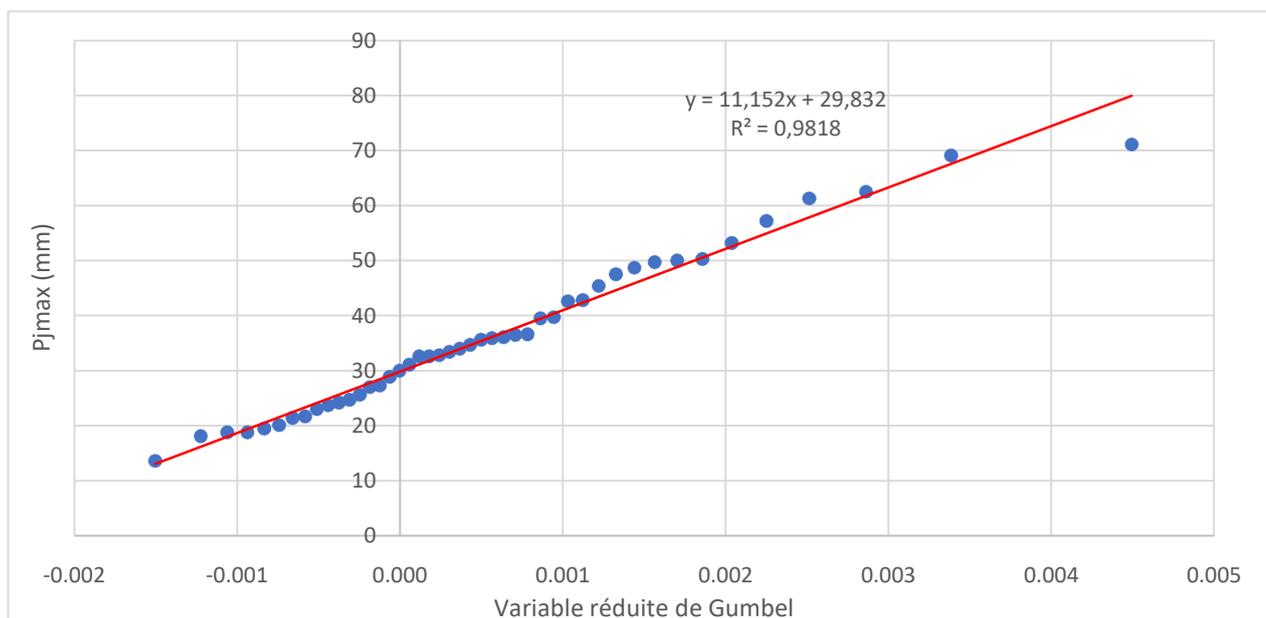


Figure 16 : Ajustement des Pjmax à la loi de Gumbel.

b. Ajustement des Qjmax à la loi de Gumbel

Les débits journaliers maximums pour différentes périodes de retours sont déterminés selon l'équation de la droite d'ajustement des débits $y = 9.7467x + 3.8249$, avec un coefficient de corrélation satisfaisant $R^2=0.8048$.

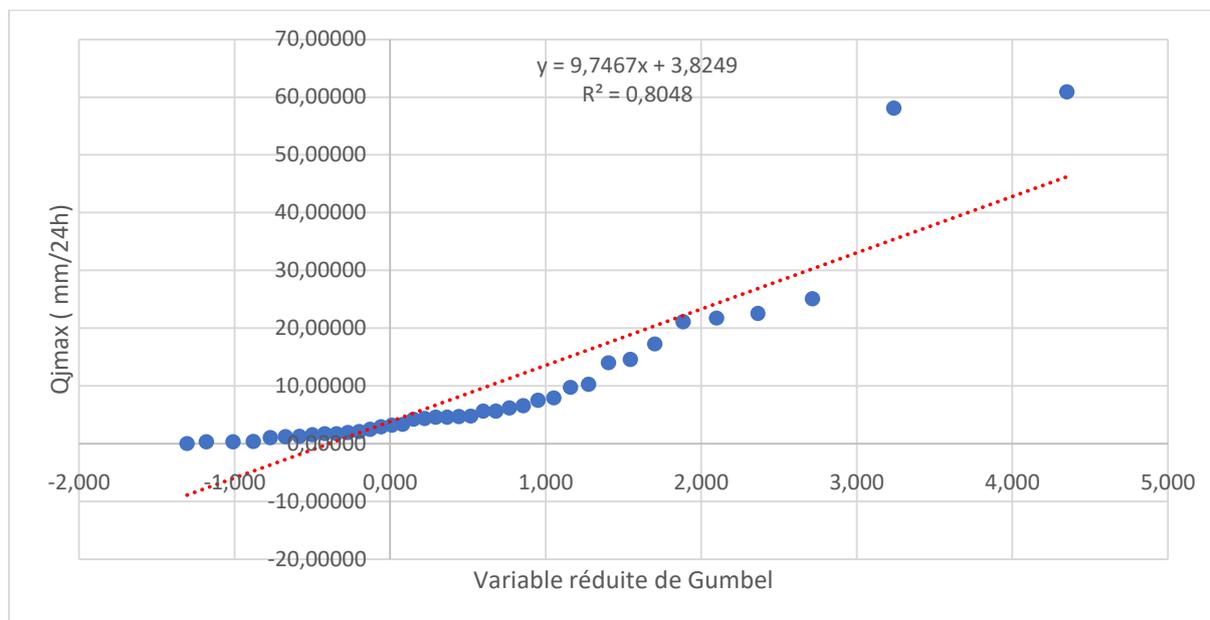


Figure 17: Ajustement de Qjmax à la loi de Gumbel.

c. Conclusion

Les résultats de l'ajustement des pluies et des débits (de la station d'Immerguen) à la loi de Gumbel sont résumés dans le tableau suivant.

Table 12 : Résultats d'ajustement de Pjmax et Qjmax à la loi de Gumbel.

Période de retour T=	100	50	20	10	5
Probabilité de non dépassement=	0.99	0.98	0.95	0.9	0.8
Variable réduite de Gumbel=	4.600149	3.901939	2.970195	2.250367	1.49994
Pjmax(mm) pour période de retour T =	81.13113	73.34502	62.95466	54.92748	46.55907
Qjmax(mm) pour période de retour T =	48.66142	41.85613	32.77467	25.75869	18.44446

5.2.2 Gradex des débits

Le calcul des Qjmax par la méthode de Gradex est montré dans le tableau ci-dessous.

Table 13: Calcul des débits par la méthode de Gradex pour différentes périodes de retours

Période de retour T=	500	100	50	20	10
Probabilité de non dépassement =	0.998	0.99	0.98	0.95	0.9
Variable réduite de Gumbel =	6.214	4.600149	3.901939	2.970195	2.250367
Ruissellement (mm) =	69.959	51.962	44.176	33.785	25.758
Qp(m3/s)=	2028.747	1706.547	1044.768	920.7549	824.9474

5.2.3 Transposition des débits

Les débits de pointes calculés pour le bassin d'Immerguen sont transposés à notre bassin d'étude par deux méthodes :

a. La méthode des débits spécifiques

Cette méthode s'appuie sur une simple pondération par les surfaces, la formule est la suivante :

$$\frac{Q_A}{S_A} = \frac{Q_B}{S_B}$$

- Avec :
- S_A : La surface du bassin d'Immerguen ;
 - S_B : La surface du bassin d'Arghen ;
 - Q_A : Le débit calculé pour la station d'immerguen ;
 - Q_B : Le débit à calculer.

b. La méthode de Francou Rodier

Pour cette deuxième méthode on utilise la formule suivante :

$$Q(T) = 10^6 \times \left(\frac{S}{10^8}\right)^{\left(1 - \frac{K(T)}{10}\right)}$$

- Avec :
- Q(T) = débit de pointe de période de retour T en m3/s.
 - S = superficie du bassin versant en km².
 - K(T) = coefficient régional fonction du climat (adimensionnel).

Le coefficient KT est déduit par raisonnement inverse des valeurs des débits de pointes des crues pour d'une ou de plusieurs stations hydrologiques voisines (dans notre cas la station d'Immerguen).

$$K = 10 \times \left(1 - \left(\frac{\frac{Ln\left(\frac{Q}{10^6}\right)}{Ln\left(\frac{S}{10^8}\right)}}{10}\right)\right)$$

	Q(10)	Q(20)	Q(50)	Q(100)	Q(500)
Mallet-Gautier	488.59	619.20	758.08	848.16	1027.29
Fuller II	699.87	793.51	917.29	1010.93	1228.34
Hazan Lazareviç	854.87	969.25	1120.44	1234.81	1500.38

c. Conclusion

Les résultats de calcul sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Table 14 : Débits de pointes du bassin d'Arghen pour différentes périodes de retours

Débits de pointes du bassin d'Immerguen pour différentes périodes de retours					
Période de retour T	500	100	50	20	10
Qp(m3/s)	2028.747	1706.547	1044.768	920.7549	824.9474
Transposition des débits par la méthode des débits spécifiques					
Qs (m3/s/Km ²)	0.733194	0.61675	0.377581	0.332763	0.298138
Qp transposé (m3/s)	756.0817	636.003	389.3684	343.1507	307.4448
Transposition des débits par la méthode de Francou Rodier					
Kt	4.092195	3.927408	3.459881	3.339486	3.234796
Qp(m3/s)	1132.36	937.1542	547.8625	477.1282	423.087

5.3 Conclusion

Les méthodes empiriques de FULLER et HAZAN LAZAREVICK, donnent des débits surestimés, or la méthode de Mallet Gautier, présente des débits proches de ceux obtenus par la méthode de transposition de Francou Rodier, enfin la méthode des débits spécifiques donne des débits sousestimés.

Finalement les débits de pointes de fréquences rares retenus sont ceux issues de la moyenne des deux méthodes Mallet Gautier et Francou Rodier.

Les résultats du calcul des débits de pointe sont résumés dans le tableau suivant.

Table 15 : Récapitulatif des débits de pointe calculés par les différentes méthodes

Débit Spécifique	307.44	343.15	389.37	636.00	756.08
Franco Rodier	423.09	477.13	547.86	937.15	1132.36
Débit retenu	455.84	548.16	652.97	892.66	1079.83

CHAPITRE 3

ETABLISSEMENT DE LA SITUATION CLIMATIQUE DE REFERENCE, PROJECTIONS ET SCENARIOS CLIMATIQUES A L'HORIZON 2100

1. Situation climatique de référence

1.1 Situation climatique mondiale

1.1.1 5ème rapport du GIEC (2014)

Le GIEC, Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, produit des rapports synthétisant les travaux de milliers de chercheurs qui travaillent à analyser les tendances et prévoir les évolutions mondiales en matière de changement climatique.

Le 5ème rapport du GIEC est le plus complet car il s'appuie sur des données disponibles en plus grande quantité et en meilleure qualité, notamment grâce aux améliorations technologiques. Publié en trois volumes en 2013 et 2014, il apporte des conclusions sur les causes et les effets des changements climatiques mais aussi des recommandations aux décideurs en ce qui concerne les mesures d'atténuation et d'adaptation à mettre en œuvre.

1.1.2 Les constats du 5ème rapport sur l'évolution du climat

Le dernier bilan scientifique, élaboré à partir de modèles de plus en plus performants et basé sur de nouveaux scénarios, souligne que des phénomènes naturels pourraient expliquer les changements climatiques observés durant la période allant du XVème au milieu du XXème siècle. En revanche, depuis 1950, la hausse des températures est telle que seule une combinaison des facteurs naturels et anthropogéniques est à même d'expliquer la rapidité et l'ampleur du phénomène.

Pour maintenir la hausse de la température moyenne du globe sous les 2°C, de nombreuses possibilités existent. Limiter le changement climatique impose une réduction importante et soutenue des émissions de gaz à effet de serre. Les plus gros émetteurs, que sont les Etats-Unis, l'Union européenne et la Chine devront fournir un effort tout particulier.

Réduire les émissions passe par plusieurs étapes : il sera tout d'abord nécessaire d'engager une transition de nos modèles énergétiques en abandonnant les énergies carbonées au profit des énergies renouvelables. Le GIEC estime nécessaire d'atteindre des niveaux d'émission proches de zéro en 2100. Cela nécessitera de supprimer les subventions aux énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz) qui reçoivent, encore aujourd'hui, 6 fois plus de subventions que les énergies renouvelables.

1.1.3 Les projections climatiques du 5ème rapport du GIEC.

Pour réaliser des projections climatiques de long terme, le GIEC propose quatre trajectoires dites RCP, qui indiquent quatre directions très différentes. Ces quatre trajectoires correspondent chacune à une concentration atmosphérique en CO2, qui aura un impact sur l'effet de serre, et donc sur le climat. Les scénarios RCP sont détaillés dans le paragraphe suivant.



Trois des quatre trajectoires analysées par le GIEC conduisent en 2100 à une hausse des températures de plus de 2 degrés par rapport à l'ère préindustrielle (1850).

Selon la trajectoire la plus optimiste (RCP 2.6) proposée par le GIEC, il nous reste une chance de maintenir la hausse des températures sous le seuil de 2°C en 2100, par rapport au niveau de 1850.

Trajectoire optimiste : entre +1°C et +2,4°C à la fin du 21ème siècle par rapport à 1850.

Dans la trajectoire la plus pessimiste (celle qui se produira si on n'agit pas en faveur du climat en limitant nos émissions de gaz à effet de serre), les températures pourraient augmenter jusqu'à 5,5°C. Dans ce scénario du pire, les vagues de chaleur qui arrivent aujourd'hui une fois tous les 20 ans vont doubler ou tripler de fréquence.

Il y aura ainsi plus de vagues de températures extrêmes (chaudes et froides) au fur et à mesure de la hausse des températures.

Trajectoire si on n'agit pas : entre +3,3°C et +5,5°C à la fin du 21ème siècle par rapport à 1850.

Les événements extrêmes comme les fortes pluies dans les hautes latitudes ou dans les régions tropicales deviendront plus intenses, et se produiront plus fréquemment d'ici la fin du siècle, au fur et à mesure que les températures augmenteront. A l'inverse, les zones sèches verront une baisse des précipitations au fur et à mesure que les températures augmenteront.

Les figures ci-après représentent l'évolution de la température et des précipitations à l'horizon 2100 donnée par le 5ème rapport du GIEC.

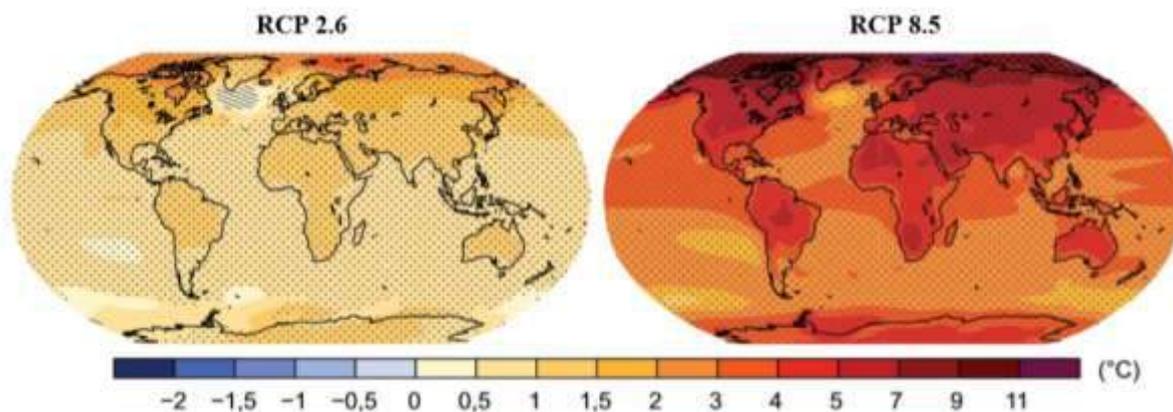


Figure 18 : Evolution de la température moyenne en surface (entre la période 1986-2005 et 2081-2100) (Source 5^{ème} Com Nat CCNUCC)

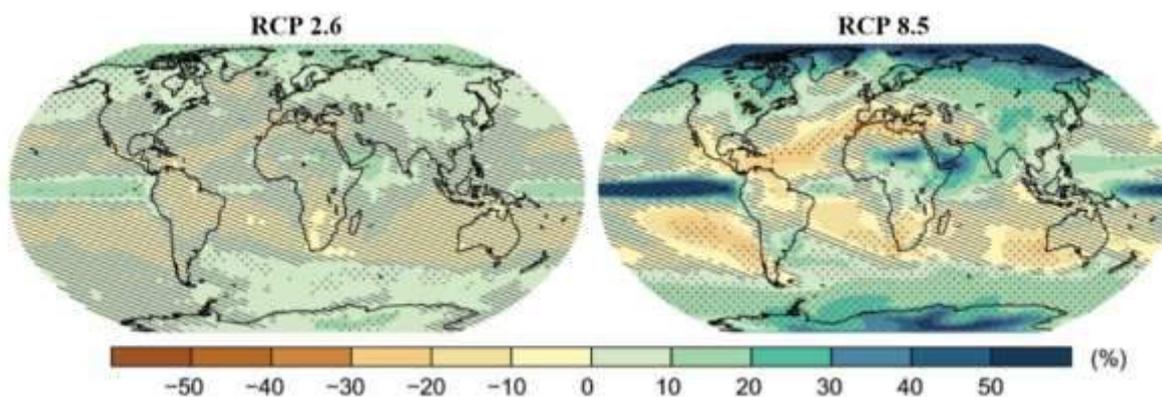


Figure 19 : Evolution des précipitations moyennes (entre 1986-2005 et 2081-2100) (Source 5^{ème} Com Nat CCNUCC)

1.2 Situation climatique nationale

1.2.1 Engagement du Maroc au régime international sur le changement climatique

Le Maroc a souscrit à l'action internationale d'adaptation et d'atténuation des effets des changements climatiques depuis 1992, en tant que signataire de la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques (CCNUCC) et a pris dans ce cadre des engagements forts et ambitieux. A cet effet, le Maroc a déployé plusieurs efforts pour se conformer aux engagements de la CCNUCC en mettant en place le cadre institutionnel nécessaire à l'élaboration d'une politique nationale d'adaptation et d'atténuation des effets de changement climatique. En outre, l'arsenal juridique a été renforcé par l'adoption de la loi cadre n°99.12 portant la Charte Nationale de l'Environnement et du Développement Durable qui fixe parmi ses principaux objectifs la lutte contre les changements climatiques et la promulgation de la loi n°13.09 relatives à la libéralisation de la production d'énergie d'origine renouvelable et de la loi 47.09 relative à la réglementation de l'efficacité énergétique dans tous les secteurs économiques.

Notre pays a également entrepris des politiques ciblées pour la gestion des ressources naturelles critiques, la politique de construction des barrages, la stratégie nationale de l'eau, le Plan Maroc vert, la stratégie énergétique nationale basée sur le mix énergétique, des programmes nationaux de lutte contre les catastrophes naturelles et la désertification et de mise à niveau environnementale par des programmes de gestion des déchets, d'assainissement liquide et d'épuration des eaux usées, etc.

Le Maroc est aussi un pays africain en voie de développement et par conséquent a besoin de beaucoup d'investissement pour faire face aux effets des dérèglements climatiques. Une partie de ces investissements est déjà prise en charge par le Maroc à travers ses différentes politiques sectorielles, mais le reste doit être financé par l'aide internationale à travers les différents mécanismes de la finance climat. Dans ce sens, le Maroc a inscrit sa politique climat dans un cadre régional et notamment africain et considère que la réflexion sur le traitement de la question du dérèglement climatique devrait être globale mais que l'action devrait être locale. L'action doit également être équilibrée entre l'adaptation et l'atténuation et assurer les principes de développement durable, de responsabilité commune qui permet une différenciation claire entre les engagements d'atténuation des pays développés et les actions volontaires des pays en développement qui devront être appuyées en termes de financement, de renforcement des capacités et de transfert de technologies.

- Il y a lieu également de rappeler qu'au niveau international le Maroc a démontré sa prise en compte de la problématique des effets des changements climatiques notamment à travers :
- La publication de trois Communications Nationales.
- Le Plan national de lutte contre le réchauffement climatique (PNRC) qui rassemble les mesures d'atténuation et d'adaptation.
- La politique de changement climatique du Maroc (PCCM) composée d'axes transverses et déclinée au niveau sectoriel
- L'organisation de la conférence des parties en deux éditions (COP 7 et COP22) au Maroc

On note à cet effet, que le dernier classement de 2019 du «Climat Change Performance Index », qui évalue les efforts fournis par les pays, en matière de lutte contre le réchauffement climatique, a placé le Maroc au 5ème rang mondial après la Suède (les 3 premiers rang restant vides).

1.2.2 La 3^{ème} communication nationale du Maroc à la CCNUCC 2016

1.2.2.1 Projections climatiques au Maroc

Les projections climatiques au Maroc, établies dans le cadre de la 3^{ème} communication nationale du Maroc à la convention cadre des nations unies sur les changements climatiques, porteront notamment sur les précipitations annuelles et les températures moyennes annuelles pour deux scénarios du GIEC, RCP 2.6 et RCP 8.5 et pour les échéances fixées par le GIEC dans son 5^{ème} rapport.

- [Scénario RCP 2.6](#)

Table 16 : Projections climatiques selon le scénario RCP 2.6 (Scénario optimiste) _Source (3^{ème} communication nationale du Maroc à la CCNUCC)

Période	Région du Maroc	Tendances des variations des cumuls annuels des précipitations	Région du Maroc	Tendances des variations des températures moyennes annuelles
2016-2035	Ensemble du pays Excepté la moitié sud des régions sahariennes et oasis du sud	-10% à -20% 0% à +10%	Ensemble du pays Excepté Quart sud ouest (région Figuig, Quarzazate et Tata).	+0.5°C à +1.0°C +1.0°C à +1.5°C
2046-2065	Nord de la chaîne de l'Atlas	-10% à -20%	Ensemble du pays Excepté Littoral des provinces sahariennes	+1.0°C à +1.5°C +0.5°C à +1.0°C
2081-2100	Nord de la chaîne du Haut et l'Anti-Atlas Régions sahariennes	-10% à -20% -20% à -30%	Ensemble du pays	+1.0°C à +1.5°C

Pour tous les horizons temporels, on observe une tendance à la baisse des cumuls annuels des précipitations qui varie entre 10 et 20 % pour atteindre 30% sur les provinces sahariennes à l'horizon 2100.

La figure ci-après représente la variation des précipitations moyennes annuelles au Maroc, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 selon le scénario RCP 2.6.

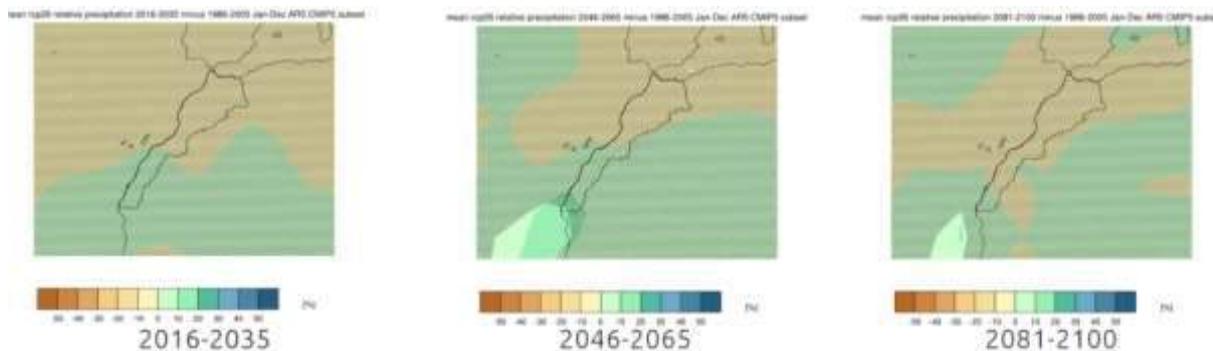


Figure 20 : Variation des précipitations moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario RCP 2.6) _Source (3^{ème} communication nationale du Maroc à la CCNUCC)

Pour les températures moyennes annuelles, une tendance à la hausse de 0,5 à 1°C est projetée à l'horizon 2020 et de 1 à 1,5 °C aux horizons 2050 et 2080, sur l'ensemble du pays.

La figure ci-après représente la variation des températures moyennes annuelles au Maroc, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 selon le scénario RCP 2.6

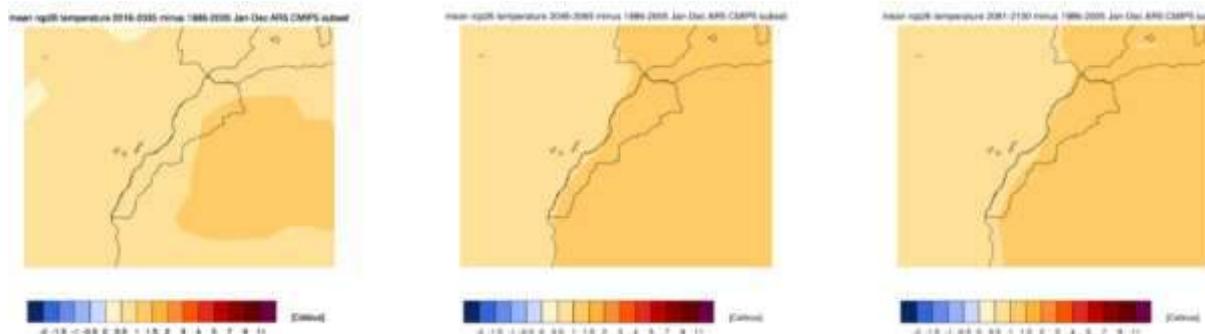


Figure 21 : Variation des températures moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario RCP 2.6) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC)

- **Scénario RCP 8.5**

Table 17 : Projections climatiques selon le scénario RCP 8.5 (Scénario pessimiste) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC)

Période	Région du Maroc	Tendances des variations des cumuls annuels des précipitations	Région du Maroc	Tendances des variations des températures moyennes annuelles
2016-2035	Ensemble du pays Excepté l'extrême sud des régions sahariennes	0 % à -10% 0% à +10%	Ensemble du pays Excepté Quart sud ouest (région Figuig, Ouarzazate et Tata)	+0.5°C à +1.0°C 1.0°C à +1.5°C
2046-2065	Nord de la chaîne de l'Atlas régions Nord des provinces sahariennes les régions du Sud	-10% à -20% 0% à -10% 0% à +10%	Ensemble du pays Excepté Littoral des provinces sahariennes	+1.5°C à +2.0°C +1.0°C à +1.5°C
2081-2100	Ouest des chaînes de l'Atlas et du Rif Est de la chaîne de l'Atlas et les régions méditerranéennes	-40% 20 à 30%	Régions du Sud-Est de l'Atlas Régions méditerranéennes, atlantiques et centre du pays Régions des provinces sahariennes	5 à 7°C 4 à 5°C 3 à 4°C

Les projections prévoient une tendance à la baisse de 0 à 20% des cumuls annuels des précipitations pour les périodes 2016-2035 sur l'ensemble du pays, à l'exception des régions sahariennes (0% à +10%). Pour la période 2046-2065 on retrouve les mêmes résultats avec une distribution spatiale différente. Enfin la période 2081-2100 se distingue par un record de baisse prévu de 40% à l'Ouest des chaînes de l'Atlas et du Rif (Plaines du Saiss, du Loukkos, du Ghrab et de la Chaouia).

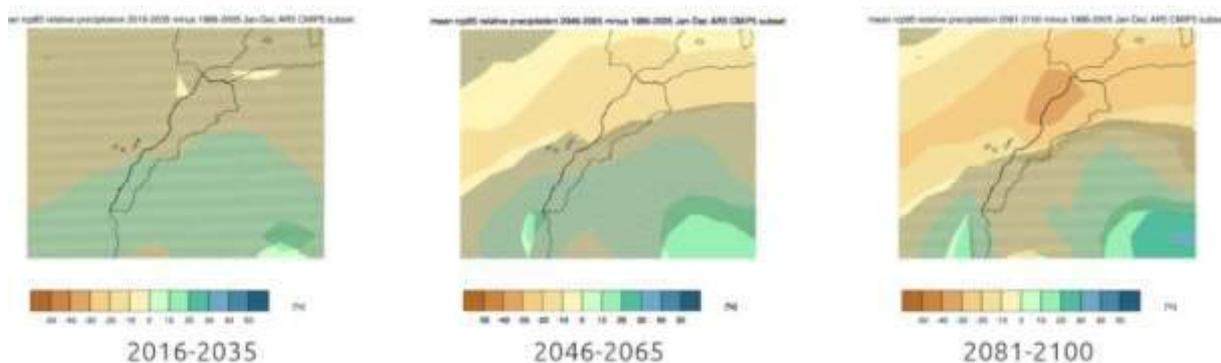


Figure 22 : Variation des précipitations moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario RCP 8.5) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC)

Quant aux températures moyennes annuelles, on assisterait à une tendance générale à leur hausse sur l'ensemble du pays, à l'horizon 2100. Cette hausse oscillerait : - Entre 5 et 7°C dans les régions du Sud-est de la chaîne de l'Atlas, - Entre 4 et 5°C dans les régions méditerranéennes, les régions Atlantiques ainsi que le centre du pays, - Entre 3 et 4°C dans les provinces sahariennes

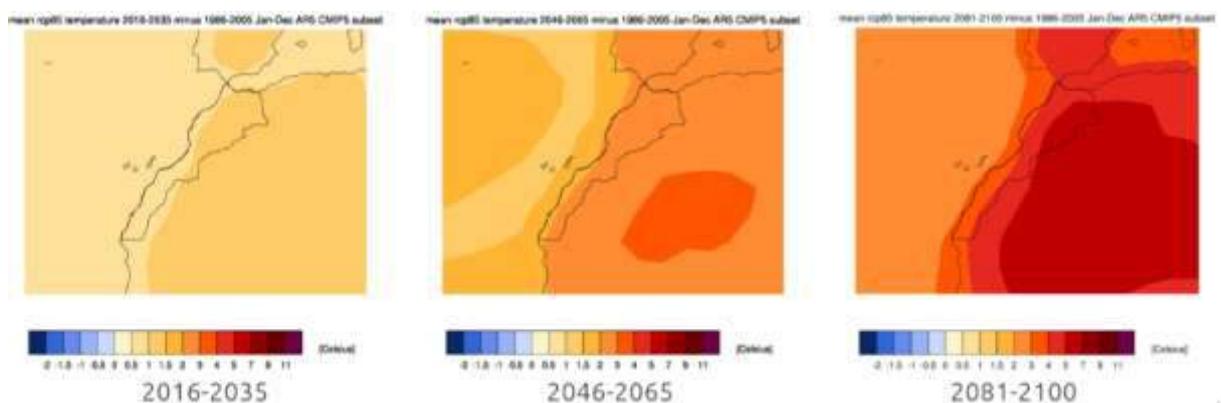


Figure 23 : Variation des températures moyennes annuelles, des périodes 2016-2035, 2046-2065 et 2081-2100, par rapport à la période 1986-2005 (Scénario RCP 8.5) _Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC)

D'autre part, comme les simulations climatiques pour les différents horizons temporels sont faites par rapport à la période 1986-2005, il ne faut pas perdre de vue qu'il faudrait ajouter 0,7°C aux estimations du GIEC pour tenir compte de la hausse des températures qui a eu lieu durant la période 1850-1986.

1.2.2.2 Impact des changements climatiques sur les ressources en eau au Maroc

Selon les projections effectuées au niveau du Maroc, le capital eau (en m³/habitant/an) subirait une baisse importante dès l'horizon 2020 (Tableau ci-après), devant engendrer une situation de pénurie d'eau entre les horizons 2020 et 2050 et ce quel que soit le scénario d'émission des GES considéré (Figures ci-après).

Table 18 : Projection du capital Eau (m³/habitant/an) Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC Sinan)

Année	Scénario optimiste	Scénario pessimiste	Moyenne des scénarios optimiste et pessimiste
1960	2560	2560	2560
2000	775	775	775
2020	575	569	572
2050	518	464	491
2080	342	217	279

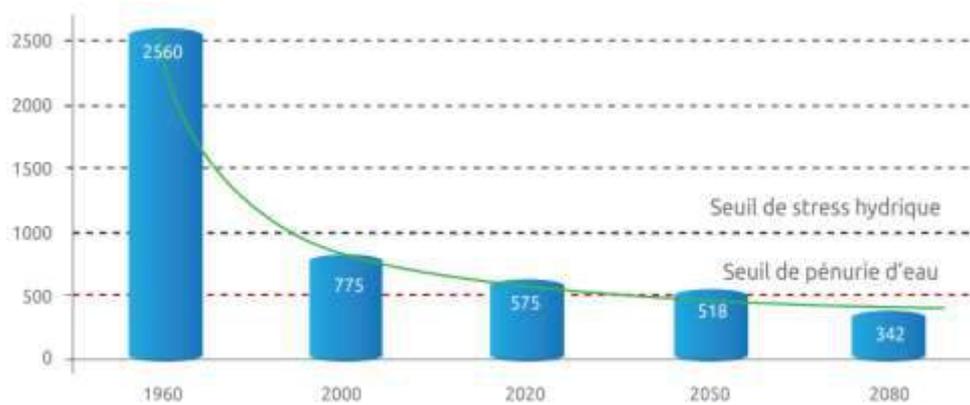


Figure 24 : Projection du Capital Eau (m3/habitant/an) Scénario optimiste Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC Sinan M. et Belhouji A., 2015)

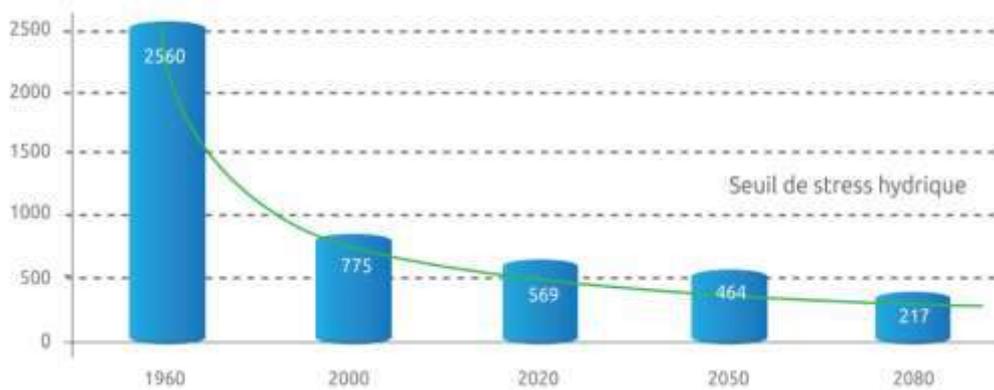


Figure 25 : Projection du Capital Eau (m3/habitant/an) Scénario pessimiste Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC Sinan M. et Belhouji A., 2015)

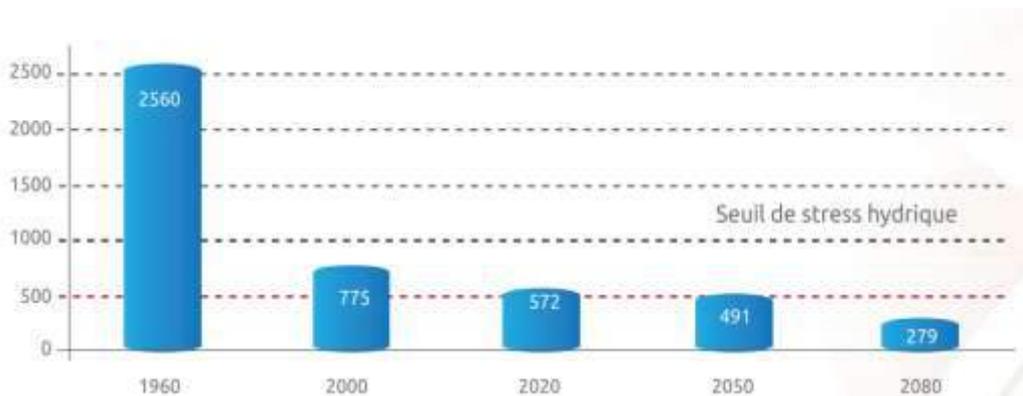


Figure 26 : Projection du Capital Eau (m3/habitant/an) Moyenne des scénarios optimiste et pessimiste Source (3ème communication nationale du Maroc à la CCNUCC Sinan M. et Belhouji A., 2015)

1.2.3 2^{ème} communication nationale du Maroc à la CCNUCC 2010 (cas du bassin du Souss-Massa)

La région de Souss-Massa est considérée comme une zone pilote en matière d'étude d'impact du changement climatique sur les ressources en eau dans la seconde communication nationale du Maroc, les projections dans cette dernière sont effectuées en se basant sur les scénarios A2B2 issus des anciens rapports du GIEC (2001-2007). Les résultats de ces projections sont montrés sur les

Table 19: Evolution de la température et des précipitations dans les sous-bassins du Souss Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC).

Sous-bassins	2020	2050	2080
Tamri-Tamraght	0,25< $\Delta T^{\circ}C$ <0,40 -15< $\Delta P/P\%$ <-10	0,40< $\Delta T^{\circ}C$ <0,80 -32< $\Delta P/P\%$ <-20	1,00< $\Delta T^{\circ}C$ <1,50 -55< $\Delta P/P\%$ <-45
Haut-Souss	0,10< $\Delta T^{\circ}C$ <0,18 -7< $\Delta P/P\%$ <0	0,35< $\Delta T^{\circ}C$ <0,45 -32< $\Delta P/P\%$ <-20	0,60< $\Delta T^{\circ}C$ <0,80 -60< $\Delta P/P\%$ <-35
Souss rive droite	0,14< $\Delta T^{\circ}C$ <0,20 -20< $\Delta P/P\%$ <-15	0,40< $\Delta T^{\circ}C$ <0,50 -38< $\Delta P/P\%$ <-20	0,60< $\Delta T^{\circ}C$ <0,80 -65< $\Delta P/P\%$ <-45
Souss rive gauche	0,10< $\Delta T^{\circ}C$ <0,14 -15< $\Delta P/P\%$ <-5	0,25< $\Delta T^{\circ}C$ <0,40 -38< $\Delta P/P\%$ <-20	0,40< $\Delta T^{\circ}C$ <0,70 -60< $\Delta P/P\%$ <-30
Massa	0,12< $\Delta T^{\circ}C$ <0,20 -10< $\Delta P/P\%$ <-7	0,30< $\Delta T^{\circ}C$ <0,55 -18< $\Delta P/P\%$ <-10	0,60< $\Delta T^{\circ}C$ <1,00 -30< $\Delta P/P\%$ <-20
Tiznit-Ifni	0,14< $\Delta T^{\circ}C$ <0,16 -10< $\Delta P/P\%$ <-4	0,30< $\Delta T^{\circ}C$ <0,45 -10< $\Delta P/P\%$ <0	0,50< $\Delta T^{\circ}C$ <0,70 -30< $\Delta P/P\%$ <+5

tableaux ci-dessous.

Table 20 : Résultats des changements climatiques globaux - Souss-Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC)

Scénario SRES	2020			2050			2050		
	$\Delta P/P\%$ ¹	$\Delta ETP/ETP\%$ ²	$\Delta T^{\circ}C$ ³	$\Delta P/P\%$	$\Delta ETP/ETP\%$	$\Delta T^{\circ}C$	$\Delta P/P\%$	$\Delta ETP/ETP\%$	$\Delta T^{\circ}C$
A2	-5	1,42	0,53	-18,82	4,32	1,42	-34,22	7,42	2,52
B2	-9,79	2,01	0,7	-13,27	4,13	1,41	-21,51	5,71	2,44

Les taux de changements des précipitations ont été appliqués aux relations « Pluie-Débit » adoptées par l'Agence de Bassin Hydraulique de la région du Souss Massa en vue d'obtenir les changements futurs dans les ressources hydriques.

Ces changements climatiques en termes pluviométriques (inputs) et de pertes par évapotranspiration sous l'effet de l'augmentation des températures, s'accompagneront de

Table 21 : Taux de changement des apports annuels en eau en fonction des bassins à l'horizon 2050 dans la région de Souss Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC)

Bassin	Intervalle de variation du taux de changement des apports annuels en eau $\Delta Q/Q$ en %	
	Limite inférieure	Limite supérieure
Tamri	-23.81	-14.88
Tamraght	-22.82	-14.27
Haut Sous	-26.26	-16.41
Souss rive D	-32.97	-17.35
Souss rive G	-34.11	-17.95
Massa	-14.37	-7.98
Tiznit-Ifni	-8.37	0.00

Table 22 : Taux de changement des apports annuels en eau en fonction des bassins à l'horizon 2080 dans la région de Souss Massa (Source 2ème communication nationale CCNUCC)

Bassin	Intervalle de variation du taux de changement des apports annuels en eau $\Delta Q/Q$ en %	
	Limite inférieure	Limite supérieure
Tamri	-40.93	-33.49
Tamraght	-39.23	-32.10
Haut Sous	-49.24	-28.72
Souss rive D	-56.40	-39.04
Souss rive G	-53.86	-26.93
Massa	-23.95	-15.97
Tiznit-Ifni	-25.11	4.19

changements dans les apports annuels d'eau.

Table 23 : Taux de changement des apports annuels en eau de la région de Souss Massa (Source 2ème

Scénario SRES	$\Delta Q/Q$ % 2020s	$\Delta Q/Q$ % 2050s	$\Delta Q/Q$ % 2080s
A2	-5	-18.82	-34.22
B2	-9.79	-13.27	-21.51

communication nationale CCNUCC)

1.2.4 Le Plan Territorial de lutte contre le Réchauffement Climatique de la région de Souss Massa (PTRC SM)

Le PTRC est un portefeuille de projets d'adaptation et d'atténuation, à mettre en œuvre de manière prioritaire, en impliquant l'ensemble des préfectures et provinces de la région ainsi que les secteurs d'activités revêtant une importance capitale pour la région et son économie (Agriculture, tourisme, énergie, gestion de déchets, industrie, habitat, littoral et pêche, etc...).

Fruit d'une collaboration du SEDD, à travers sa Direction Régionale de l'Environnement de Souss Massa, et le Conseil Régional de Souss Massa avec l'appui de la Coopération Allemande, notamment le ProGEC-GIZ, ce PTRC constitue le premier Plan du genre au Maroc.

Par la réalisation de son PTRC, la région du Souss Massa témoigne de son dynamisme, un vrai engagement des différents acteurs locaux et qui a pu les fédérer autour de la problématique climatique pour en faire une opportunité de développement de projets d'adaptation et d'atténuation des Gaz à Effet de Serre (GES).

La méthodologie suivie est conforme aux normes reconnues par le GIEC pour le calcul analytique des émissions de GES. L'étude de la vulnérabilité est de la sensibilité du territoire s'est inspirée du 4^{ème} rapport du GIEC, et a décomposé le territoire en unités d'exposition homogènes (le littoral, la plaine de Souss Massa, le Haut Atlas occidental, l'anti Atlas et la zone présaharienne).

La situation Territoriale de la lutte contre le réchauffement climatique (STRC) a évalué à 4146.5 Gg Eq-CO2 les émissions anthropiques nette de GES de la région Souss Massa pour l'année 2013, soit 1.5T Eq-CO2 par habitant. La vulnérabilité de la Région SM face au changement climatique est assez prononcée ; l'ensemble des unités territoriales précitées manifestent des niveaux d'exposition élevé à très élevé. Cette vulnérabilité se traduit par des impacts concrets, dont certains on déjà pris place, et qui touchent l'ensemble des secteurs ayant fait l'objet de l'analyse, notamment les ressources en eau et l'activité agricole.

Ainsi, et pour réduire de manière efficace et efficiente les risques générés par le réchauffement climatique au niveau territorial, des actions d'atténuation et d'adaptation ont été formulées et hiérarchisées dans le cadre d'ateliers thématiques.

En termes d'atténuation, les projets proposés ambitionnent une réduction en émissions de GES du territoire de l'ordre de 75%, soit 3100 Gg Eq-CO2 à l'horizon de 2030. La résilience du territoire est

prévue être renforcée, au niveau des secteurs vulnérables, en protégeant 60% environ de la population régionale des risques d'inondations.

Sur le plan financier, le PTRC propose un portefeuille de programmes et projets prioritaires avec un coût global qui s'élève à 31.6 Milliards de Dhs, incluant les deux composantes (atténuation et adaptation).

La dynamique enclenchée dans la région grâce aux programmes sectoriels associant les acteurs publics et privés a fait porter le taux d'avancement à environ 10% après une année d'opérationnalisation du PTRC-SM. Il va sans dire que des efforts considérables sont encore à mener en matière de mobilisation de fonds. Pour cela, un appui du programme ProGEC-GIZ était sollicité pour le déploiement d'une stratégie régionale du financement climatique, à travers une expertise internationale.

2. Projections et scénarios climatiques à l'horizon 2100

2.1 Scénarios d'émission de Gaz à Effet de Serre (GES)

Le climat à venir est notamment fonction des émissions ou concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols dues aux activités humaines. Or, les émissions humaines dépendent de notre consommation énergétique : chauffage et climatisation, transports, production de biens de consommation, activités agricoles, etc. Pour réaliser des projections climatiques, il faut donc émettre des hypothèses sur l'évolution de la démographie mondiale et des modes de vie à travers la planète. Il résulte de ces hypothèses des scénarios d'émission de GES, qui sont décrits dans les rapports du GIEC.

2.1.1 Les scénarios A1A2 B1B2 : Rapports (2001-2007)

Dans les précédents Rapports du GIEC, l'analyse reposait sur un faisceau de futurs possibles de nos sociétés et de nos modes de vie. Ces scénarios socio-économiques, organisés en 4 familles (**A1**, **A2**, **B1** et **B2**), étaient traduits chacun en termes d'émissions de gaz à effet de serre pour le XXIème siècle. Ces évolutions des émissions ou des concentrations de gaz à effet de serre et d'aérosols étaient alors utilisées par les climatologues comme données d'entrée des modèles simulant le climat futur. Les scénarios climatiques émergeant de ces simulations étaient à leur tour utilisés dans des modèles d'impacts permettant notamment de simuler les effets du climat sur les écosystèmes ou l'hydrologie. Ces résultats étaient enfin utilisés dans des études socio-économiques sur les impacts et l'adaptation aux changements climatiques.

❖ Famille A1

Elle postule une croissance économique très rapide et répartie de façon homogène sur la planète. La population mondiale atteint un maximum de 9 milliards d'individus au milieu du siècle pour décliner ensuite. De nouvelles technologies énergétiquement efficaces sont introduites rapidement. Les variantes viennent de l'utilisation plus ou moins intense des combustibles fossiles. Par exemple, la variante **A1B** suppose une utilisation des différentes sources énergétiques sans en privilégier une en particulier (scénario médian). À l'inverse, le scénario **A1FI** est le plus pessimiste, puisqu'il suppose que ce sont surtout des sources d'énergie fossile qui sont utilisées.

❖ Famille A2

Elle prévoit un monde beaucoup plus hétérogène : la croissance économique et le développement des technologies énergétiquement efficaces sont très variables selon les régions et la population atteint 15 milliards d'habitants à la fin du siècle sans cesser de croître.

❖ Famille B1

Elle décrit la même hypothèse démographique que la famille A1 mais avec une économie rapidement dominée par les services, les « techniques de l'information et de la communication » et dotée de technologies énergétiquement efficaces. Mais sans initiatives supplémentaires par rapport à aujourd'hui pour gérer le climat. Ce scénario est le plus optimiste.

❖ Famille B2

Elle décrit un monde à mi-chemin des scénarios A1 et A2 sur les plans économiques et technologiques, qui voit sa population atteindre à 10 milliards d'habitants en 2100, sans cesser de croître.

2.1.2 Les scénarios RCP : 5^{ème} Rapport du GIEC (2014)

Lors de la préparation du 5^{ème} Rapport, une approche différente a été adoptée afin d'accélérer le processus d'évaluation. Pour analyser le futur du changement climatique, les experts du GIEC ont cette fois défini a priori quatre trajectoires d'émissions et de concentrations de gaz à effet de serre, d'ozone et d'aérosols, ainsi que d'occupation des sols baptisés **RCP** (« Representative Concentration Pathways » ou « Profils représentatifs d'évolution de concentration »). Ces RCP sont utilisés par les différentes équipes d'experts (climatologues, hydrologues, agronomes, économistes ...), qui travaillent pour la première fois en parallèle. Les climatologues en déduisent des projections climatiques globales ou régionales. Les économistes établissent des scénarios qui explorent toutes les possibilités d'évolutions technologiques et socio-économiques compatibles avec les RCP.

❖ A quoi correspondent les RCP ?

Les quatre profils d'évolution des concentrations des gaz à effet de serre (RCP) retenus par les experts du GIEC pour le 5^{ème} Rapport ont été traduits en termes de **forçage radiatif**, c'est-à-dire de modification du bilan radiatif de la planète. Le bilan radiatif représente la différence entre le rayonnement solaire reçu et le rayonnement infrarouge réémis par la planète. Il est calculé au sommet de la troposphère (entre 10 et 16 km d'altitude). Sous l'effet de facteurs d'évolution du climat, comme par exemple la concentration en gaz à effet de serre, ce bilan se modifie : on parle de forçage radiatif.

Les 4 profils RCP (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 et RCP 8.5) correspondent chacun à une évolution

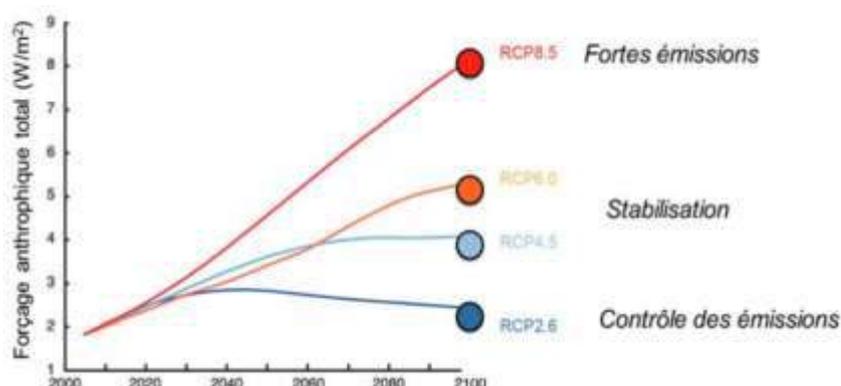


Figure 27 : Evolution du bilan radiatif de la terre "Forçage radiatif" en W/m^2 sur la période 2000-2100 selon les scénarios RCP (GIEC)

différente de ce forçage à l'horizon 2300. Ils sont identifiés par un nombre, exprimé en W/m^2 (puissance par unité de surface), qui indique la valeur du forçage considéré. Plus cette valeur est élevée, plus le système terre-atmosphère gagne en énergie et se réchauffe.

2.1.3 Comparaison et choix des scénarios d'émission de GES

Les RCP et les scénarios utilisés pour les Rapports 2001 et 2007 se recouvrent partiellement. Les RCP couvrent cependant une période plus longue : jusqu'à 2300 (2100 pour les anciens scénarios). Le profil RCP 8.5 est le plus extrême (pessimiste). Il est un peu plus fort que le scénario le plus marqué utilisé dans les simulations du rapport du GIEC 2007 (A2).

Les profils RCP 6.0 et RCP 4.5 correspondent sensiblement et respectivement aux scénarios A1B et B1.

Enfin, le profil RCP 2.6 est sans équivalent dans les anciennes propositions du GIEC. En effet, sa réalisation implique, et c'est une nouveauté importante, l'intégration des effets de politiques de

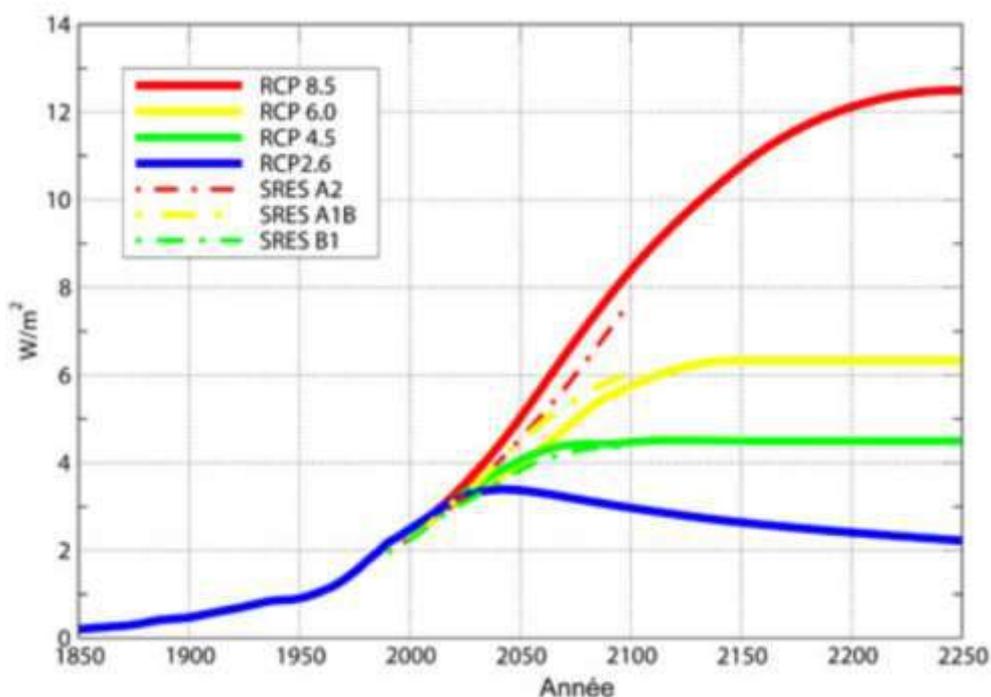


Figure 28: Évolution du bilan radiatif de la terre ou « forçage radiatif » en W/m^2 sur la période 1850-2250 selon les différents scénarios (GIEC)

réduction des émissions susceptibles de limiter le réchauffement planétaire à $2^{\circ}C$.

2.1.4 Scénarios choisis pour l'étude

Dans cette étude, on va se baser dans les projections climatiques sur les quatre scénarios RCP. Chaque RCP représente une valeur différente de changement climatique d'origine humaine (c'est-à-dire que chaque RCP se traduit par une quantité différente de chaleur additionnelle stockée dans le système Terre suite à l'émission de gaz à effet de serre).

Les scénarios sont rédigés en fonction d'hypothèses de croissance économique, de choix technologiques et d'utilisation des terres. Les scénarios reflètent une large palette de mesures d'atténuation.

Le nombre associé à chaque RCP indique l'intensité du changement climatique dû à l'homme en 2100 par rapport à l'époque préindustrielle.

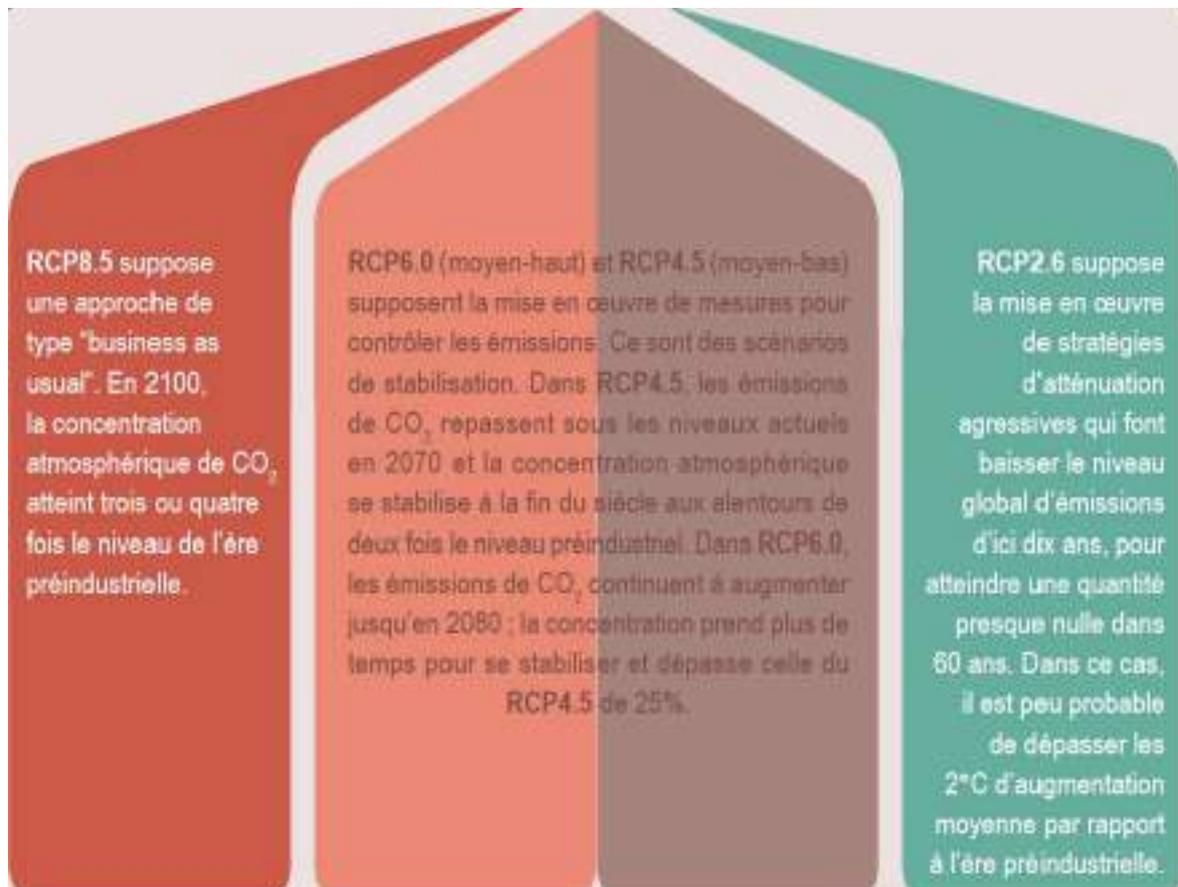


Figure 29 : Mesures d'atténuation reflétées par les scénarios RCP

Nom	Forçage radiatif	Concentration de GES (ppm)	Trajectoire
RCP 8.5	>8,5Wm ⁻² en 2100	>1370 eq-CO ₂ en 2100	croissante
RCP 6.0	~6Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~850 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 4.5	~4,5Wm ⁻² au niveau de stabilisation après 2100	~660 eq-CO ₂ au niveau de stabilisation après 2100	Stabilisation sans dépassement
RCP 2.6	Pic à ~3Wm ⁻² avant 2100 puis déclin	Pic ~490 eq-CO ₂ avant 2100 puis déclin	Pic puis déclin

Table 24 : Caractéristiques principales des RCP (Moss et al, Nature 2010)

Le tableau ci-après résume les caractéristiques principales des RCP.

2.2 Etablissement des projections climatiques à grande échelle

2.2.1 Modèles de circulation générale (MCG)

Un modèle de circulation générale, **MCG** (General Circulation Models) est un modèle climatique. Il s'appuie sur les équations de Navier-Stokes, appliquées à une sphère en rotation ainsi que sur des équations d'équilibre de la thermodynamique pour inclure les sources d'énergie (rayonnement, changement de phase). Ceci permet de simuler à la fois la circulation atmosphérique mais aussi la circulation océanique. Ces équations sont ensuite codées pour être utilisées par des superordinateurs.

Les améliorations récentes des méthodes numériques, des approches de paramétrisation des processus physiques, des techniques de programmation et de la puissance des ordinateurs ont permis une évolution significative dans les Modèles de Circulation Générale. En effet, ces modèles ont évolué de modèles purement atmosphériques à des Modèles du Climat Global Atmosphère-Océan, **MCGAO** (Atmosphere-Ocean General Circulation Models), qui incluent les océans, les processus de surface terrestre et d'interface océan-glace, ainsi que des paramétrisations physiques de « **phénomènes de la sous-échelle** ».

Les processus de sous-échelle sont une conséquence de la résolution des équations hydrostatiques / non hydrostatiques de la mécanique de fluides dans un nombre discret d'instantanés dans le temps et de points dans l'espace, en substituant le continuum par une grille spatiale de points. Les dimensions de la grille de base déterminent l'échelle minimum des phénomènes qui peuvent être résolus par les équations. Les échelles plus petites que la grille de base sont connues comme les échelles de sous-grille. Par exemple, les nuages, les fronts, les ondes de gravité et la turbulence ne sont habituellement pas résolus explicitement et, par conséquent, représentent des phénomènes de la sous-grille. Cependant, ils sont très importants dans plusieurs bilans et dans les transports verticaux de la quantité de mouvement, de la chaleur et de la vapeur d'eau.

Les modèles climatiques constituent des outils importants dans les travaux de recherche sur l'évolution du climat actuel. Les simulations des MCGAO sont la source principale d'information pour l'estimation des impacts futurs des changements climatiques dus au forçage anthropogénique. Les MCGAO ont été utilisés pour produire les simulations du XX^{ème} siècle en commençant avec des niveaux atmosphériques de CO₂ correspondant aux conditions préindustrielles, et en imposant une perturbation qui reflète les changements dans le forçage radiatif associé à l'augmentation des gaz à effets de serre durant le XX^{ème} siècle.

Malgré tous les progrès scientifiques et technologiques enregistrés, les ressources, tant sur le plan informatique que sur le plan humain, restent encore limitées. La résolution spatiale de la plupart des MCGAO est encore limitée à des résolutions horizontales de ~100-300 km, trop faibles pour produire l'information de qualité nécessaire pour la plupart des études d'impact. Le pas de temps de calcul des MCGAO a une valeur typique de 20 min. Cette résolution spatiale représente un découpage qui permet de représenter d'une façon relativement grossière les processus qui se déroulent en fait à des échelles spatiales moins fines. Pour certains types d'études d'estimation de l'impact des changements climatiques sur les ressources en eau dans les très grands bassins hydrologiques, les valeurs moyennes estimées aux points de grille d'un MCGAO peuvent être suffisantes. Cependant, c'est insuffisant pour faire l'estimation de l'impact hydrologique local des changements climatiques. Comme le cas de cette présente étude, l'information disponible aux points de grille du MCGAO est insuffisante.

2.2.2 Projections climatiques de CMIP5

Afin d'avoir des projections climatiques pour les scénarios RCP, on a utilisé la base de données de CMIP5 disponible dans le portail développé par la banque mondiale (http://sdwebx.worldbank.org/climateportal/index.cfm?page=country_future_climate&ThisRegion=Africa&ThisCcode=MAR). On a choisi le modèle **Csiro_Mk3_6_0** qui est plus adapté au Maroc.

2.2.2.1 Température moyenne mensuelle à l'horizon 2100

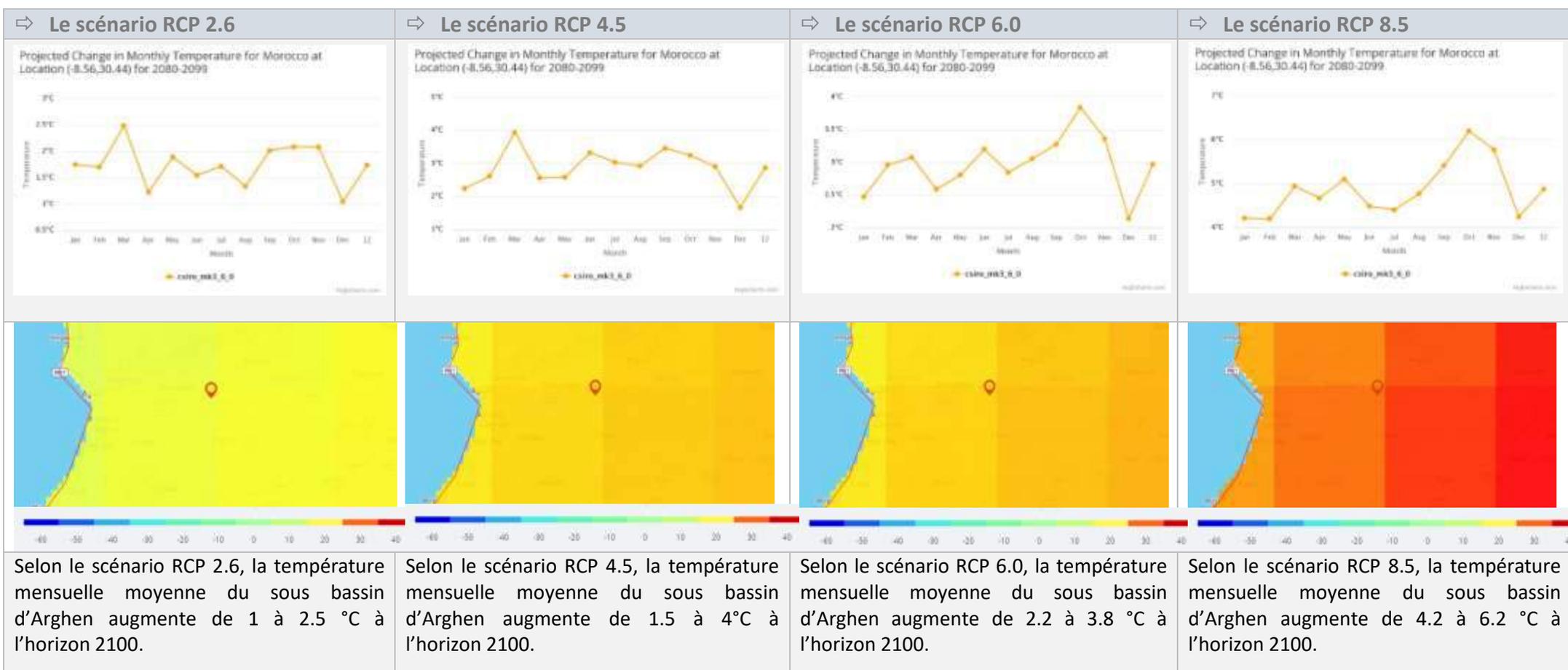


Table 25 : Projection des températures moyennes mensuelles à l'horizon 2100.

Remarque : La période de référence est 1986-2005.

2.2.2.2 Température maximale mensuelle à l'horizon 2100

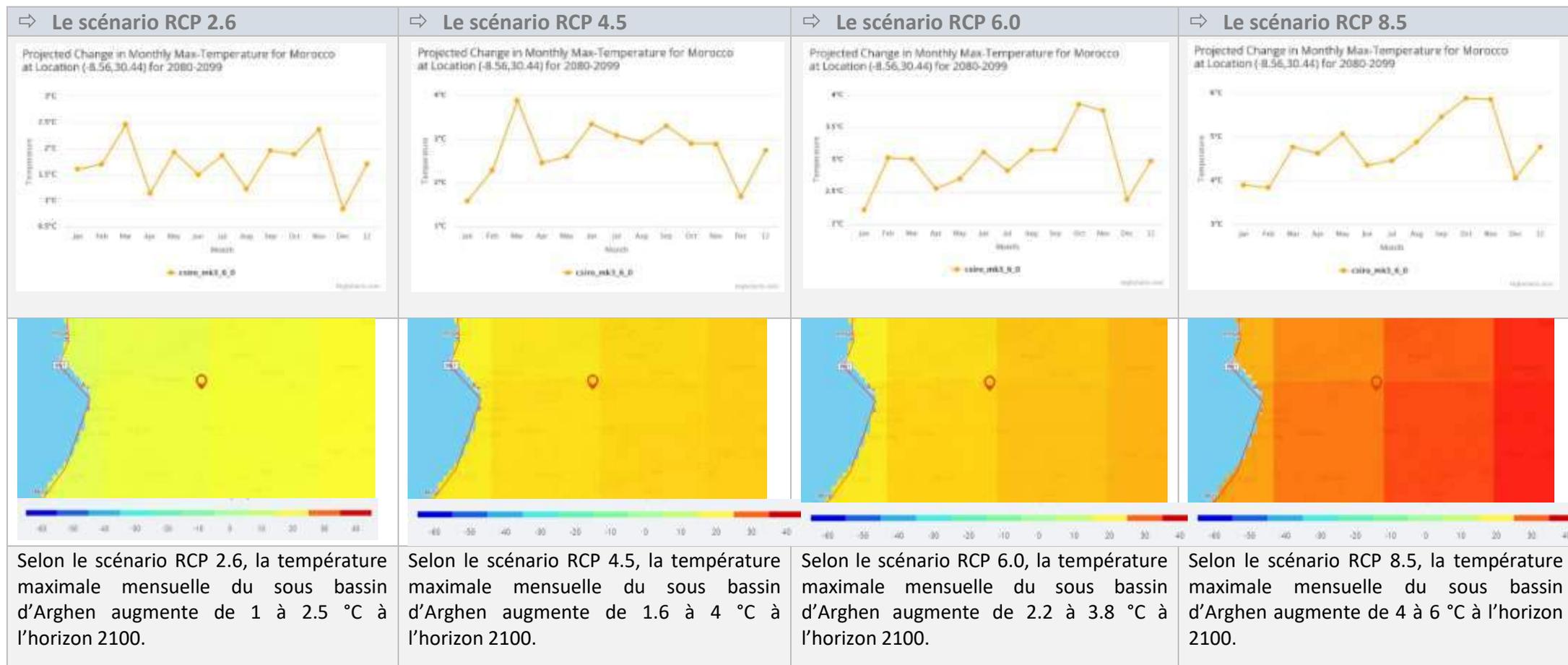


Table 26 : Projections des températures maximales mensuelles à l'horizon 2100

2.2.2.3 Température minimale mensuelle à l'horizon 2100

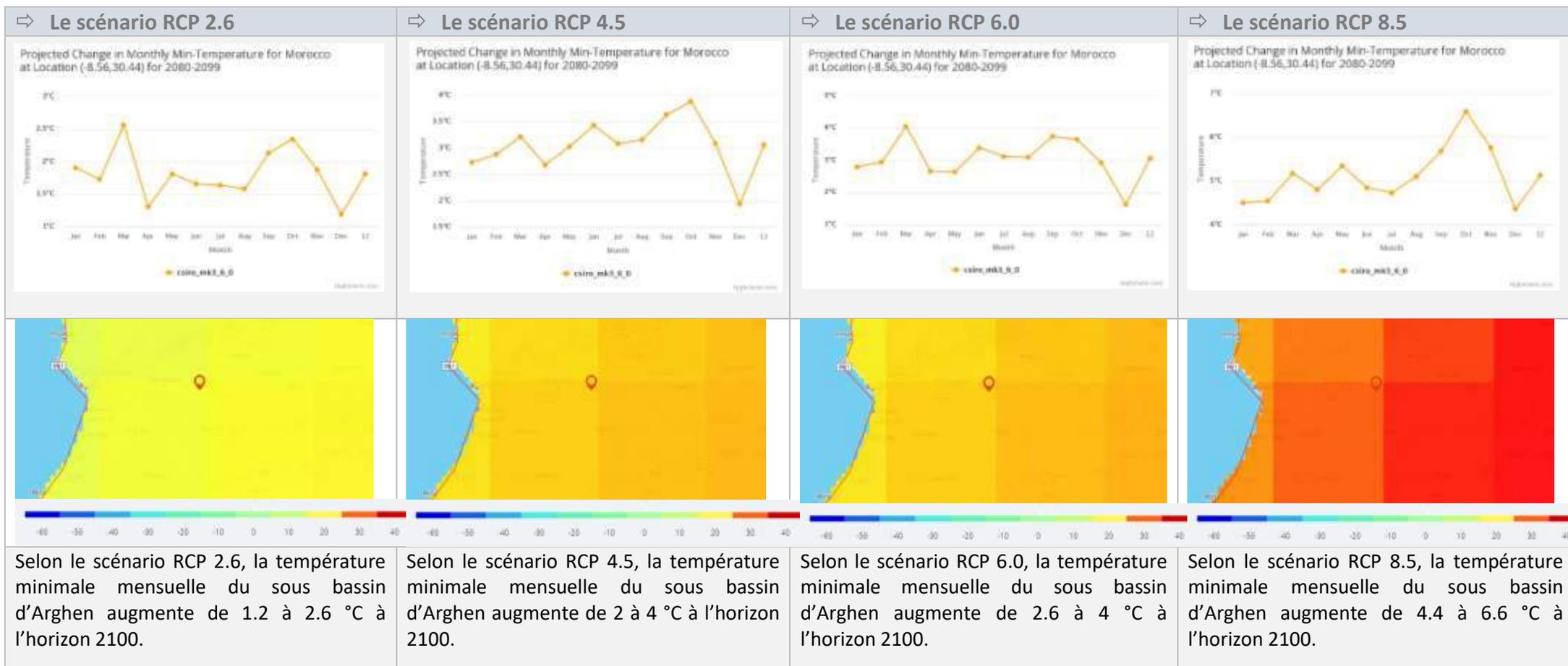
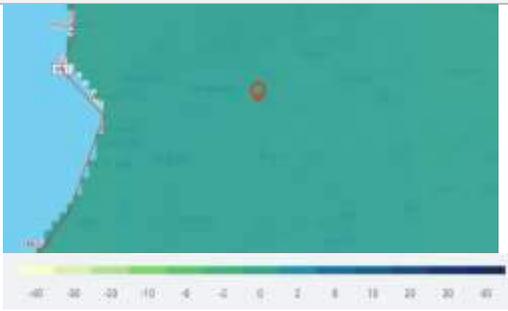


Table 27 : Projection des températures minimales mensuelles à l'horizon 2100

2.2.2.4 Précipitations moyenne mensuelle à l'horizon 2100

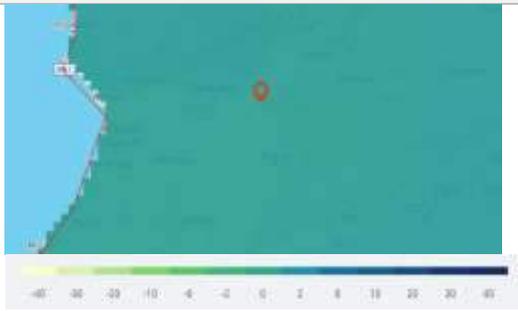
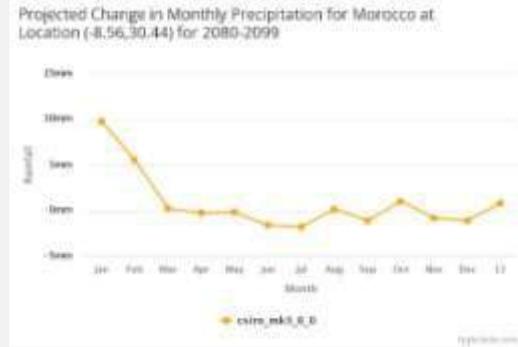
Table 28 : Projections des précipitations moyennes mensuelles à l'horizon 2100

⇒ Le scénario RCP 2.6



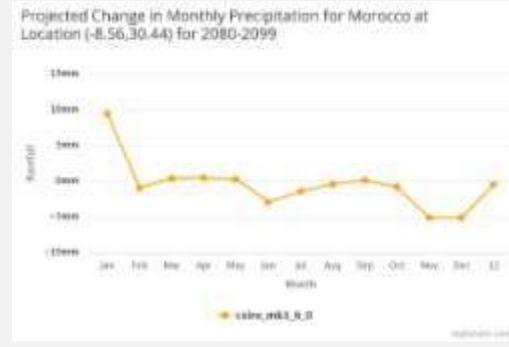
A l'horizon 2100, selon le scénario RCP 2.6, les précipitations mensuelles du sous bassin de d'Arghen fluctuent entre +5mm et -5mm.

⇒ Le scénario RCP 4.5



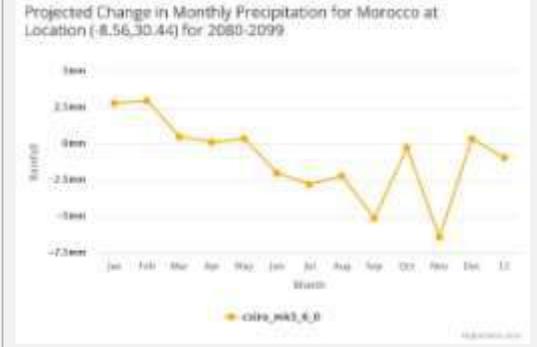
A l'horizon 2100, selon le scénario RCP 4.5, les précipitations mensuelles du sous bassin de d'Arghen augmentent de 10 mm en janvier et ne subissent aucune variation pour le reste de l'année.

⇒ Le scénario RCP 6.0



A l'horizon 2100, selon le scénario RCP 6.0, les précipitations mensuelles du sous bassin de d'Arghen augmentent de 10 mm en janvier, diminuent de 5mm en novembre/décembre et ne subissent aucune variation pour le reste de l'année.

⇒ Le scénario RCP 8.5



A l'horizon 2100, selon le scénario RCP 8.5, les précipitations mensuelles du sous bassin de d'Arghen augmentent de 2.5 mm en janvier et commence à diminuer à partir de mars pour atteindre -7.5mm en novembre.

2.3 Descente d'échelle (Downscaling)

Etant donné que les modèles de circulation générale (MCG) sont généralement tournés avec des résolutions spatiales de l'ordre de 100 à 300 km dans la plupart des cas, ils ne permettent pas d'accéder aux échelles spatiales locales comme celle de notre zone d'étude. Leurs sorties ne peuvent être directement utilisées pour alimenter les modèles d'impacts.

Rappelons en effet que les forçages et les circulations qui modifient le climat régional se produisent généralement à des échelles spatiales plus fines et peuvent conduire à des conditions climatiques régionales bien différentes de ce que présuppose l'état climatique global.

Les techniques de descente d'échelle (réduction d'échelle, downscaling ou désagrégation) spatiales servent notamment à élaborer des scénarios de changement climatique à échelles spatiales fines à partir de sorties de MCG à résolution plus grossière. Classiquement, les méthodes de désagrégation sont rangées en deux classes : la *désagrégation statistique* et la *désagrégation dynamique*.

2.3.1 Méthodes de downscaling

2.3.1.1 Descente d'échelle dynamique

Les méthodes de descente d'échelle dynamiques permettent d'affiner l'information climatique produite par les MCGOA à l'aide de modèles à aire limitée, de modèles de circulation générale atmosphériques (MCGA) de haute résolution à tranches temporelles, ou de circulation générale atmosphérique à résolution variable.

- ❖ Les modèles climatiques à aire limitée, appelés aussi modèles régionaux de climat (MRC) à grilles emboîtées, constituent probablement la méthode de réduction d'échelle dynamique la plus largement utilisée. Ils sont, en effet, les moins coûteux de leur catégorie en moyens informatiques et de ce fait les plus accessibles. Ils consistent à réaliser des simulations à haute résolution sur uniquement une région donnée, dite région d'intérêt. Les modèles à aire limitée nécessitent la connaissance à chaque instant des conditions aux bords de leur domaine d'intégration. Celles-ci sont fournies par le modèle dit de forçage qui est en général un MCGOA. Cette dépendance des modèles climatiques à aire limitée d'un modèle de forçage, constitue leur limitation principale.
- ❖ L'approche des MCGA de haute résolution consiste à simuler à l'aide d'un modèle de circulation générale atmosphérique certaines périodes données ou tranches temporelles (par exemple 1971-2000 ou 2021-2050) d'une simulation (à faible résolution) faite à l'aide d'un MCGOA dite simulation transitoire. La température de surface de l'océan (SST) nécessaire pour ces simulations est fournie par les MCGOA. L'hypothèse de base de cette approche est que le forçage SST issu du MCGAO soit cohérent avec la climatologie du MCGA de haute résolution. Les MCGA de haute résolution ont l'avantage de s'affranchir de tout forçage aux bords et de fournir des informations sur tout le globe au même degré de précision. Ils ont cependant une limitation principale qui réside dans leur coût informatique qui les rend difficilement accessibles.
- ❖ Les modèles de circulation générale atmosphériques à résolution variable (MCGARV), développés depuis les années 1980, ont le même principe que les MCGA à haute résolution. La seule

différence qui existe entre les deux approches est que les MCGA-RV utilisent une grille horizontale à résolution variable. Leur technique consiste à prendre une haute résolution sur la région d'intérêt puis la diminuer graduellement jusqu'à l'antipode (point de minimum de résolution). Comme pour les MCGA de haute résolution, les températures de surface de l'océan leurs sont fournies par un MCGOA. Ce type de modèles a l'avantage de s'affranchir de la tutelle d'un modèle global et de garder la cohérence de la circulation de grande échelle. Son coût informatique reste intermédiaire entre les deux autres approches de réduction d'échelle dynamique.

2.3.1.2 Descente d'échelle statistique

La descente d'échelle statistique repose sur l'hypothèse que le climat régional est conditionné à la fois par les caractéristiques de grande échelle et les propriétés locales (topographie, occupation des sols, contrastes terre/mer, etc). L'approche statistique repose donc sur la recherche d'une relation statistique entre les paramètres atmosphériques de grande échelle (prédicteurs) et les variables locales (prédictees).

Cette méthode repose sur 3 grandes hypothèses :

- ❖ La variable prédictive doit être fortement liée au climat local et simulée de façon réaliste par le modèle climatique global ;
- ❖ La relation entre la variable prédictive et le climat local est supposée constante dans le temps;
- ❖ La variable prédictive doit être sensible aux changements climatiques.

La seconde hypothèse, dite de « stationnarité » est problématique, car elle n'est pas vérifiable dans le cadre des études sur le changement climatique. C'est-à-dire qu'il n'est pas garanti que dans un climat futur, la variable prédictive et le climat local soient liés de la même façon. Idéalement, les données observées devraient couvrir une large palette de conditions climatiques incluant les modifications futures des prédicteurs climatiques.

2.3.2 Projections Climatiques au niveau de la zone d'étude

Les projections climatiques sont établies pour les stations représentatives des zones climatiques du bassin d'Arghen (stations Pont Taroudant et Immerguen). Ces projections concernent les précipitations, la température maximale et la température minimale. Et ce, selon les scénarios RCP 4.5 et RCP 8.5, pour deux périodes, 2040-2069 et 2070-2099.

Les données sont issues du rapport de l'étude « MODELISATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RESSOURCES EN EAU AU NIVEAU DU BASSIN HYDRAULIQUE DE SOUS MASSA » mené par L'ABHSM.

Ces projections climatiques sont extraites à partir du serveur de la NASA : **NEX-GDDP** (NASA Earth Exchange-Global daily downscaled projections).

Le serveur NEX-GDDP comprend les projections climatiques du globe, qui sont dérivées de 21 modèles de circulation générale (MCG) réalisés dans le cadre du projet (**CMIP5**). Ces projections sont réduites à une échelle de 25 km × 25 km à l'aide d'une descente d'échelle statistique pour 2 scénarios d'émission de GES (RCP 4.5 et RCP 8.5).

Chacune des projections climatiques comprend trois variables : Précipitation Pr, température maximale Tmax et température minimale Tmin, pour la période 2006-2100. Le serveur donne accès également aux données journalières historiques de ces trois variables pour la période qui s'étale de 1950 à 2005.

2.3.2.1 Choix des MCG

Le choix des modèles de circulation générales est basé sur la corrélation entre les variables observées et celles données par les 20 modèles du serveur **NEX-GDDP** sur la période 2006-2017. Les variables considérées sont la pluie annuelle, pluie journalière maximale, température maximale et température minimale.

Les résultats de corrélation montrent que :

- La pluie annuelle et la pluie maximale journalière sont bien corrélées avec celles du modèle **GFDL_ESM2M**.
- La moyenne annuelle et le maximum des températures maximales sont bien corrélés avec ceux du modèle **MPI_ESM_MR**. Alors que le minimum des températures maximales est corrélé avec le modèle **CNRM_CM5**.
- Quant à la moyenne de la température minimale, elle est corrélée avec celle du modèle **IPSL_CM5A_LR**. Le maximum de la température minimale est corrélé avec le modèle **MPI_ESM_MR**, et le minimum est corrélé avec **MIROC_ESM**.

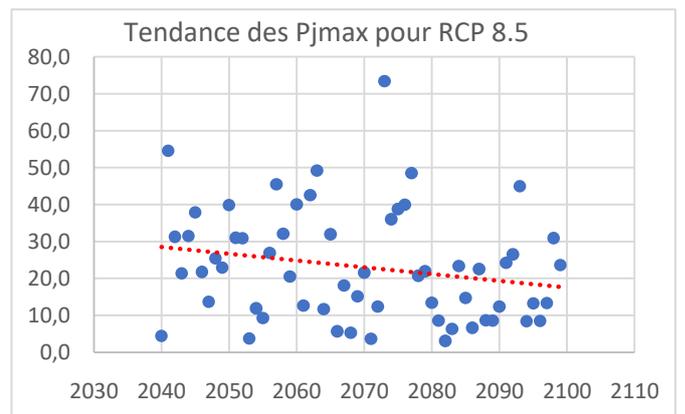
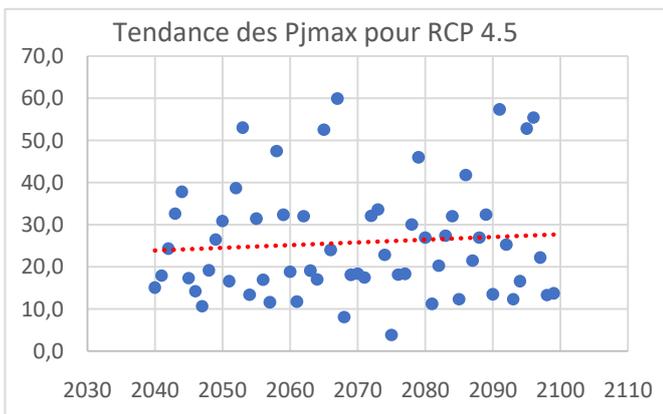
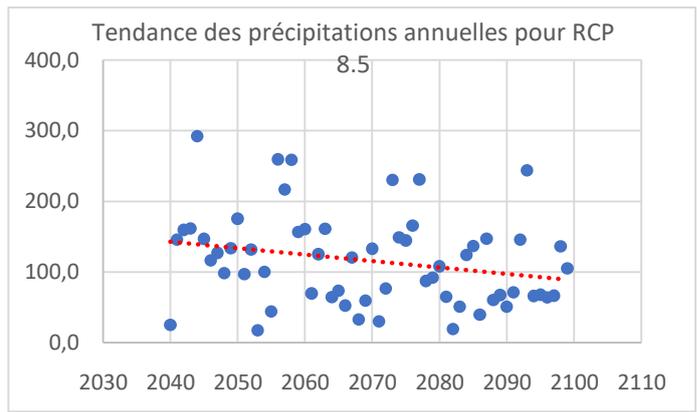
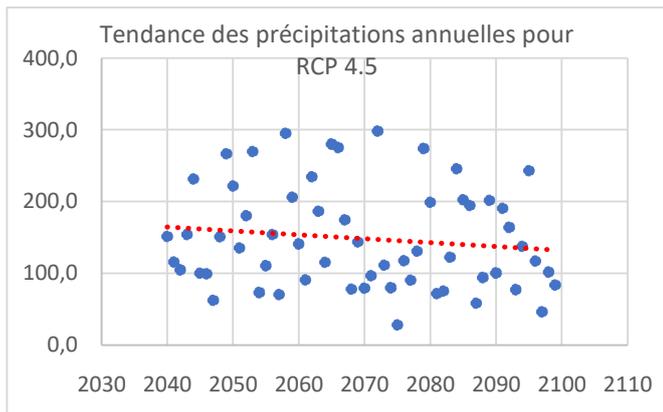
L'évaluation du changements climatiques résulte de la comparaison des projections aux données historiques de la période 1961-1990.

2.3.2.2 Projections climatiques

Les données de chaque variable sont extraites du modèle approprié comme mentionné ci-dessus.

Les résultats des projections sont mentionnés en annexe.

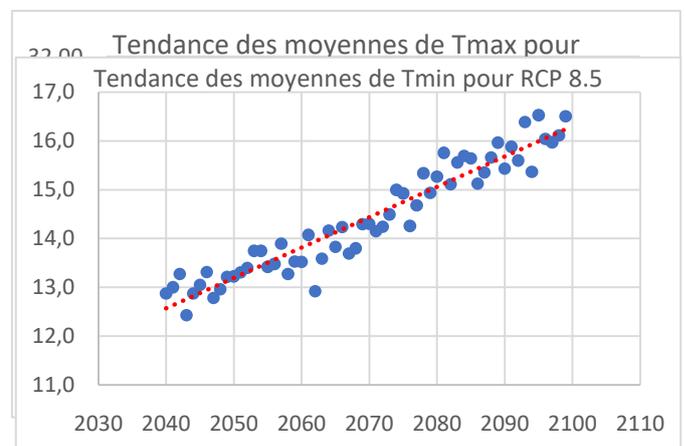
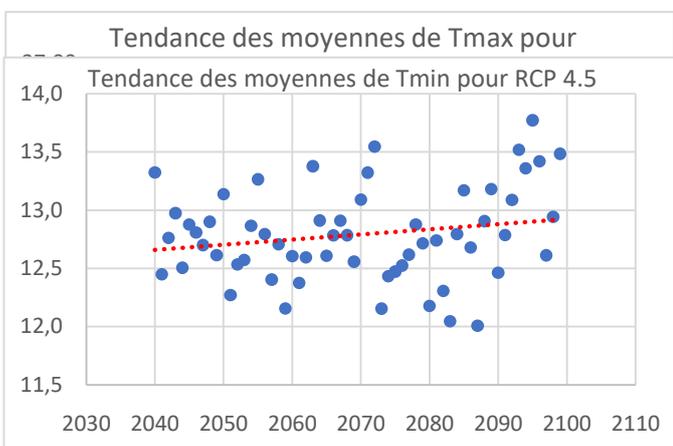
La représentation graphique des résultats est montrée dans les figures ci-dessous.



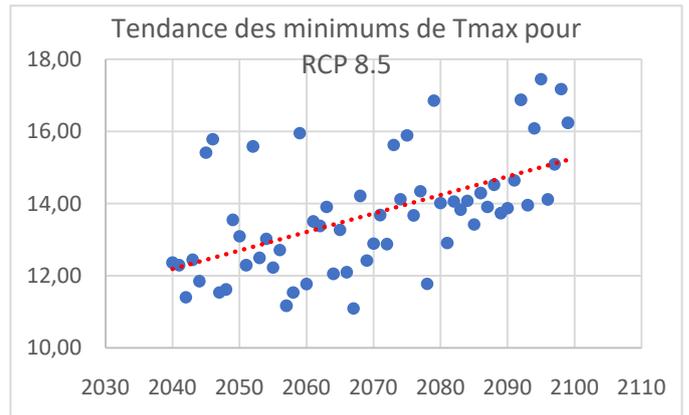
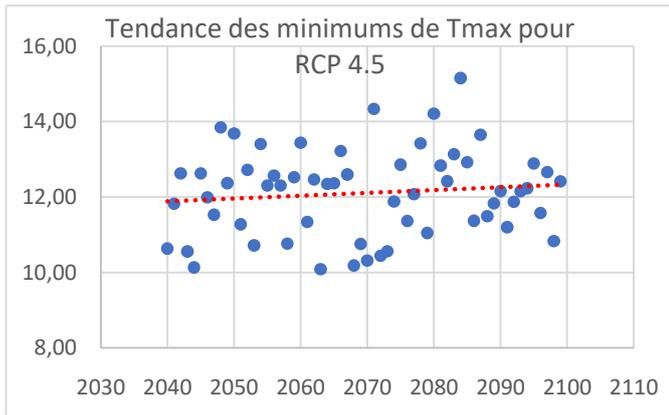
Tendance des précipitations annuelles selon RCP 4.5 et RCP8.5 pour la période (2040-2100)

Tendance des précipitations maximales selon RCP 4.5 et RCP8.5 pour la période (2040-2100)

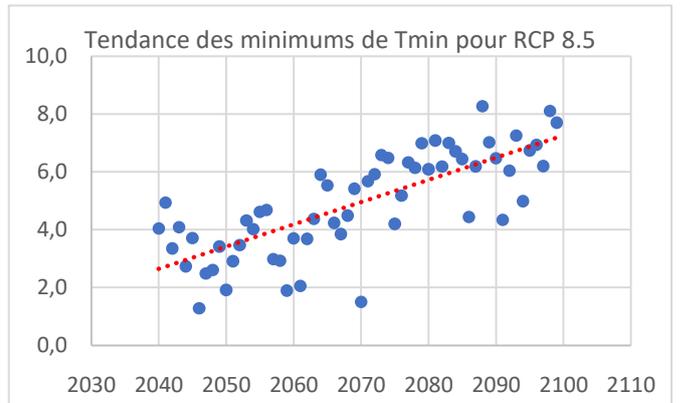
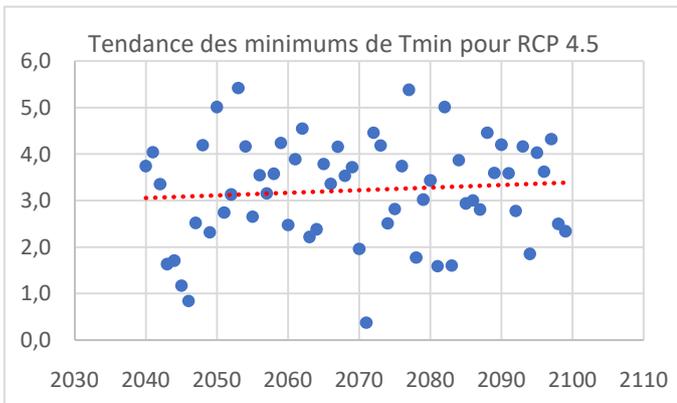
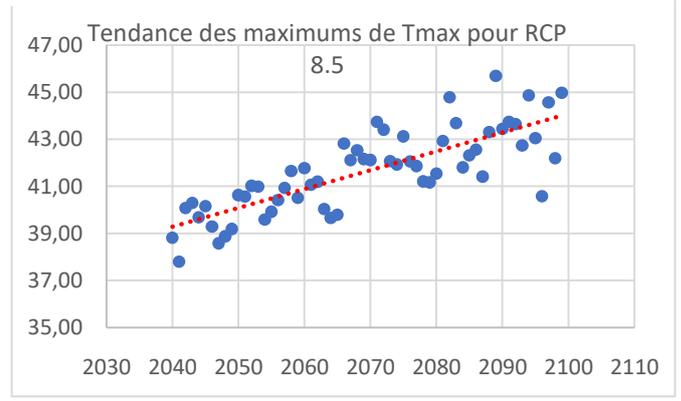
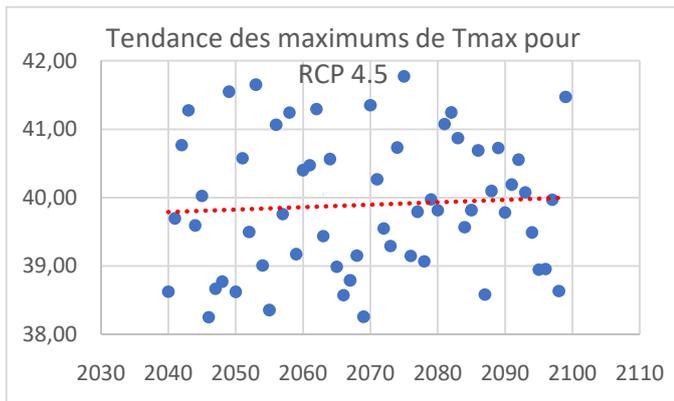
Tendance des moyennes annuelles de Tmax selon RCP 4.5 et RCP8.5 pour la période (2040-2100)



Tendance des moyennes annuelles de Tmin selon RCP 4.5 et RCP8.5 pour la période (2040-2100)



Tendance des minimums de Tmax selon RCP 4.5 et RCP8.5 pour la période (2040-2100)

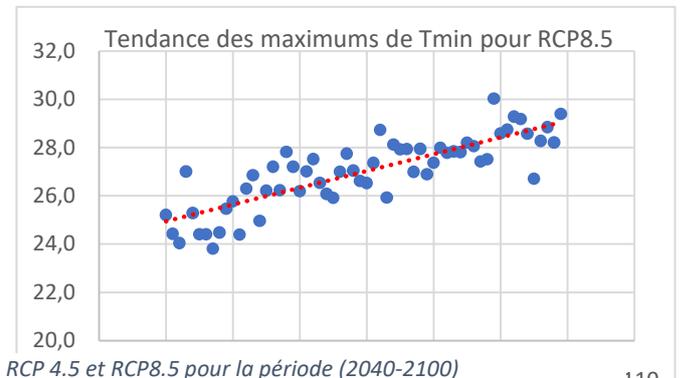
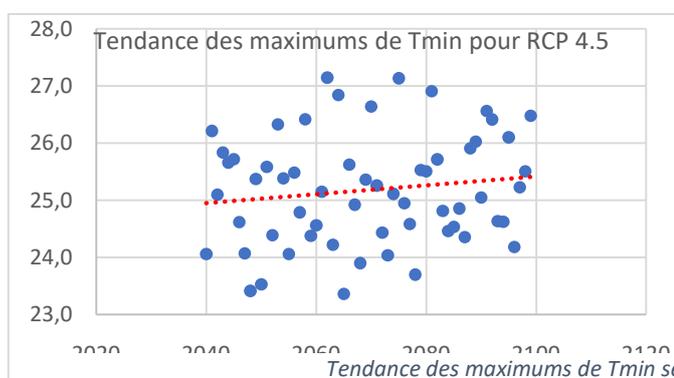


Tendance des maximums de Tmax selon RCP 4.5 et RCP8.5 pour la période (2040-2100)

Tendance des minimums de Tmin selon RCP 4.5 et RCP8.5 pour la période (2040-2100)

2.3.3 Evaluation des changements climatiques

Le changement des variables de précipitations (précipitations annuelles et précipitations journalières



Tendance des maximums de Tmin selon RCP 4.5 et RCP8.5 pour la période (2040-2100)

maximales) pour chaque période est calculé par la formule suivante : $\frac{P - P_{Historique}}{P_{Historique}} \times 100$ (%), avec **P** est la pluie annuelle/ journalières maximales des périodes 2040-2069 et 2070-2099 pour chaque scénario et **P_Historique** est la pluie annuelle/ journalières maximales historique pour la période 1961-1990.

Le changement des six variables de température (le maximum des températures maximales et minimales, le minimum des températures maximales et minimales, et la moyenne des températures maximales et minimales) pour chaque période est calculé par la formule suivante : $T - T_{Historique}$ avec **T** est la variable de la température des périodes 2040-2069 et 2070-2099 pour chaque scénario et **T_Historique** est la variable de la température historique pour la période 1961-1990.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant.

Table 29: Récapitulatif des résultats des projections climatiques dans le bassin d'Arghen

Variable	Station	Historique	RCP 4.5				RCP 8.5			
			2040-2069	Ecart par rapport à l'historique	2070-2099	Ecart par rapport à l'historique	2040-2069	Ecart par rapport à l'historique	2070-2099	Ecart par rapport à l'historique
Précipitations annuelles	Immerguen	261.62	169.07	-35.4%	137.93	-47.3%	135.21	-48.3%	110.78	-57.7%
	Pont Taroudant	243.18	154.27	-36.6%	130.12	-46.5%	115.31	-52.6%	100.08	-58.8%
	Arghen	253.29	162.39	-35.9%	134.40	-46.9%	126.23	-50.2%	105.95	-58.2%
Précipitations journalières maximales	Immerguen	33.31	26.00	-21.9%	26.05	-21.8%	28.71	-13.8%	21.75	-34.7%
	Pont Taroudant	33.16	25.23	-23.9%	25.72	-22.4%	20.40	-38.5%	20.77	-37.4%
	Arghen	33.24	25.65	-22.8%	25.90	-22.1%	24.96	-25.0%	21.31	-35.9%
Moyenne annuelle de la Température maximale	Immerguen	22.72	25.11	2.40	25.63	2.91	26.10	3.39	28.36	5.64
	Pont Taroudant	23.90	26.08	2.18	26.60	2.69	27.01	3.11	29.11	5.20
	Arghen	23.25	25.55	2.30	26.07	2.81	26.51	3.26	28.70	5.44
Température maximale d'été	Immerguen	37.34	40.41	3.06	40.99	3.64	41.31	3.97	43.88	6.54
	Pont Taroudant	35.90	38.92	3.02	38.91	3.02	39.30	3.40	41.67	5.77
	Arghen	36.69	39.74	3.04	40.05	3.36	40.40	3.71	42.88	6.19
Température maximale d'hiver	Immerguen	8.94	10.45	1.52	10.73	1.79	11.38	2.44	13.06	4.12
	Pont Taroudant	12.50	13.82	1.32	14.08	1.58	14.68	2.18	16.33	3.83
	Arghen	10.55	11.97	1.43	12.24	1.70	12.87	2.32	14.54	3.99
Moyenne annuelle de la Température minimale	Immerguen	9.44	11.34	1.91	11.42	1.99	12.11	2.67	14.11	4.68
	Pont Taroudant	12.62	14.43	1.81	14.56	1.94	15.03	2.41	16.91	4.29
	Arghen	10.88	12.74	1.86	12.84	1.97	13.43	2.55	15.37	4.50
Température minimale d'été	Immerguen	22.58	24.48	1.90	24.97	2.39	25.51	2.92	27.74	5.15
	Pont Taroudant	23.77	25.75	1.98	25.72	1.95	26.55	2.78	28.35	4.58
	Arghen	23.12	25.05	1.94	25.31	2.19	25.98	2.86	28.02	4.89
Température minimale d'hiver	Immerguen	-2.18	1.09	3.27	1.03	3.22	1.52	3.70	4.06	6.25
	Pont Taroudant	2.58	5.86	3.27	5.83	3.25	6.24	3.66	8.73	6.15
	Arghen	-0.03	3.24	3.27	3.20	3.23	3.65	3.68	6.17	6.20

Conclusions

D'après les résultats ci-dessus on déduit ce qui suit :

- Les précipitations annuelles du bassin d'Arghen sont toujours en baisse.
Pour le scénario RCP 4.5, les précipitations annuelles diminuent de 36% durant la période 2040-2069. Et diminuent de 47% durant la période 2070-2099.
Pour le scénario RCP 8.5, les précipitations annuelles diminuent de 50.2% durant la période 2040-2069. Et diminuent de 58.2% durant la période 2070-2099.
- Les précipitations maximales journalières du bassin d'Arghen sont aussi en baisse.
Pour le scénario RCP 4.5, les précipitations maximales journalières diminuent de 22.8% durant la période 2040-2069, Et diminuent de 22.1% durant la période 2070-2099.
Pour le scénario RCP 8.5, les précipitations maximales journalières diminuent de 25% durant la période 2040-2069. Et diminuent de 36% durant la période 2070-2099.
- La température maximale du bassin d'Arghen est en hausse.
Pour le scénario RCP 4.5 :
 - La moyenne annuelle de la température maximale augmente de 2.3 °C durant la période 2040-2069. Et augmente de 2.8 °C durant la période 2070-2099.
 - La température maximale d'été augmente de 3°C durant la période 2040-2069. Et augmente de 3.4 °C durant la période 2070-2099.
 - La température maximale d'hiver augmente de 1.4 °C durant la période 2040-2069. Et augmente de 1.7 °C durant la période 2070-2099.**Pour le scénario RCP 8.5 :**
 - La moyenne annuelle de la température maximale augmente de 3.3 °C durant la période 2040-2069. Et augmente de 5.4 °C durant la période 2070-2099.
 - La température maximale d'été augmente de 3.7°C durant la période 2040-2069. Et augmente de 6.2 °C durant la période 2070-2099.
 - La température maximale d'hiver augmente de 2.3°C durant la période 2040-2069. Et augmente de 4 °C durant la période 2070-2099.
- La température minimale du bassin d'Arghen est aussi en hausse.
Pour le scénario RCP 4.5 :
 - La moyenne annuelle de la température minimale augmente de 1.9 °C durant la période 2040-2069. Et augmente de 2 °C durant la période 2070-2099.
 - La température minimale d'été augmente de 2°C durant la période 2040-2069. Et augmente de 2.2 °C durant la période 2070-2099.
 - La température minimale d'hiver augmente de 3.3 °C durant la période 2040-2069 et la période 2070-2099.

Pour le scénario RCP 8.5 :

- La moyenne annuelle de la température minimale augmente de 2.5 °C durant la période 2040-2069. Et augmente de 4.5 °C durant la période 2070-2099.
- La température minimale d'été augmente de 2.9°C durant la période 2040-2069. Et augmente de 4.9 °C durant la période 2070-2099.
- La température minimale d'hiver augmente de 3.7°C durant la période 2040-2069. Et augmente de 6.2 °C durant la période 2070-2099.

2.4 Evaluation qualitative des impacts.

• Ressources en eau

Les résultats des projections prévoient une diminution de la moyenne des **précipitations annuelles**, cette diminution est conjuguée à une modification du régime spatio-temporel des précipitations. La vallée d'Arghen risque de faire face à des épisodes de sécheresse plus nombreuses et plus sévères, entraînant une pression grandissante sur les ressources en eau.

Les écoulements de surface sont aussi sensibles à la variation du climat, comme les débits sont étroitement liés aux apports pluviométriques, la diminution des précipitations entraîne un dérèglement et une diminution des débits. Dans une année, l'essentiel des débits de l'oued Arghen s'écoule sous forme de violentes et courtes crues, conséquentes aux apports pluviométriques se concentrant sur quelques jours ou quelques mois, cette variabilité temporelle risque aussi de s'accroître.

Le changement climatique entraîne une dégradation globale de **la qualité de l'eau**, ce qui a un impact direct sur la santé humaine. En effet, la diminution prévue des débits écoulés ainsi que l'augmentation de la température de l'eau diminuent le pouvoir auto-épurateur des cours d'eau et augmente la charge en agents pathogènes contenus dans celle-ci.



Figure 30 : Ordures jetées dans le lit de l'oued (Tidriouine)

La ressource en eau souterraine qui constitue la seule ressource pour l'alimentation en eau potable dans la région, et une grande partie des ressources utilisées pour l'irrigation sera également impactée par les changements climatiques. En effet, la recharge des nappes est impactée par les variations climatiques. Naturellement, la recharge des eaux souterraines peut localement avoir lieu à partir des compartiments d'eau de surface et/ou par l'alimentation diffuse des précipitations via la zone non saturée ainsi que par drainance d'aquifères.

Dans notre cas d'étude la ressource en eau souterraine se présente sous forme de nappe d'extension limitée en relation avec les cours de surface et dans les réseaux de fissures, l'aridité de la région et sa géologie principalement composée des calcaires, dolomies et conglomérats assez imperméables, ne favorise pas la recharge diffuse des nappes, de ce fait la recharge des nappes se fait principalement à travers les eaux de surface elles-mêmes sensibles à la diminution des précipitations.

Actuellement, **le suivi piézométrique** des ressources en eau souterraines est inexistant, la connaissance de l'évolution des nappes (la recharge des nappes et l'état des stocks en eau souterraine) est primordiale pour une bonne gestion de la ressource, un projet est sur le point d'être lancée par l'ABH pour l'implantation de sondes piézométriques dans un ensemble de forages et de puits représentatifs des différents contextes hydrogéologiques du territoire.

La variation du climat peut entraîner aussi la baisse de **la qualité de l'eau souterraine**. En effet, la qualité des eaux souterraines dépendante des propriétés physiques, chimiques et biologiques des aquifères est notamment contrôlée par les fluctuations climatiques. La perturbation de la recharge et de la température de l'eau modifie la chimie de l'eau, les communautés bactériennes, le transport de soluté et les temps de résidence.

Les projections climatiques prévoient aussi une augmentation des températures moyennes, en effet cette augmentation provoque un accroissement de **l'évapotranspiration potentielle (ETP)** ce qui implique une augmentation des besoins en eau des cultures. En conjuguant ce dernier à la diminution anticipée des précipitations mensuelles, la pression sur la demande en eau agricole sera fortement accentuée suite au changement climatique.

Les impacts du changement climatique sur la ressource en eau et la pression sur celle-ci se traduiront plus sur la production agricole (cultures, élevage) que sur la demande en l'eau potable.

- **La fréquence et l'importance des inondations**

Il a été admis que le changement climatique est l'un des facteurs clés favorisant les catastrophes naturelles dans le monde, et notamment les inondations, lorsque celle-ci se produisent dans un environnement physiquement, socialement et économiquement vulnérables (Qazi Kholiqzaman-2006) , néanmoins, en absence de toutes données hydrographique dans la région d'Arghen pour calibrer un modèle pluie-débit, il n'est pas évident d'anticiper l'importance et la fréquence des inondations pour le climat futur.

L'effet principal des inondations est l'érosion des berges des cours d'eau, constituées de terrasses alluviales, par où passent les séguias, et où se trouve une bonne part des champs exploités. Les fortes crues se traduisent donc par une érosion des berges, la perte des infrastructures (canaux, radiers...) et de terres fertiles.

- **L'érosion des terres**

D'après les résultats des projections climatiques, les précipitations maximales sont en régression, néanmoins, il est possible que l'intensité des pluies augmente, or c'est l'intensité qui est le facteur le plus déterminant de l'« érosivité » d'une pluie . On peut donc s'attendre à une augmentation de l'agressivité des pluies et donc des pertes de sol si l'on ne prend aucune mesure de conservation.

2.4.1 [Recommandations et mesures d'adaptation.](#)

Demande en eau domestique

La demande en eau domestique est actuellement loin d'être couverte mais cela est dû à un déficit d'infrastructures (74% de raccordement au réseau d'eau potable en fin 2018, et qui se comble peu à peu, notamment grâce aux projets en cours) et non pas à un déficit de la ressource en eau en tant que telle (la ressource en eau souterraine peut couvrir le besoin en eau de la population future, vu sa

densité faible (22 000 habitants selon le recensement de 2014) et le taux de croissance négatif à cause de l'exode rural).

Il faudra néanmoins, dans le cadre de la nécessaire adaptation au changement climatique, contenir cette demande dans des limites rationnelles en promouvant activement les mesures d'économie d'eau (toilettes sèches, incitations à l'économie via le contrôle de la tarification de l'eau domestique, la sensibilisation des populations, etc.), la mobilisation des eaux superficielles et recharge de la nappe par des seuils, et petits barrages collinaires ou perméables, et par la préservation de sa qualité par l'instauration des périmètres de protections des forages, la gestion des déchets solides, la collecte et le traitement des eaux usées...

Production agricole.

L'autre consommateur de l'eau qu'est le secteur agricole, connaît des déficits dans les zones très dépendantes à la pluviométrie, la pression sur la demande future en eau agricole sera fortement accentuée suite au changement climatique, de ce fait, il est nécessaire de prendre les mesures d'adaptation adéquates pour assurer cette demande.

La mobilisation des ressources en eaux non conventionnelles pour des fins agricoles peut être envisagée soit par la collecte des eaux pluviales à petite échelle (la restauration et le renouvellement des Metfia) soit par la réutilisation des eaux usées, chose qui reste encore très limitée vu que la quasi-totalité des douars ne possède pas un réseau d'assainissement.

L'approvisionnement en eaux d'irrigation durant les crues de l'oued se fait d'abord par dérivation des eaux de crues par des seuils de dérivation, ces eaux sont ensuite acheminées à travers des Séguias d'irrigation, ces ouvrages de dérivation subissent généralement des dégâts d'envasement suite aux fortes crues, ce qui entraîne la diminution de leur capacité de rétention, le curage et l'entretien régulier de ces ouvrages est donc une opération nécessaire.



Figure 32 : Canal d'irrigation de Tidriouine détérioré



Figure 31 : Seuil de dérivation des crues de l'oued Imounarim envasé

Les méthodes d'irrigation traditionnelle laissent perdre l'eau par infiltration et par évaporation et présente une grande fragilité face aux crues torrentielles très fréquentes dans la région. La généralisation de l'irrigation localisée pour les petites exploitations agricoles de la vallée s'avère nécessaire pour une bonne gouvernance des ressources en eau, néanmoins elle nécessite d'autres mesures d'accompagnement pour être plus efficace :

- Encouragement des agriculteurs à l'adoption de cultures moins consommatrices d'eau ;
- L'instauration des quotas dans les volumes d'eau consommés ;
- L'installation de compteurs au niveau des puits pour contrôler la consommation ;
- La mise en place d'un système de facturation de l'eau agricole.

Protection contre les inondations

Il est nécessaire de préconiser des mesures de protection des berges (Diguettes de protection, aménagement des cours d'eau...), et des seuils filtrants pour ralentir les écoulements et aider à la recharge de la nappe. L'implantation de telles infrastructures fait partie des « mesures sans regret » - c'est à dire qu'elles ne peuvent avoir que des effets positifs, qu'il y ait ou non des modifications de comportement des cours d'eau dues au changement climatique.

CHAPITRE 4

SIMULATION HYDRAULIQUE ET ETABLISSEMENT DES CARTES DES ZONES INONDABLE

1. Introduction

Le changement climatique, avec une augmentation possible des évènements extrêmes, peut être assimilé à un risque climatique. À ce titre, il force à questionner la politique de prévention des risques naturels et notamment les risques d'inondation. A la fin du mois de février 2018 dans le bassin de Souss, la pluviométrie avait été évaluée à 150 mm, étalée sur 10 jours, en novembre 2014 la pluviométrie avait été évaluée à 150 mm étalée sur trois jours, en 2010 a eu lieu une crue dont la période de retour a été évaluée à 114 ans (*source ABHSM*), les crues rares semblent devenir de plus en plus fréquentes et provoquent des dégâts de plus en plus graves. Et dans un contexte du réchauffement climatique ces inondation ne peuvent que gagner en intensité en multipliant les dégâts.

Qu'une région au climat aride comme Arghen subit de temps à autre des inondations, ce n'est guère un paradoxe. En effet l'aridité favorise l'apparition des crues violentes, car l'absence de couverture végétale et le type du sol soutient le ruissellement au détriment de l'infiltration.

Afin d'assurer une gestion intégrée et efficace de ces inondations, il est d'abord nécessaire de comprendre ce phénomène et ces conséquences. À cet effet, la cartographie est un élément incontournable qui, en illustrant le risque, offre un outil pour la sensibilisation, la planification du territoire et le soutien à la prise de décision et à l'action.

L'objectif de cette étude est donc de vérifier la capacité hydraulique d'oued Arghen et déterminer les zones de débordement pour des crues de différentes périodes de retour afin d'établir la carte des zones inondables.

L'étude hydraulique a été réalisée par la construction d'un modèle hydraulique d'oued Arghen en se basant sur les paramètres qui déterminent le comportement hydraulique du cours d'eau. Les modélisations hydrauliques effectuées ont permis de délimiter les zones inondables en période de



Figure 33: Inondation de l'Oued Souss en Novembre 2014 au niveau de Taroudant

crues.

2. Zone d'étude

Sur la route en direction de **Taroudant** vers **Maguenoun**, entre **Tagant** et le douar de **Tigharghart** dans la commune d'**Arazane**, quatre ouvrages de franchissements sur la route provinciale P1712 ont été détruit par la crue 2014 (Fig. 41), vu l'importance stratégique de cette route, l'agriculture développé sur les berges de l'oued, et son exposition au risque d'inondation, ce tronçon de l'oued



fera l'objet de notre étude.

3. Construction du modèle

3.1 Présentation des outils informatique utilisé

HEC-RAS est un logiciel intégré pour l'analyse hydraulique qui permet de simuler les écoulements à surface libre. Il a été conçu par le Hydrologic Engineering Center de l'U.S Army Corps of Engineers. Il



Figure 34 : Photographies des ouvrages de franchissements détruits sur la route en direction de Maguenoun

s'agit d'une nouvelle version d'un modèle hydraulique auparavant nommé HEC-2, qui comporte maintenant une interface graphique permettant d'éditer, modifier et visualiser les données d'entrée, de même qu'observer les résultats obtenus. La version 3.1.1 de HEC-RAS permet de simuler les écoulements permanents et non permanents, le transport de sédiments et certaines fonctions facilitant la conception d'ouvrages hydrauliques

En plus du code HEC-RAS, on a utilisé le logiciel d'information géographique ARCGIS, les échanges entre les deux programmes étant assurées par l'extension HEC GeoRAS développée aussi par HEC, et dédiée à fonctionner sous ARCGIS.

Le tout forme donc un dispositif informatique cohérent qui permet dans un premier temps de préparer les données géométriques requises (preprocessing), de faire ensuite les calculs nécessaires (simulation), et d'exploiter enfin les résultats (postprocessing).

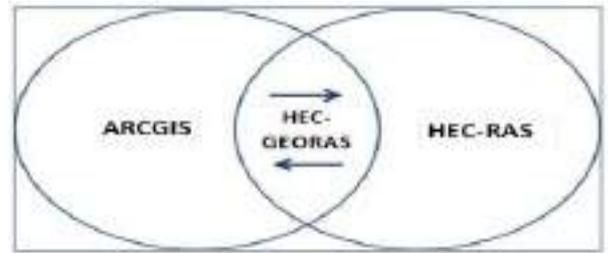


Figure 35: représentation schématique du dispositif informatique utilisé

3.2 Données et paramètres nécessaires à l'application du modèle HEC RAS

3.2.1 Les données de la topographie

Les données topographiques sont indispensables à la réalisation de la présente étude. C'est grâce à ces données qu'il est possible d'intégrer la géométrie de l'oued dans le modèle.

La réalisation d'une simulation hydraulique nécessite la disponibilité de données topographiques ou altitudinales d'une résolution acceptable, plus on dispose de documents et d'informations sur la topographie, plus nos profils seront représentatifs de la géométrie réelle de la section de l'oued. Toutefois, la fiabilité des résultats dépend aussi bien de la qualité de ces documents topographiques (échelle, résolution, etc.) que de leur manipulation et exploitation.

La base de données utilisée dans le cas de la présente étude provient d'un modèle numérique de terrain extrait du SRTM du Maroc dont la résolution est de 30 m.

A l'aide de l'extension HEC GeoRAS du logiciel ArcGIS, on a pu établir une série de sections en travers le long du tronçon étudié (Fig.36)

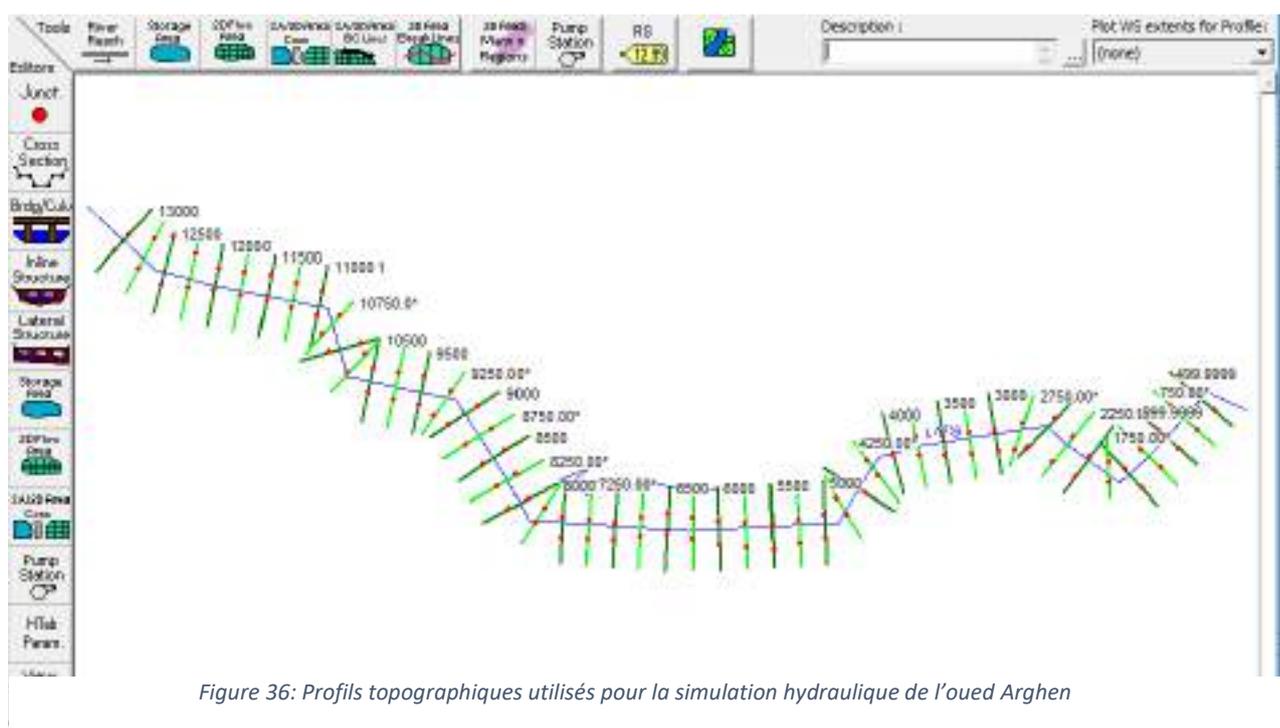


Figure 36: Profils topographiques utilisés pour la simulation hydraulique de l'oued Arghen

3.2.2 Coefficient de Manning

Le coefficient de Manning est un paramètre qui représente la rugosité de la surface du lit de l'oued.

Pour notre zone d'étude, le lit de l'Oued est composé principalement d'alluvion, les berges quant à eux, contiennent une végétation un peu dense. Pour ce on a attribué une valeur de 0.05 au coefficient de Manning du lit mineur, et une valeur de 0.045 au berge droite et gauche. (Annexe.)

3.2.3 Les débits de crues pour différentes périodes de retour et les conditions aux limites

Dans le cadre de la présente étude, on s'intéresse uniquement à l'étendue des lames d'eau générées par les débits de pointe, sans prêter attention à la durée des crues ni aux volumes d'eaux qui en résultent. De ce fait la modélisation sera faite en régime permanent en considérant le débit de pointe.

Le modèle est encadré par deux conditions aux limites amont et aval définies comme étant les plans d'eau correspondant à une pente hydraulique égale à la pente du lit de l'oued.

Les débits retenus pour l'oued Arghen pour différentes périodes de retour sont indiqués dans le tableau suivant.

Table 30 : Les débits retenus pour l'oued Arghen pour différentes périodes de retour en m³/s.

Q(10)	Q(50)	Q(100)	Q(500)
455.84	652.97	892.66	1079.83

3.3 Etapes d'élaboration du modèle

Dans un premier temps, il faut élaborer le fichier de la géométrie au niveau d'ArcMap à l'aide de l'extension HEC-GeoRAS, ensuite l'exporter vers HEC RAS et le compléter, puis élaborer le fichier d'écoulement tout en introduisant les conditions aux limites, sans oublier enfin de lancer des tests afin de pouvoir corriger les dysfonctionnements et ajuster le modèle.

3.4 Présentation des résultats de la simulation hydraulique

Différentes formes de restitution des résultats sont disponibles sur le logiciel HEC-RAS, sous forme des tableaux récapitulant l'ensemble des données entrées et des paramètres hydrauliques issus de la simulation au niveau de chaque point (cross section) du tronçon étudié, ainsi que des résultats graphiques tel que le profil en long, les profils en travers, courbe de tarage, répartition des vitesses ...

La figure ci-dessous montre le profil en long d'une partie du tronçon étudié pour chaque période de

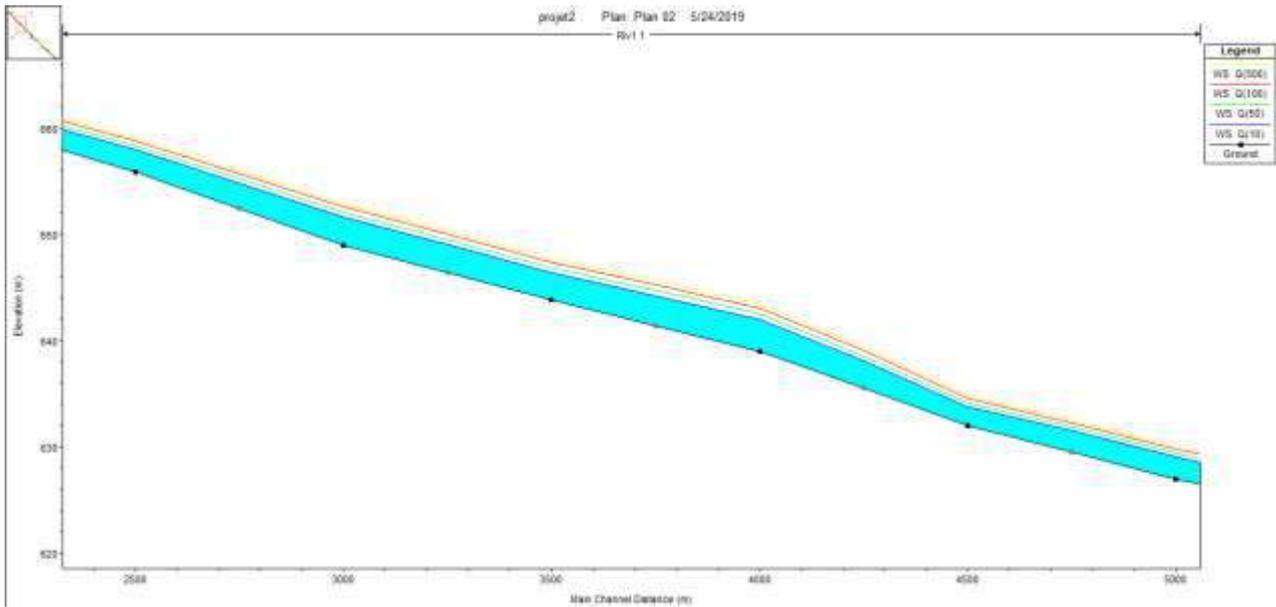


Figure 37: Profil en long de l'oued Arghen montrant la côte d'eau pour différentes périodes de retour.

retour.

La différence entre les altitudes des plans d'eau pour différentes périodes de retour ne dépasse pas 1.47m atteinte à la section numéro 4500, avec une altitude de 641.99m pour Q10, 642.53 pour Q50, 643.08m pour Q100 et 643.46m pour Q500.

La figure ci-dessous montrent un exemple des deux profils en travers en amont et en aval.

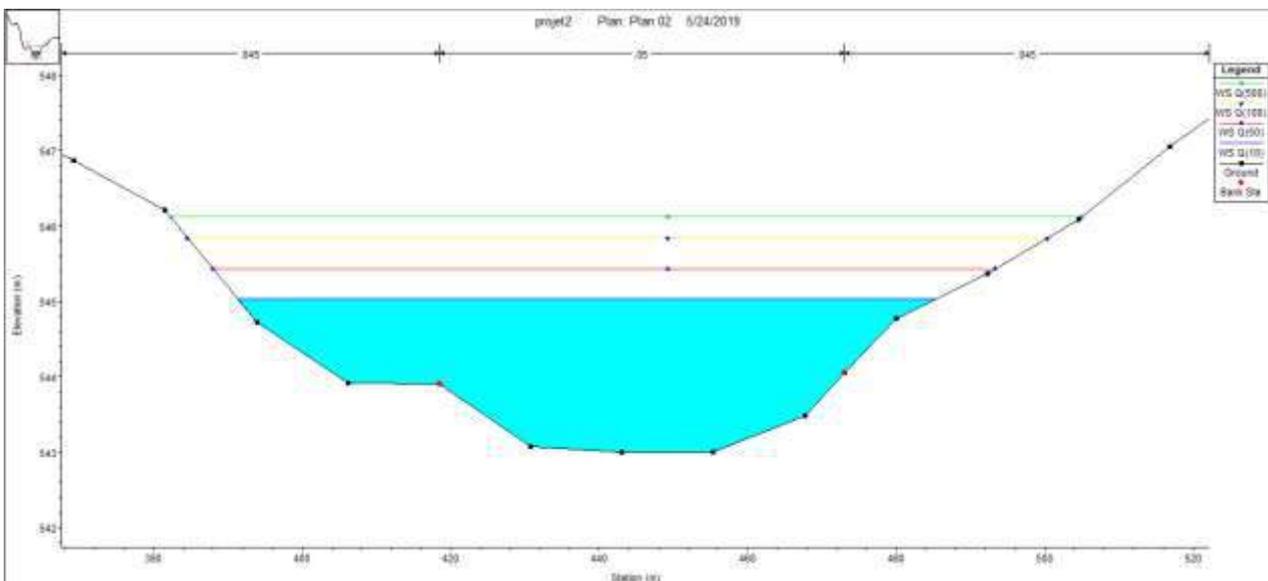


Figure 38 : Section transversale en aval du tronçon étudié montrant le plan d'eau pour différentes périodes de retour.

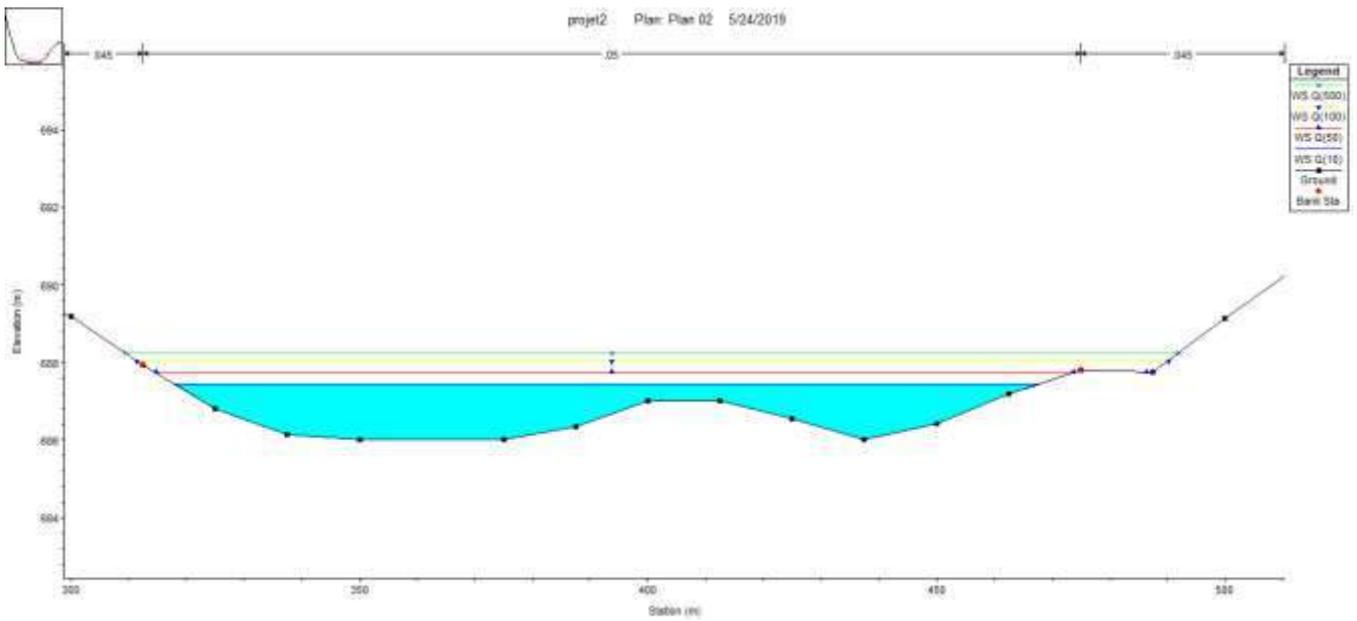


Figure 39: Section transversale en amont du tronçon étudié montrant le plan d'eau pour différentes périodes de retour.

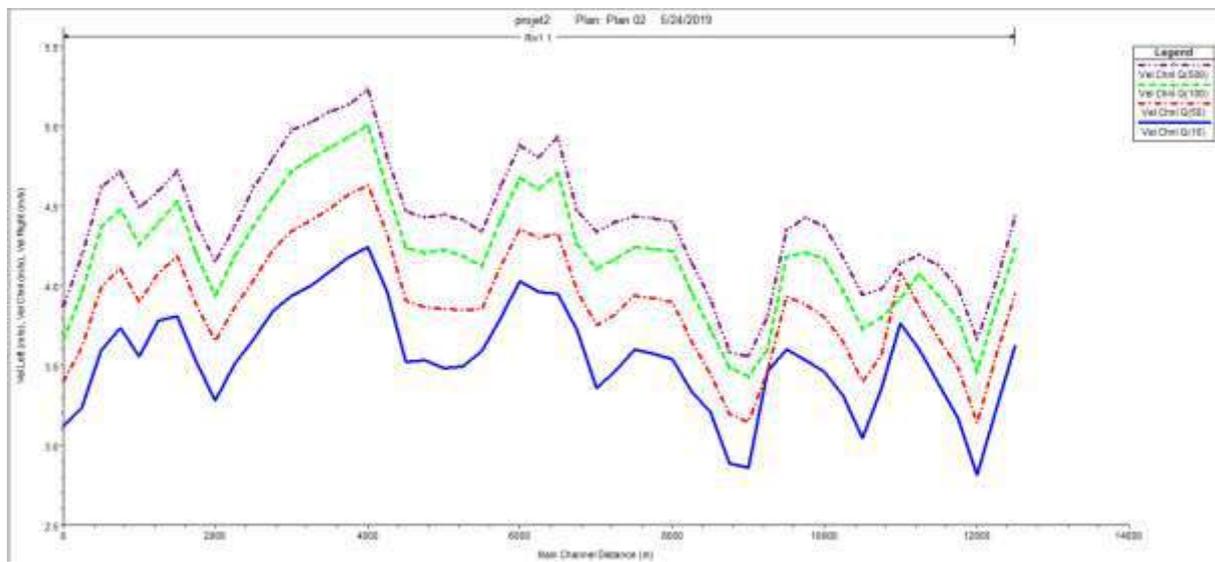


Figure 40: Vitesse d'écoulement en fonction des débits le long du tronçon étudié

La vitesse moyenne de l'écoulement présente une moyenne de 3.55m/s pour Q10, 3.88m/s pour Q50, 4.19m/s pour Q100 et 4.39m/s pour Q500.

La figure ci-dessous montre la vitesse moyenne de l'écoulement le long du tronçon étudié.

3.5 Cartes des zones inondables

L'intégration des différents paramètres de calcul dans le logiciel HEC-RAS nous a permis de simuler l'étendue des crues qui correspondent aux périodes de retour de 10, 50, 100 et 500 ans.

Les figures ci-dessous montre, selon la présente étude, les sites qui sont exposés au risque d'inondation le long du tronçon étudié.

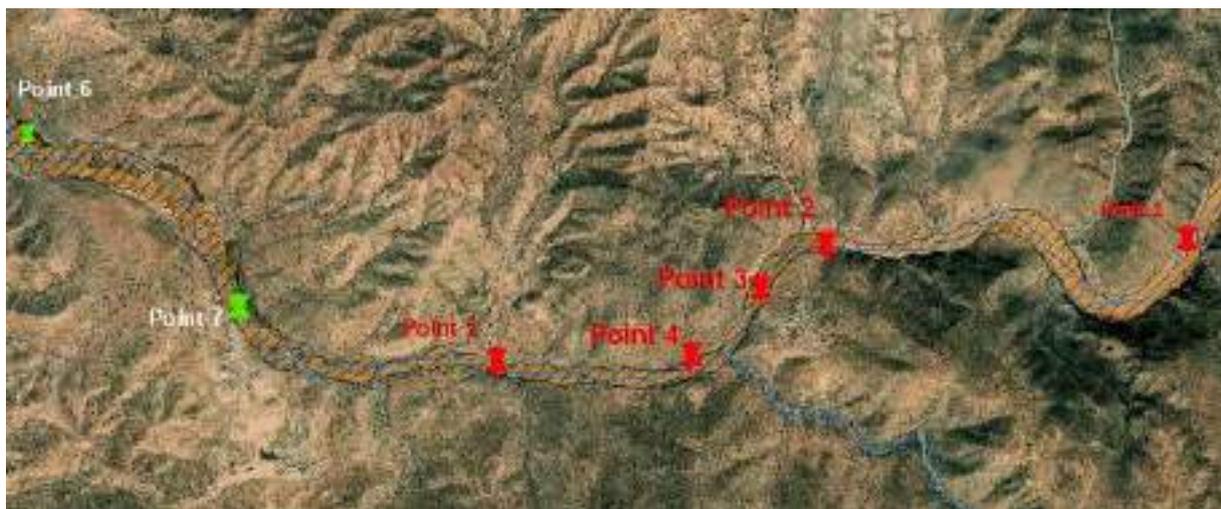
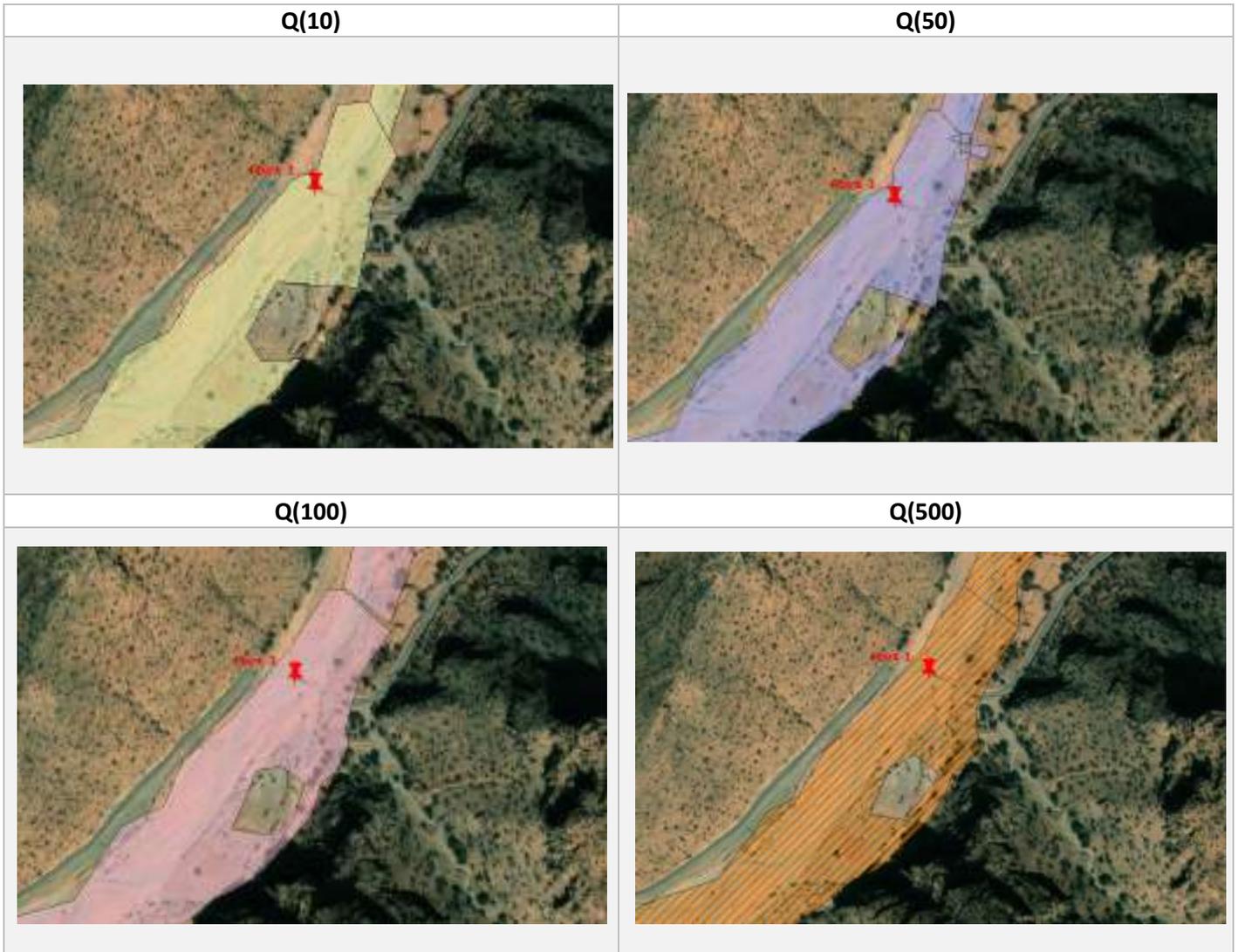


Figure 41: les points identifiés à risque d'inondation

Table 31: Coordonnées des points noirs identifiés.

	Site	WGS84 (GPS)	
		Long	Lat
Point 1 : Tigharghert	Ouvrage de franchissement	-8.47240451	30.422606
Point 2 : Ben Ali	Ouvrage de franchissement	-8.49664332	30.422724
Point 3 : Ben Ali	Ouvrage de franchissement	-8.50184713	30.419949
Point 4 : Ouahliba	Zone agricole	-8.50711941	30.415402
Point 5 : Entre Ouhliba et Tagante	Ouvrage de franchissement	-8.51985506	30.415639
Point 6 : Tagante	Zone agricole	-8.53717827	30.419536
Point 7 : Tagante	Zone agricole	-8.55151534	30.429399

❖ Point 1 : Ouvrage de franchissement avant le douar de Tigharghert

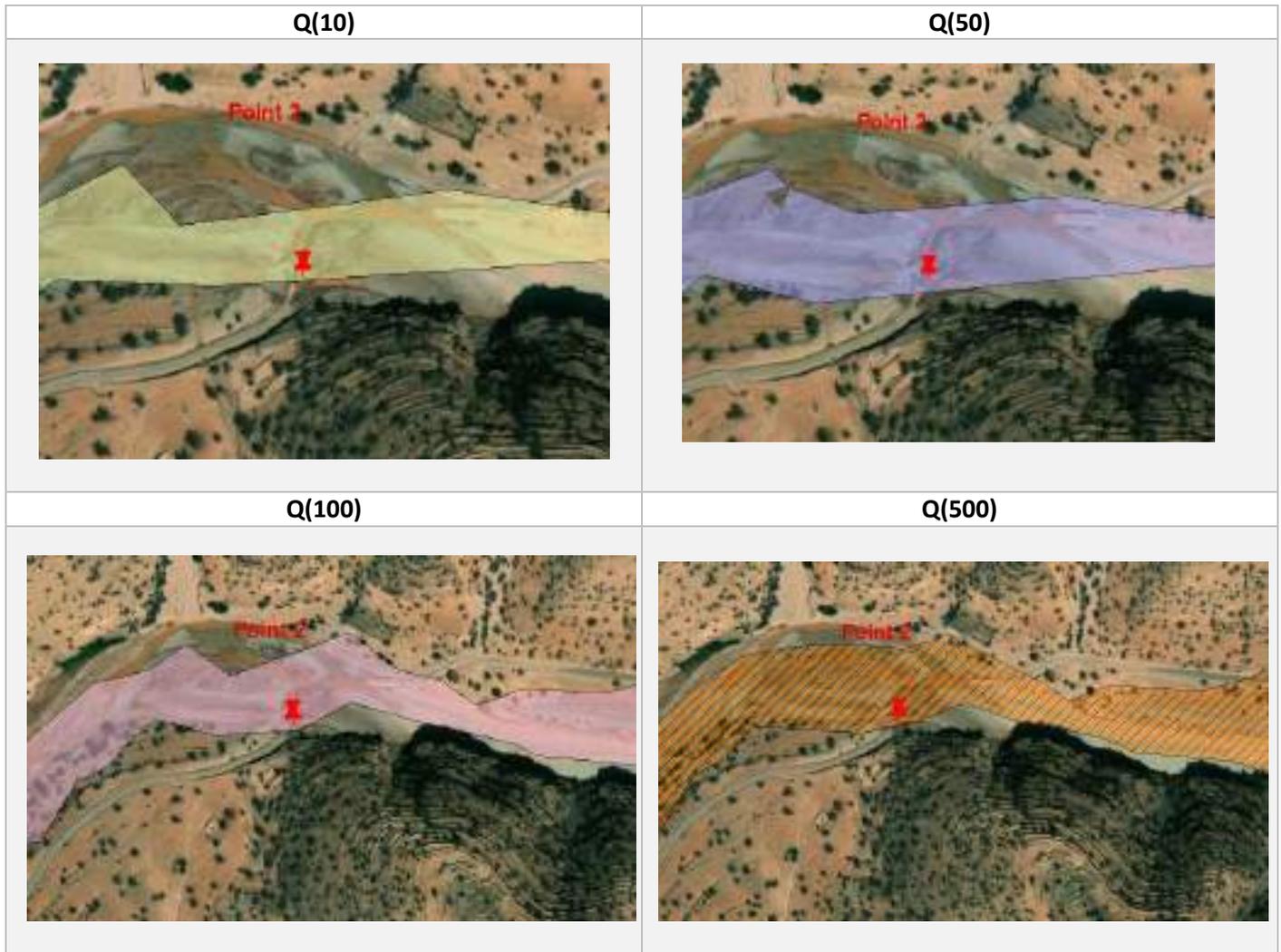


Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de l'écoulement à ce point pour les quatre profils (Altitude du lit mineur, altitude du plan d'eau, hauteur d'eau, vitesse d'écoulement, surface mouillée, largeur du plan d'eau).

Table 32 : Caractéristiques de l'écoulement au point 1

	Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
Profil	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
Q10	455.84	683	684.69	1.69	3.24	140.62	130.44
Q50	652.97	683	684.99	1.99	3.62	180.32	136.03
Q100	892.66	683	685.31	2.31	3.97	225.01	142.06
Q500	1079.83	683	685.53	2.53	4.2	257.41	145.71

❖ Point 2 : Ouvrage de franchissement après le douar Ben Ali

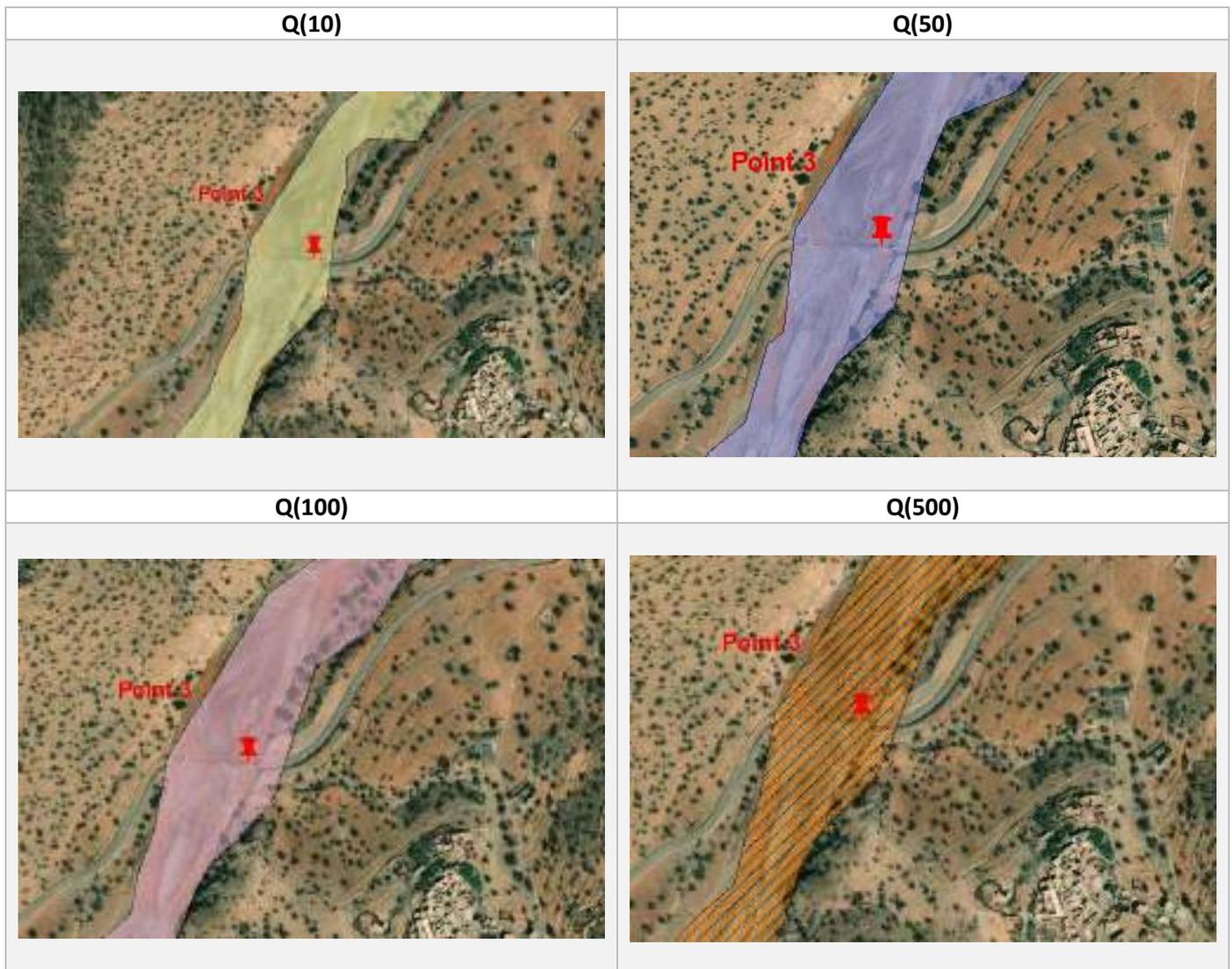


Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de l'écoulement à ce point pour les quatre profils.

Table 33 : Caractéristiques de l'écoulement au point 2

	Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
Profil	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
Q10	455.84	645.89	648.51	2.62	4.02	113.28	69.01
Q50	652.97	645.89	648.98	3.09	4.43	147.32	74.69
Q100	892.66	645.89	649.48	3.59	4.81	185.48	79.73
Q500	1079.83	645.89	649.83	3.94	5.03	214.47	83.44

❖ Point 3 : Ouvrage de franchissement devant le douar de ben Ali

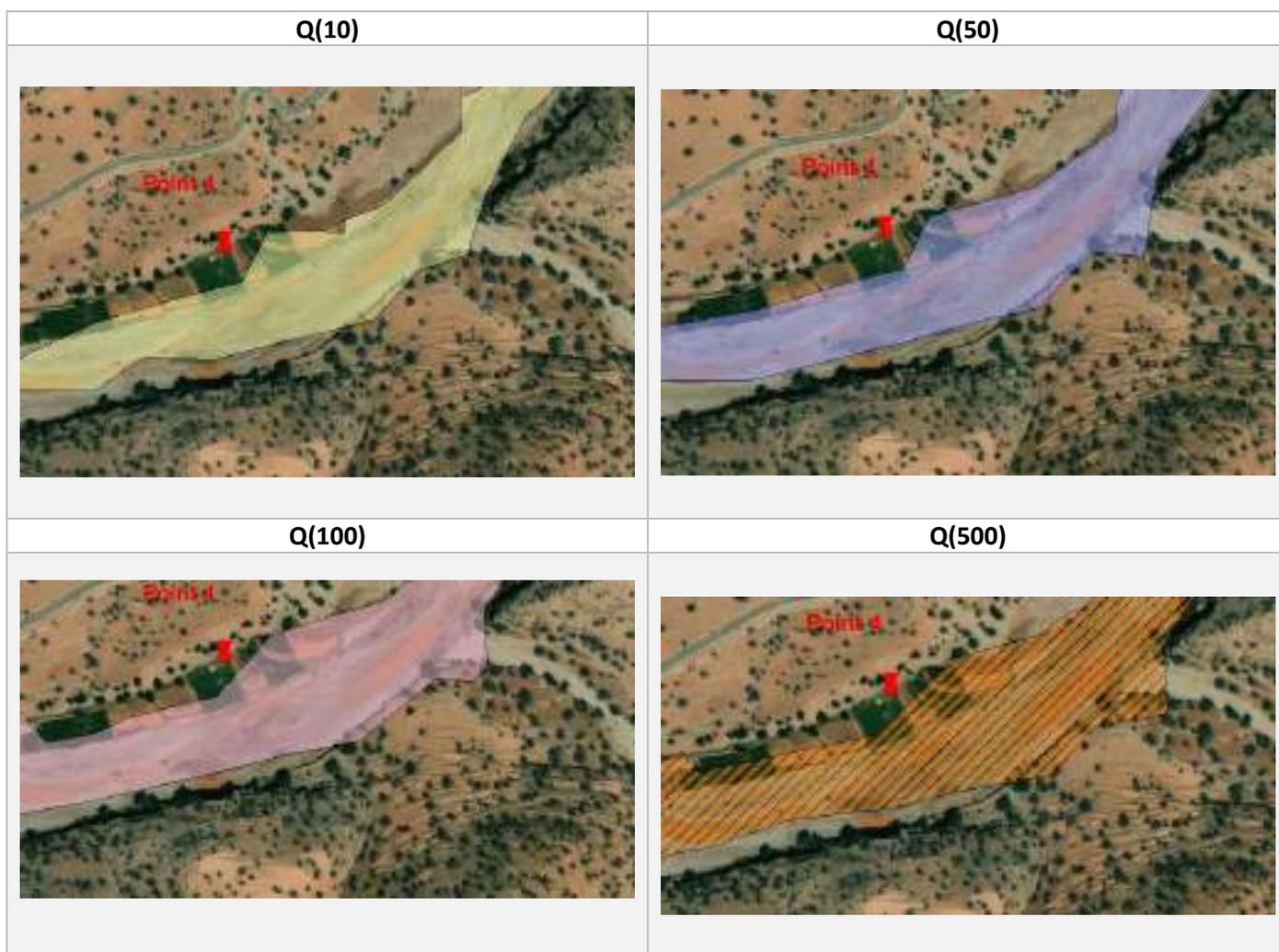


Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de l'écoulement à ce point pour les quatre profils.

Table 34 : Caractéristiques de l'écoulement au point 3

	Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
Profil	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
Q10	455.84	639.96	642.88	2.92	4.22	108.05	59.92
Q50	652.97	639.96	643.41	3.45	4.61	141.51	65.82
Q100	892.66	639.96	643.96	4	4.98	179.22	71.57
Q500	1079.83	639.96	644.34	4.38	5.21	207.18	75.55

❖ Zone 4 : zone agricole de Ouahliba



Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques moyennes de l'écoulement à ce point pour les quatre profils. (la moyenne des caractéristiques sur 5 sections transversales séparés de 100m le long de ce périmètre, les détails pour chaque section sont mentionnés en annexe)

	Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
Profil	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
Q10	455.84	630.00	631.98	1.98	3.52	129.38	102.57
Q50	652.97	630.00	632.35	2.35	3.88	168.00	109.89
Q100	892.66	630.00	632.73	2.73	4.23	211.12	116.86
Q500	1079.83	630.00	632.99	2.99	4.45	242.72	121.21

Table 35: Caractéristiques moyennes de l'écoulement dans la zone 4

❖ Point 5 : Ouvrage de franchissement entre Ouahliba et Tagante



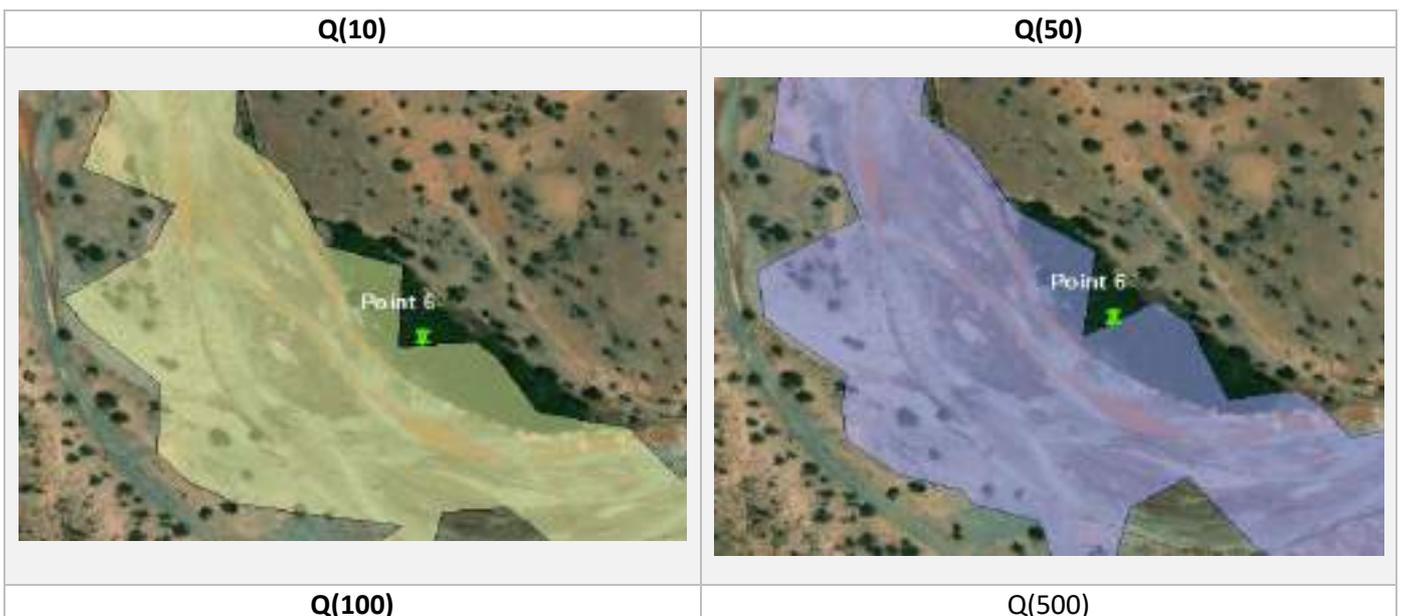
Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques de l'écoulement à ce point pour les quatre profils.



Table 36 : Caractéristiques de l'écoulement au point 5

	Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
Profil	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
Q10	455.84	618.2	620.45	2.25	3.84	118.63	79.05
Q50	652.97	618.2	620.9	2.7	4.17	156.51	88.28
Q100	892.66	618.2	621.36	3.16	4.48	199.35	97.98
Q500	1079.83	618.2	621.67	3.47	4.68	230.9	104.09

❖ Zone 6 : zone agricole de Tagante





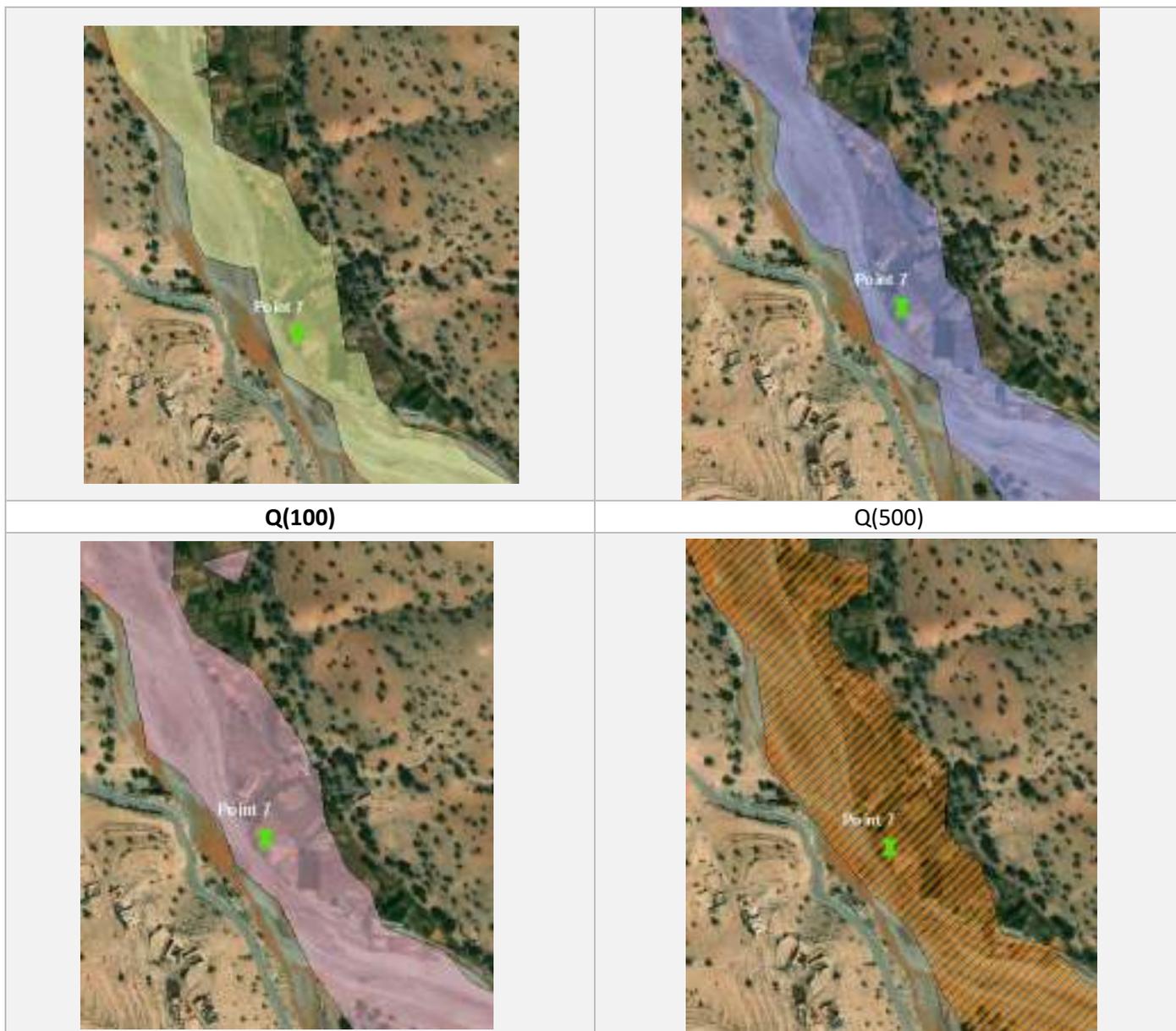
Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques moyennes de l'écoulement à ce point pour les quatre profils. (La moyenne des caractéristiques sur 10 sections transversales séparées de 50 m le long de ce périmètre, les détails pour chaque section sont mentionnés en annexe)

Table 37: Caractéristiques moyennes de l'écoulement dans la zone 6

	Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
Profil	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
Q10	455.84	574.16	576.27	2.10	3.55	128.31	101.35
Q50	652.97	574.16	576.64	2.48	3.91	167.24	109.52
Q100	892.66	574.16	577.02	2.86	4.22	211.55	118.39
Q500	1079.83	574.16	577.29	3.13	4.41	244.62	124.94

❖ **Zone 7 : zone agricole de Tagante**

Q(10)	Q(50)
--------------	--------------



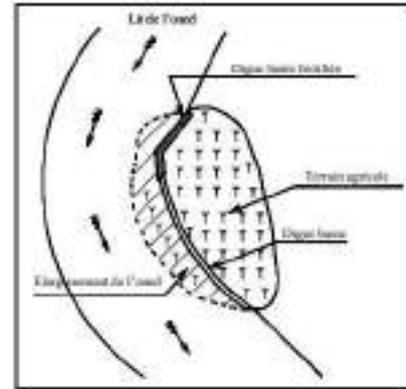
Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques moyennes de l'écoulement à ce point pour les quatre profils. (La moyenne des caractéristiques sur 11 sections transversales séparées de 50 m le long de ce périmètre, les détails pour chaque section sont mentionnés en annexe)

Table 38 : Caractéristiques moyennes de l'écoulement dans la zone 7

	Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
Profil	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
Q10	455.84	596.91	598.95	2.04	3.57	127.60	98.73
Q50	652.97	596.91	599.33	2.42	3.91	166.95	107.50
Q100	892.66	596.91	599.73	2.82	4.21	211.84	117.30
Q500	1079.83	596.91	600.01	3.09	4.40	245.29	124.51

3.6 Remarques et recommandations

Pour la protection des terrains agricoles aux bords de l'oued on peut prévoir des digues en amont (des seuils qui permettent la réduction des vitesses d'écoulement, le stockage et le laminage des crues à l'amont des zones menacées), on peut aussi prévoir des digues basses aux alentours des terrains agricoles comme montré sur la figure à côté. Quoique ces zones doivent être utilisées avec restriction (Interdiction de la construction, avec possibilité d'exploitation agricole).



Pour les ouvrages de franchissement, le choix du type d'ouvrage à réaliser (pont, dalots, buses...) doit tenir compte de plusieurs facteurs tels que la topographie du terrain, le débit à évacuer, l'aspect sécurité, les contraintes techniques, économiques ... Le choix du débit de projet doit être bien pensé afin d'assurer la durabilité et la pérennité de l'ouvrage. La protection des berges est également nécessaire au voisinage de ces ouvrages afin de maintenir la stabilité des terres contre les glissements de terrain.

4. Conclusion

L'exploitation des débits de pointe obtenus dans une étude hydraulique permet de décrire la propagation des crues dans les tronçons concernés sous différents aspects : hauteur, débit, vitesse... ces informations constituent la base de la délimitation des zones menacées par le risque d'inondation. La phase suivante consiste à valider ces résultats par des visites de terrains (témoignage des villageois, comparaison des dégâts observés avec les résultats de la simulation...) pour finalement prendre les mesures adéquates pour la protection des douars et de leurs cultures en terrasses avoisinantes contre les débordements lors des crues.

CONCLUSION GENERALE

Le bassin d'Arghen est caractérisé par un climat aride et un régime de précipitation très variable. L'ensemble des débits de l'oued Arghen et ses effluents s'écoule sous forme de crue violente et courte, les inondations constituent dans ce contexte un risque climatique majeur, la région d'Arghen est de ce fait très vulnérable aux changements climatiques. En plus de cette pression climatique, la pression anthropique sur les ressources en eau ne cesse de croître. Il paraît donc important d'étudier la variabilité climatique de la région, mais aussi de connaître son impact ainsi que celui de la population sur les ressources en eau.

Afin de mieux comprendre le contexte climatique et hydrologique du bassin d'Arghen ainsi que le régime hydraulique de l'Oued Arghen, on a commencé par une étude hydrologique du bassin, ce dernier est caractérisé par un relief fort, un temps de concentration de 27.81h et une pluviométrie moyenne de 235mm/an qu'on a calculé à partir des données pluviométriques historiques (1971-2017) des deux stations Taroudant Pont et Immerguen.

La quantification des ressources hydrique est très délicate, puisque l'information est rare ou inexistante, et, les méthodes utilisées en absence de données sur l'hydrologie et l'hydrogéologie de la région, ne reflètent pas la réalité de la ressource, mais essaye seulement de l'approcher. Du coup pour le calcul des débits de pointes des crues de fréquences rares, on a utilisé les formules empiriques, ainsi que les méthodes de transposition en se basant sur les données des débits du bassin d'Immerguen.

Pour évaluer le changement climatique dans la vallée de l'Arghen on a utilisé deux approches, la première approche se base sur les projections à grande échelle extraites du portail CCKP développé par la banque mondiale, la deuxième approche est une descente d'échelle statistique basée sur les données issus du rapport de « l'étude d'impact du changement climatique sur la ressource en eau dans la région de Souss Massa » pour les deux stations Immerguen et Taroudant Pont et interpolées pour la vallée de l'Arghen. La deuxième méthode reste plus précise puisqu'elle présente des résultats à une échelle réduite de 25kx25Km et se base sur les données observées pour le choix du MCG à utiliser.

Les résultats des projections montrent une tendance à la baisse de la pluviométrie annuelle et des précipitations maximales selon le scénario RCP8.5 pour tous les horizons, et une légère augmentation du maximum de précipitation pour le scénario 4.5, mais elles restent inférieures de 22.1% par rapport aux précipitations historiques (1961-1990).

D'autre part, on observe une tendance à la hausse significative de la température, particulièrement les températures maximales d'été et la température minimales d'hiver. Toutefois, cette tendance à l'assèchement du climat régional, accompagnée d'une réduction pluviométrique confirme le réchauffement prévu par les projections, et peut, par conséquent, engendrer un stress hydrique et une pression de plus en plus accentuée sur la ressource en eau, une diminution des rendements agricoles et un accroissement des risques d'inondations. D'où la nécessité d'instaurer une stratégie régionale pour la gestion des risques liés à la variabilité climatique.

En absence de toutes données hydrographiques dans la région d'Arghen pour calibrer un modèle pluie-débit, on a pu étudier l'impact du changement climatique sur les régimes d'écoulements. L'étude présentée dans le dernier chapitre, basée sur les données du climat actuel, nous a permis

d'établir les cartes des zones inondables sur le tronçon de l'Oued Arghen qui s'étend sur 13Km entre Tagant et le douar de Tigharghart dans la commune d'Arazane, en utilisant les débits calculé dans le deuxième chapitre, les visites de terrain nous ont permis d'identifier 4 ouvrages de franchissements complètement détruits sur la route provinciale 1712, la simulation hydraulique nous a aider à déterminer les caractéristiques de l'écoulements dans ces points pour plusieurs périodes de retour, ces résultats constitue des données de base pour le redimensionnement de ces ouvrages, elle nous a permis aussi d'identifié 3 zones agricoles à risques d'inondations et extraire les données moyennes d'écoulements auprès de ces zones.

Annexe 1 : Résultats des projections climatiques pour les deux stations Taroudant Pont et Immerguen (Source ABHSM).

Historique (1961-1900)																
Année	Pa		Pjmax		Tmax ST Pont Taroudant			Tmin ST Pont Taroudant			Tmax ST Pont Taroudant			Tmin ST Pont Taroudant		
	Immerguen	P.Taroudant	Immerguen	P.Taroudant	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min
1961	351.19	277.24	55.38	27.91	24.23	36.38	13.79	12.91	24.69	3.93	22.96	38.58	10.2	9.65	22.67	-1.25
1962	346.83	307.5	25.52	48.46	23.89	37.5	11.55	12.69	24.95	2.47	22.7	38.09	7.35	9.63	22.99	-2.53
1963	207.29	206.47	26.31	32.33	23.95	36.22	14.53	12.55	22.93	4.18	22.87	37.59	10.5	9.44	21.47	-0.41
1964	238.14	304.18	26.96	38.14	24.57	37.78	12.31	13.24	24.7	2.24	23.44	38.68	8.61	10.06	23.12	-3.14
1965	347.61	257.17	57.43	21.98	24.08	34.87	13.05	13.23	23.24	2.39	22.72	36.57	9.75	10	21.86	-2.49
1966	285.1	291.02	28.78	80.28	23.71	33.89	11.99	12.33	21.96	1.47	22.46	36.18	8.33	9.06	21.36	-3.4
1967	299.14	292.59	39.65	33.87	23.47	37.39	11.35	12.22	26.82	2.22	22.18	37.17	7.78	9	23.21	-2.52
1968	95.84	85.66	8.79	14.03	23.6	36.32	13.26	11.99	23.47	2.11	22.48	37.32	9.77	8.76	23.1	-3.18
1969	279.13	220.64	30.36	25.21	23.74	34.75	11.16	12.29	22.73	1.07	22.62	36.87	7.68	9.06	22.41	-3.69
1970	316.93	260.06	52.89	38.51	24.04	35.81	13.71	12.61	24.53	2.47	22.81	37.67	10.92	9.38	21.71	-2.18
1971	245.43	281.69	26.96	25.54	24.44	34.47	14.21	13.09	22.18	3.43	23.16	36.17	10.93	9.9	21.46	-1.83
1972	422.44	432.18	47.88	50.95	23.32	38.49	11.19	12.46	25.77	0.5	22.13	39.39	7.5	9.31	24.25	-3.59
1973	328.07	283.06	32.72	23.56	22.85	36.28	12.21	11.7	23.98	0.72	21.7	38.42	8.37	8.5	23.31	-3.59
1974	126.45	100.33	12.41	11.04	23.55	35.26	12.24	12.12	22.92	3.45	22.48	36.29	9.46	9.01	22.15	-1.27
1975	210.18	207.61	15.38	22.18	23.99	35.45	11.89	12.64	22.86	2.98	22.8	36.56	8.8	9.49	21.97	-1.99
1976	426.17	436.97	41.87	43.55	23.95	34.89	12.64	13.18	23.66	2.88	22.79	36.76	9.29	10.03	22.95	-1.41
1977	218.7	248.66	30.51	44.42	24.23	37.65	10.61	12.96	24.68	2.03	23.07	38.18	6.83	9.78	23.63	-2.66
1978	152.29	167.09	19.23	28.48	24.28	35.31	13.86	12.7	24.73	3.95	23.14	37.35	10.46	9.47	21.71	-1
1979	603.35	486.19	50.21	64.77	23.42	37.63	10.61	12.61	25.61	1.37	22.03	38.35	8.36	9.34	23.7	-3
1980	485.2	646.07	52.44	76.06	24.15	35.53	12.5	13.42	23.09	3.57	22.97	37.73	9.09	10.34	23.15	-1.02
1981	206.26	96.71	30.16	11.32	23.86	34.66	11.22	12.51	22.79	3.4	22.68	36.01	6.6	9.31	21.78	-1.33
1982	145.34	130.75	18.84	20.78	23.58	34.94	11.39	12.05	23.41	2.95	22.38	36.5	7.98	8.83	22.21	-1.92
1983	415.49	353.68	71.94	46.49	23.39	35.57	12.8	12.73	23.59	4.07	21.97	36.86	10.06	9.45	22.03	-0.89
1984	148.83	141.97	22.05	17.74	24.39	33.83	12.62	12.8	22.08	2.61	23.27	35.98	8.53	9.67	21.4	-2.04
1985	190.98	186.68	39.76	34.99	23.92	35.68	11.98	12.51	23.64	1.57	22.73	37.2	8.09	9.31	23.15	-3.6
1986	167.98	176.29	26.99	22.04	23.57	36.75	10.5	12.14	24.16	0.52	22.44	38.79	5.9	8.98	23.58	-3.55
1987	225.74	185.19	33.01	48.43	24.28	36.25	13.87	12.8	22.61	2.56	23.16	38.18	10.36	9.65	22.85	-1.76
1988	179.06	101.94	26.19	8.23	24.12	36.31	12.14	12.78	25.45	2.58	22.86	37.14	8.54	9.5	23.86	-2.5
1989	118.17	65.53	37.21	7.49	24.17	35.85	15.42	12.7	22.66	4.54	23.16	37.04	11.22	9.62	21.74	-0.32
1990	65.22	64.3	11.47	25.95	24.43	35.18	14.31	12.72	23.2	3.21	23.3	36.73	10.86	9.54	22.67	-1.44

Projections (2040-2069)								
Année	Précipitations annuelles				Précipitations journalières maximales			
	RCP 4.5		RCP 8.5		RCP 4.5		RCP 8.5	
	Immerguen	P.Taroudant	Immerguen	P.Taroudant	P.Taroudant	Immerguen	Immerguen	P.Taroudant
2040	151.64	150.65	28.46	21.57	17.6	13.01	4.63	4.16
2041	121.01	109	150.91	139.57	24.49	12.53	61.81	45.78
2042	121.9	84.18	175.34	140.55	21.23	26.9	43.35	16.6
2043	144.66	165.32	173.18	147.75	40.66	26	24.12	18.06
2044	231.71	231.06	292.81	291.19	39.37	36.55	21.4	43.7
2045	80.82	123.9	159.43	131.71	24.85	11.13	54.92	17.14
2046	105.45	91.76	132.18	97.78	13.47	14.79	18.88	25.28
2047	76.31	45.29	143.8	106.89	10.07	11.15	14.39	12.88
2048	158.34	141.68	102.52	93.63	22.58	16.4	25.11	25.78
2049	313.98	208.58	132.24	135.14	28.36	24.94	19.35	27.29
2050	202.18	245.21	189.08	158.97	37.06	25.76	39.03	40.88
2051	134.24	136.47	98.24	95.51	21.95	12.19	38.06	22.48
2052	213.7	139.34	156.32	101.9	25.88	49.25	45.78	12.73
2053	299.09	234.14	14.96	21.09	31.15	71.09	2.36	5.37
2054	89.36	53.6	93.5	108.76	8.52	17.39	8.99	15.49
2055	126.74	91.09	47.15	41.05	24.32	37.33	8.31	10.5
2056	172.22	131.67	245.04	276.79	13.88	19.43	26.86	26.93
2057	68.4	72.99	213.02	221.46	15.51	8.41	46.63	44.09
2058	262.18	334.82	291.57	218.97	59.59	37.52	38.24	24.58
2059	191.19	224.18	160.1	152.54	44.97	21.99	19.05	22.33
2060	154.68	123.97	194.45	119.87	19.46	18.35	55.62	21.07
2061	84.31	98.97	82.64	54.02	16.25	8.07	17.41	6.86
2062	222.99	248.68	135.93	112.25	35.6	29.12	55.19	27.16
2063	199.5	170.4	181.05	137.23	18.41	19.67	64.28	30.93
2064	128.45	99.4	59.98	69.95	12.24	20.91	8.95	15.05
2065	263.69	300.18	105.02	35.73	60.25	46.23	50.2	9.78
2066	287.93	259.65	56.31	47.99	29.45	19.57	4.94	6.63
2067	224.99	112.79	125.39	114.82	19.17	93.5	15.23	21.56
2068	88.47	65.25	39.2	25.13	6.12	9.69	6.52	3.81
2069	151.91	133.98	76.38	39.54	14.34	21.23	21.74	7.12

Projections (2070-2099)								
Précipitations annuelles					Précipitations journalières maximales			
RCP 4.5		RCP 8.5			RCP 4.5		RCP 8.5	
Année	Immerguen	P.Taroudant	Immerguen	P.Taroudant	Immerguen	P.Taroudant	Immerguen	P.Taroudant
2070	69.42	91.39	153.02	108.79	21.27	16.02	29.82	11.62
2071	104.4	87.18	28.84	32.01	12.45	21.65	2.93	4.52
2072	312.91	279.94	81.23	71.13	31.01	32.96	10.88	14.21
2073	153.59	59.82	277.34	173.18	65.27	7.58	104.52	35.64
2074	82.19	77.02	148.16	150.38	22.25	23.37	40.24	30.92
2075	27.77	28.49	118.59	176.43	3.42	4.19	22.58	58.51
2076	114.91	120.41	190.27	135.65	10.75	24.22	54.59	22.13
2077	113	63.04	243.45	215.81	25.86	12.17	46.81	50.62
2078	113.64	151.62	93.6	79.76	19.37	38.82	18.74	23.17
2079	294.35	249.04	71.94	116.77	58.41	35.77	11.52	34.61
2080	204.15	192.67	124.28	88.6	32.21	22.62	13.53	13.35
2081	75.92	66.61	67.6	62.18	15.68	7.54	7.4	10
2082	66.16	86.37	24.14	13.68	12.95	26.35	3.62	2.46
2083	120.35	125.13	61.63	37.85	28.12	26.77	6.73	5.88
2084	216.33	281.53	121.52	127.27	34.29	30.14	17.84	30.13
2085	211.44	191.55	138.17	135.33	11.36	13.11	17.76	11.07
2086	220.08	163.15	47.39	30.48	50.87	34.37	5.8	7.64
2087	60.54	55.79	160.16	131.43	17.19	25.02	27.69	16.27
2088	115.83	67.8	75.84	41.63	44.51	12.52	12.01	4.62
2089	221.86	176.68	66.32	68.87	36.55	28.97	8.24	9.01
2090	94.83	107.07	49.15	53.43	11.08	15.47	7.86	17.87
2091	217.38	157.94	68.67	74.42	58.27	56.61	29.43	17.89
2092	170.18	156.57	136.54	157.23	19.16	30.28	17.54	37.42
2093	78.11	76.17	240.46	248.18	13.05	11.72	43.31	46.99
2094	130.81	145.77	67.59	64.35	15.48	17.52	6.9	10.22
2095	195.34	300.93	79.91	53.42	30.12	71.49	16.8	9
2096	106.71	129.54	68.8	58.37	32.83	74.04	11.86	4.35
2097	34.91	59.91	74.59	56.84	13.6	29.28	14.32	12.09
2098	119.28	80.46	139.54	132.78	15.24	11.69	20.25	43.91
2099	91.62	73.97	104.61	106.19	18.99	9.37	20.94	26.93

Année	Tmax ST Immerguen						Tmin Immerguen					
	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min
2040	25.34	39.82	8.86	25.62	40.31	11.05	12.01	23.41	1.35	11.45	24.9	1.95
2041	25.16	40.03	10.59	25.05	38.77	10.53	11.09	25.41	1.74	11.61	24.05	3.02
2042	24.27	41.35	11.28	24.97	41.84	9.91	11.39	24.49	1.43	11.96	23.37	1.33
2043	24.39	42.09	8.68	25.22	40.93	10.85	11.62	25.86	-0.67	11.1	26.71	1.96
2044	24.8	40.13	8.64	25.13	40.56	10.32	11.07	24.74	-0.41	11.56	24.6	0.62
2045	25.04	40.21	11.12	25.29	41.27	14.17	11.51	25.01	-0.99	11.73	24.5	1.55
2046	24.62	38.45	10.26	25.74	40.38	14.25	11.39	23.49	-1.3	11.97	23.73	-0.87
2047	24.39	38.99	9.75	25.03	39.63	9.61	11.26	23.03	0.47	11.44	23.5	0.53
2048	24.18	39.53	12.71	24.15	39.51	10.15	11.51	23.32	1.89	11.64	24.2	0.72
2049	26.26	42.28	10.64	25.79	39.82	12.35	11.21	24.83	0.46	11.93	25.02	1.15
2050	25.17	39.1	12.16	25.42	41.62	11.62	11.77	22.75	2.72	11.91	25.35	0.03
2051	26.3	41.92	9.94	26.34	41.9	10.05	10.89	24.88	0.58	12.02	23.87	0.85
2052	25.09	40.25	11.43	26.57	41.51	14.06	11.22	23.94	1	12.08	26.1	1.08
2053	25.22	42.74	9.07	25.93	41.42	11.26	11.2	26.33	3.3	12.42	25.82	2.03
2054	24.96	39.73	11.94	26.16	40.96	11.72	11.48	24.51	2.23	12.43	25.08	1.74
2055	24.81	39.19	10.61	26.69	40.78	10.97	11.96	23.45	0.45	12.08	25.24	2.44
2056	25.36	41.62	11.28	26.4	41.52	11.58	11.4	24.91	1.43	12.07	26.65	2.47
2057	24.88	40.35	11.01	25.6	41.56	9.86	11.05	23.99	1.42	12.52	25.94	0.88
2058	25.02	42.16	9.22	26.09	42.07	9.9	11.33	26.35	1.56	11.89	27.62	0.81
2059	24.59	39.76	11	26.22	41.41	14.76	10.73	24.18	2.18	12.25	26.25	-0.08
2060	24.49	41.29	12.14	26.74	42.39	10.31	11.21	24.39	0.25	12.26	26.14	1.33
2061	25.25	40.65	9.15	26.31	41.36	11.85	11.02	24.34	1.66	12.81	25.77	0.02
2062	25.44	42.21	11.24	27	41.43	11.83	11.05	27.22	2.28	11.55	27.27	1.37
2063	25.49	40.11	8.03	26.66	41.39	12.48	11.91	23.84	0.1	12.33	26.12	2.42
2064	25.35	40.84	10.95	26.58	40.28	10.8	11.44	26.11	-0.06	12.89	25.29	3.78
2065	24.75	40.54	11.4	26.78	40.86	11.74	11.15	22.98	1.93	12.55	25.31	3.43
2066	25.88	38.91	11.74	27.61	43.78	10.83	11.43	24.75	1.1	13.01	26.19	2.04
2067	25.86	39.29	11.04	26.67	42.44	9.39	11.43	23.93	1.82	12.38	26.9	1.74
2068	25.17	39.66	8.89	27.44	43.92	12.26	11.39	23.16	1.39	12.5	26.84	2.28
2069	25.87	39.02	8.88	27.94	43.78	10.98	11.14	24.77	1.34	12.98	26.82	3.01

Année	Tmax ST Immerguez						Tmin ST Immerguez					
	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min
2070	25.66	42.42	8.26	27.12	42.37	11.68	11.7	26.29	-0.16	12.97	25.46	-0.6
2071	25.4	40.79	12.6	27.87	44.36	12.43	11.95	24.03	-1.68	12.81	26.6	3.4
2072	25.01	40.54	9	27.88	44.13	10.82	12.17	23.79	2.13	12.97	28.37	3.63
2073	24.94	40.32	9.02	27.39	43.15	14.46	10.71	23.6	1.98	13.23	25.7	4.7
2074	25.72	42.38	10.34	28.43	42.93	12.6	11.06	25.29	0.49	13.67	27.75	4.45
2075	25.67	42.69	11.67	28.38	44.42	14.46	11.01	27.23	0.59	13.62	27.99	2.13
2076	25.42	40.01	9.9	27.55	42.87	12.19	11.13	25	1.62	12.98	27.43	3.27
2077	25.36	40.24	10.26	27.16	42.52	12.96	11.25	24.32	2.95	13.41	26.61	4.13
2078	25.33	40.26	12.06	28.03	42.38	9.79	11.45	23.05	-0.27	14.02	27.22	4.07
2079	25.88	40.46	9.22	27.79	41.96	15.21	11.37	25.31	0.75	13.62	26.27	5.02
2080	25.83	40.6	12.58	28.12	42.02	12.1	10.76	25.1	1.41	13.98	27.12	3.84
2081	25.66	42.24	11.18	27.85	44.15	11.55	11.26	26.9	-0.38	14.53	27.95	4.9
2082	25.46	42.42	11.14	27.83	45.64	12.53	10.84	25.37	2.8	13.88	27.51	4.01
2083	25.42	41.23	11.37	27.83	45.18	12.4	10.57	24.13	-0.53	14.32	27.59	4.84
2084	25.78	40.62	13.54	27.79	42.96	12.67	11.4	23.97	1.63	14.46	28.06	4.64
2085	25.77	40.44	10.83	28.27	43.57	11.63	11.74	24.12	0.83	14.45	28.36	4.19
2086	25.6	41.71	9.98	28.77	43.16	13.21	11.28	24.88	0.68	13.88	27.88	2.35
2087	25.44	39.58	12.04	27.83	42.24	12.46	10.54	24.17	0.64	14.14	27.11	4.17
2088	25.78	41.09	10.15	29.21	44.45	13.36	11.43	25.33	2.27	14.46	27.14	6.19
2089	26.2	41.64	10.51	28.87	46.78	12.23	11.7	25.89	1.29	14.68	29.73	4.82
2090	26.21	41.01	11	28.73	44.05	12.27	11.04	24.95	1.98	14.13	28.19	4.15
2091	25.78	41.08	10.28	28.77	45.07	12.89	11.4	26.63	1.44	14.6	29.08	2.23
2092	25.4	40.97	9.83	29.56	45.39	16.01	11.67	25.44	0.82	14.39	29.36	3.85
2093	26.08	41.24	10.11	28.88	43.95	12.31	12.12	23.71	1.92	15.17	29.54	5.25
2094	26.43	40.51	10.67	28.84	45.67	15.09	11.91	24.84	-0.4	14.13	28.47	2.95
2095	25.51	40.2	11.72	28.8	44.55	15.94	12.4	25.47	1.98	15.36	25.98	4.6
2096	24.91	39.81	9.75	28.92	41.07	12.23	12.02	24.06	1.48	14.81	27.83	5.16
2097	25.68	40.5	11.4	29.01	45.85	13.85	11.24	24.88	2.21	14.69	28.21	3.92
2098	25.65	39.73	9.39	29.06	43.35	15.87	11.52	25.06	0.34	14.84	28.38	6.06
2099	25.91	42.8	12.13	30.12	46.35	14.63	12.08	26.39	0.16	15.23	29.23	5.59

Année	Tmax ST Pont Taroudant						Tmin ST Pont Taroudant					
	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min
2040	26.16	37.17	12.79	26.44	37	13.96	14.92	24.85	6.65	14.6	25.59	6.58
2041	26.15	39.29	13.32	25.81	36.61	14.44	14.1	27.19	6.84	14.69	24.89	7.26
2042	25.3	40.06	14.26	25.88	37.93	13.22	14.43	25.84	5.69	14.87	24.87	5.81
2043	25.4	40.29	12.84	26.12	39.52	14.38	14.62	25.81	4.43	14.04	27.38	6.67
2044	25.83	38.94	11.95	26.12	38.62	13.71	14.25	26.78	4.28	14.47	26.13	5.3
2045	25.94	39.8	14.45	26.09	38.8	16.93	14.54	26.58	3.79	14.65	24.3	6.33
2046	25.6	38.01	14.1	26.53	37.97	17.66	14.53	25.99	3.44	14.94	25.24	3.9
2047	25.46	38.27	13.69	26.09	37.3	13.88	14.45	25.34	5.01	14.41	24.2	4.86
2048	25.25	37.85	15.22	25.25	38.11	13.41	14.59	23.53	6.99	14.56	24.83	4.9
2049	27.05	40.66	14.47	26.62	38.42	15.01	14.32	26.03	4.57	14.77	26.02	6.17
2050	26.06	38.04	15.54	26.37	39.42	14.89	14.8	24.48	7.8	14.82	26.29	4.21
2051	27.07	38.94	12.9	27.24	38.94	15.02	13.95	26.44	5.37	14.87	25.03	5.41
2052	26.29	38.58	14.28	27.42	40.42	17.44	14.13	24.94	5.72	15	26.55	6.36
2053	26.18	40.33	12.72	26.89	40.46	14	14.24	26.33	8	15.36	28.11	7.09
2054	25.99	38.13	15.18	27.02	37.93	14.61	14.55	26.45	6.51	15.35	24.83	6.78
2055	25.75	37.34	14.36	27.61	38.88	13.76	14.85	24.8	5.33	15.05	27.4	7.26
2056	26.24	40.39	14.13	27.28	39.07	14.09	14.49	26.18	6.12	15.19	27.89	7.36
2057	25.99	39.04	13.88	26.58	40.17	12.76	14.05	25.76	5.26	15.56	26.6	5.54
2058	26.01	40.13	12.64	27.12	41.15	13.53	14.38	26.5	6.03	14.95	28.07	5.49
2059	25.67	38.46	14.38	27.4	39.41	17.41	13.89	24.62	6.74	15.08	28.37	4.29
2060	25.5	39.32	15.01	27.7	41.03	13.55	14.3	24.77	5.18	15.05	26.26	6.58
2061	26.17	40.26	14	27.25	40.72	15.52	14.02	26.13	6.6	15.61	28.53	4.52
2062	26.22	40.18	13.95	27.93	40.91	15.27	14.47	27.06	7.31	14.58	27.84	6.49
2063	26.39	38.62	12.59	27.44	38.4	15.65	15.16	24.69	4.79	15.11	27.06	6.74
2064	26.39	40.23	14.05	27.4	38.89	13.58	14.7	27.73	5.35	15.71	27.05	8.48
2065	25.6	37.1	13.53	27.67	38.5	15.13	14.38	23.83	6.04	15.38	26.65	8.08
2066	26.93	38.16	15.02	28.48	41.65	13.64	14.43	26.69	6.11	15.72	28	6.9
2067	26.78	38.18	14.49	27.42	41.72	13.17	14.71	26.13	7	15.29	28.79	6.41
2068	26.16	38.53	11.76	28.28	40.85	16.59	14.48	24.8	6.14	15.38	27.31	7.17
2069	26.92	37.33	13.03	28.86	40.19	14.18	14.28	26.08	6.61	15.89	26.38	8.34

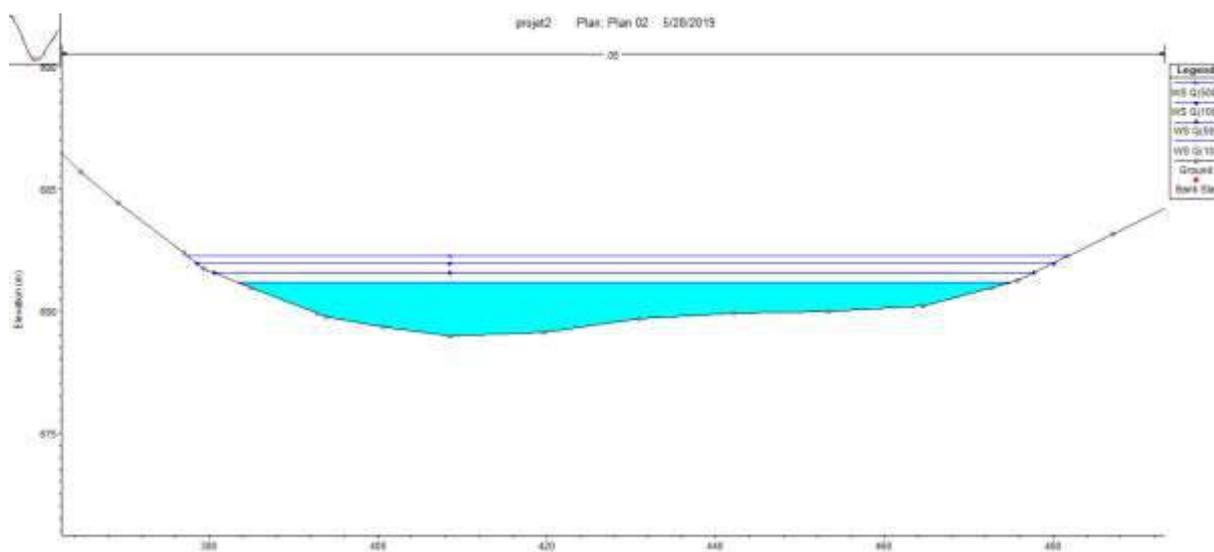
Année	Tmax ST Pont Taroudant						Tmin ST Pont Taroudant					
	RCP 4.5			RCP 8.5			RCP 4.5			RCP 8.5		
	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min	Moy	Max	Min
2070	26.7	40.05	12.81	28.25	41.81	14.37	14.78	27.07	4.53	15.92	27.84	4.06
2071	26.3	39.63	16.45	28.64	42.99	15.21	14.99	26.75	2.87	15.78	28.3	8.43
2072	26.19	38.34	12.19	28.85	42.53	15.38	15.22	25.22	7.29	15.79	29.19	8.69
2073	25.93	38.04	12.44	28.26	40.76	17.05	13.91	24.57	6.86	16.03	26.21	8.86
2074	26.63	38.73	13.75	29.31	40.71	15.97	14.1	24.9	4.96	16.61	28.58	8.95
2075	26.42	40.66	14.3	29.02	41.55	17.64	14.25	27.02	5.52	16.51	27.85	6.72
2076	26.58	38.1	13.15	28.49	41.07	15.48	14.22	24.89	6.32	15.81	28.57	7.49
2077	26.29	39.25	14.28	27.95	41.06	16.03	14.28	24.91	8.34	16.22	27.47	8.99
2078	26.31	37.62	15.08	28.86	39.79	14.19	14.61	24.49	4.26	16.94	28.84	8.65
2079	26.83	39.38	13.27	28.49	40.21	18.86	14.35	25.8	5.78	16.53	27.67	9.38
2080	26.83	38.86	16.19	28.8	40.96	16.34	13.9	26	5.89	16.84	27.68	8.82
2081	26.84	39.66	14.84	28.49	41.44	14.56	14.54	26.92	3.98	17.25	28.05	9.73
2082	26.49	39.82	13.97	28.69	43.75	15.92	14.09	26.14	7.7	16.61	28.11	8.82
2083	26.51	40.43	15.28	28.65	41.87	15.58	13.84	25.65	4.19	17.07	28.15	9.63
2084	26.71	38.29	17.11	28.57	40.4	15.79	14.49	25.06	6.59	17.2	27.52	9.22
2085	26.76	39.06	15.47	28.92	40.79	15.6	14.91	25.04	5.5	17.09	28.03	9.18
2086	26.46	39.45	13.06	29.47	41.82	15.61	14.38	24.83	5.83	16.64	28.29	6.98
2087	26.3	37.37	15.6	28.79	40.41	15.67	13.79	24.58	5.44	16.83	27.82	8.64
2088	26.72	38.89	13.12	30	41.91	15.94	14.7	26.61	7.12	17.12	27.99	10.79
2089	27.26	39.61	13.43	29.44	44.37	15.57	14.98	26.19	6.39	17.53	30.41	9.69
2090	27.04	38.29	13.56	29.37	42.7	15.83	14.19	25.17	6.9	17.02	29.08	9.29
2091	26.67	39.11	12.32	29.57	42.12	16.77	14.47	26.48	6.2	17.44	28.35	6.9
2092	26.39	40.05	14.35	30	41.53	17.94	14.81	27.6	5.15	17.07	29.2	8.7
2093	27.06	38.66	14.63	29.51	41.26	15.96	15.22	25.76	6.89	17.87	28.75	9.69
2094	27.24	38.25	14.13	29.74	43.88	17.3	15.12	24.36	4.59	16.87	28.71	7.46
2095	26.61	37.42	14.31	29.53	41.23	19.29	15.44	26.87	6.52	17.95	27.61	9.34
2096	25.82	37.92	13.79	29.62	39.99	16.41	15.12	24.33	6.22	17.54	28.83	9.09
2097	26.72	39.32	14.19	29.68	43	16.6	14.28	25.65	6.89	17.53	29.63	8.97
2098	26.55	37.3	12.58	29.67	40.78	18.76	14.67	26.05	5.12	17.66	28.01	10.58
2099	26.74	39.86	12.76	30.59	43.3	18.2	15.19	26.59	4.99	18.06	29.6	10.26

Annexe 2 : Valeurs du coefficient n de Manning

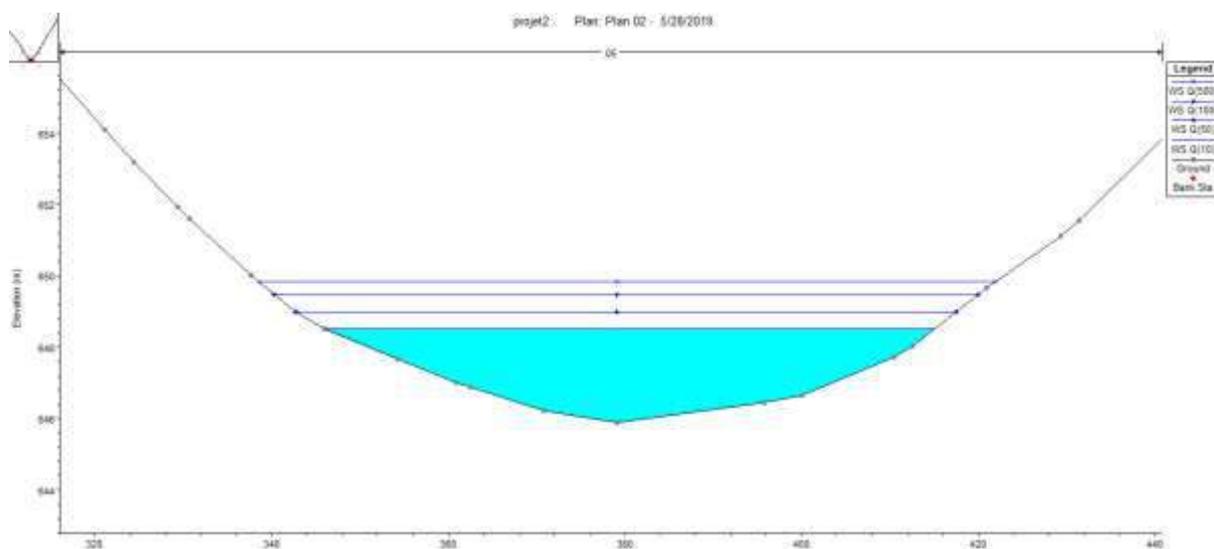
Nature des surfaces	Etats des parois			
	Parfait	Bon	Assez bon	Mauvais
A) Canaux artificiels				
Ciment lissé	0,01	0,011	0,012	0,013
Mortier de ciment	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs en bois raboté	0,01	0,012	0,013	0,014
Aqueducs en bois non raboté	0,011	0,013	0,014	0,015
Canaux revêtus de béton	0,012	0,014	0,016	0,018
Moëllons bruts	0,017	0,02	0,025	0,03
Pierres sèches	0,025	0,03	0,033	0,035
Moëllons dressés	0,013	0,014	0,015	0,017
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire lisse	0,011	0,012	0,013	0,015
Aqueducs métalliques à section demi-circulaire plissée	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre droits et uniformes	0,017	0,020	0,0225	0,025
Canaux avec pierres, lisses et uniformes	0,025	0,030	0,033	0,035
Canaux avec pierres, rugueux et irréguliers	0,035	0,040	0,045	-
Canaux en terre à larges méandres	0,0225	0,025	0,0275	0,030
Canaux en terre dragués	0,025	0,0275	0,030	0,033
Canaux à fond en terre, côtés avec pierres	0,028	0,030	0,033	0,035
B) Cours d'eau naturels				
1) Propres, rives en ligne droite	0,025	0,0275	0,030	0,033
2) Idem 1 avec quelques herbes et pierres	0,030	0,033	0,035	0,040
3) Avec méandres, avec quelques étangs et endroits peu profonds, propres	0,035	0,040	0,045	0,050
4) Idem 3, l'eau à l'étiage, pente et sections plus faibles	0,040	0,045	0,050	0,055
5) Idem 3, avec quelques herbes et pierres	0,033	0,035	0,040	0,045
6) Idem 4, avec pierres	0,045	0,050	0,055	0,060
7) Zones à eau coulant lentement avec herbes ou fosses très profondes	0,050	0,060	0,070	0,080
8) Zones avec beaucoup de mauvaises herbes	0,075	0,100	0,125	0,150

Annexe 3 : Les sections transversales des points à risque d'inondation

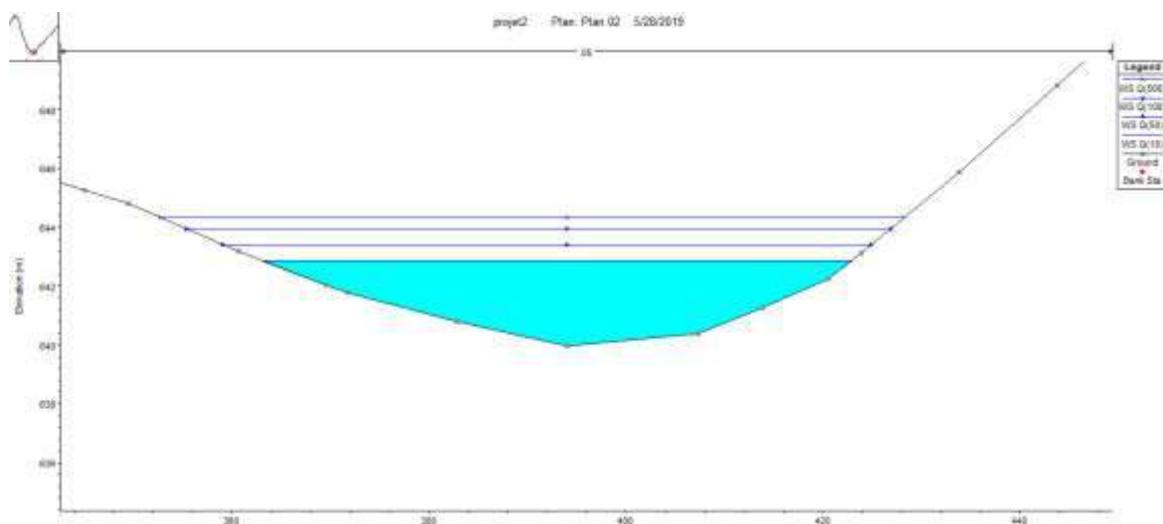
Point 1



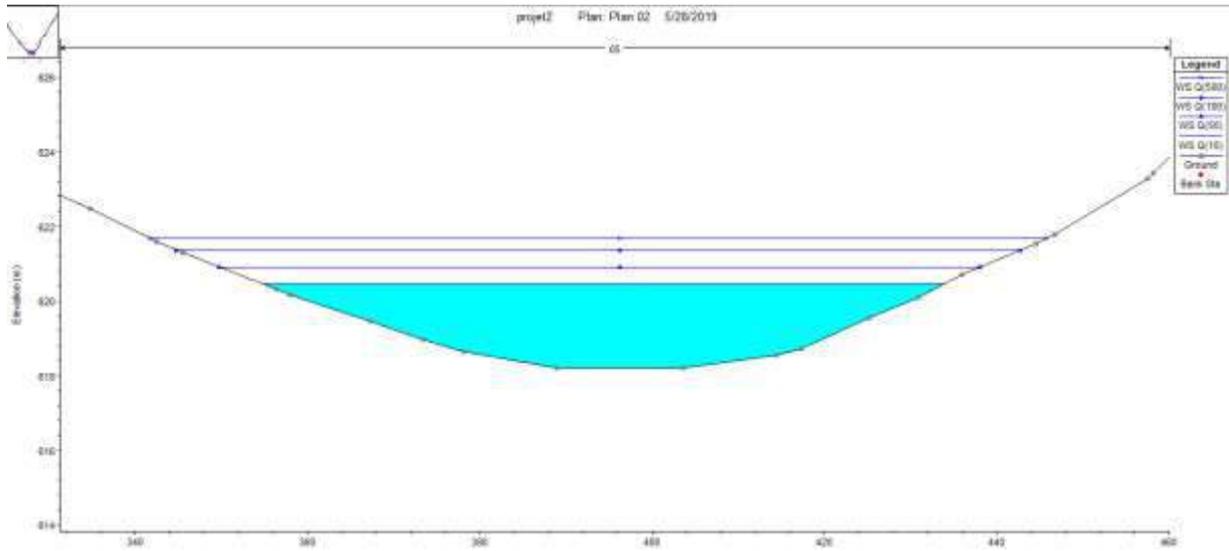
Point 2



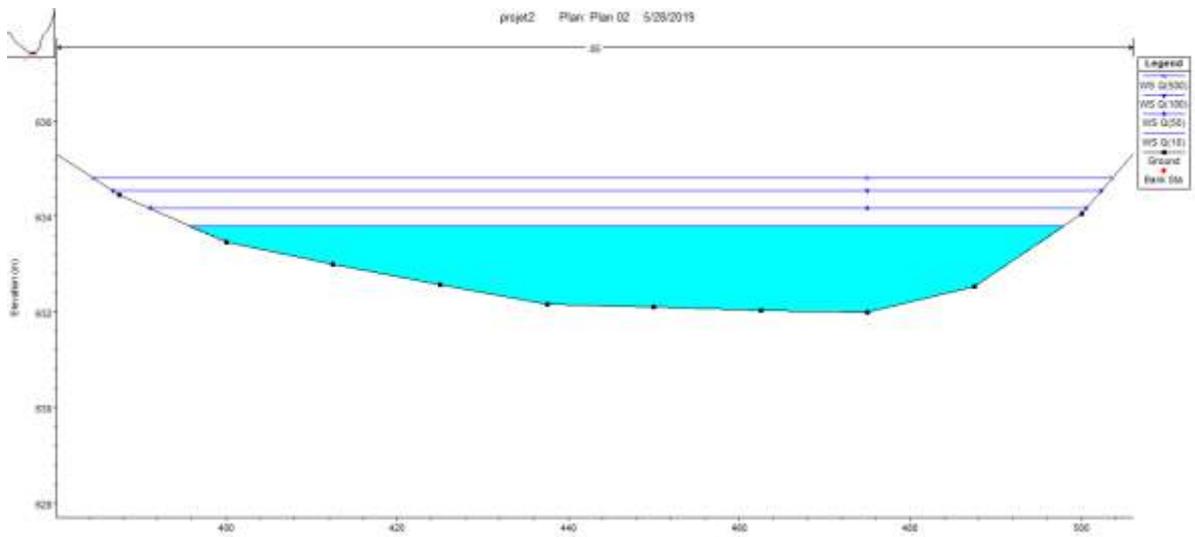
Point 3



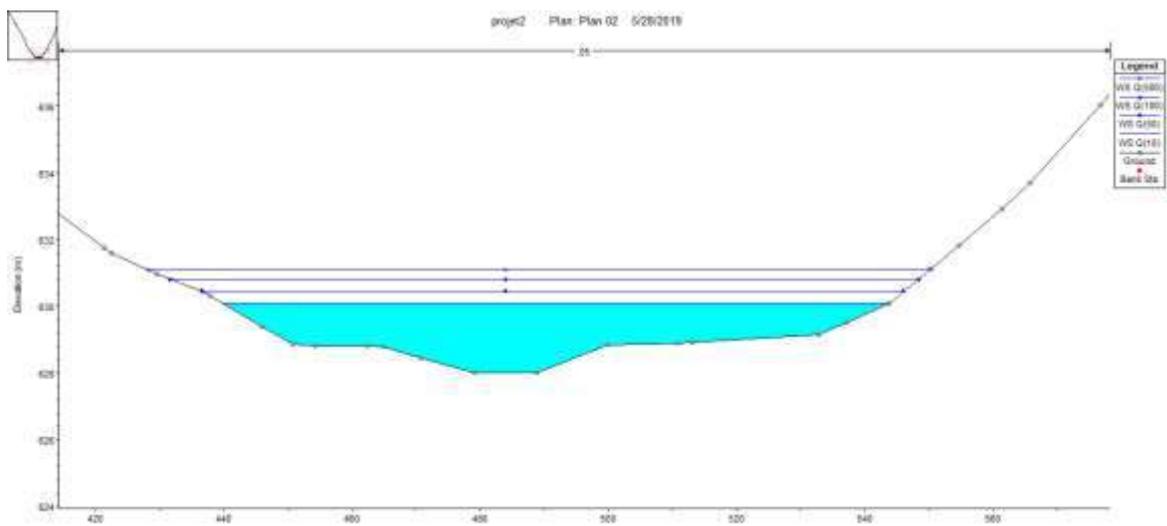
Point 5



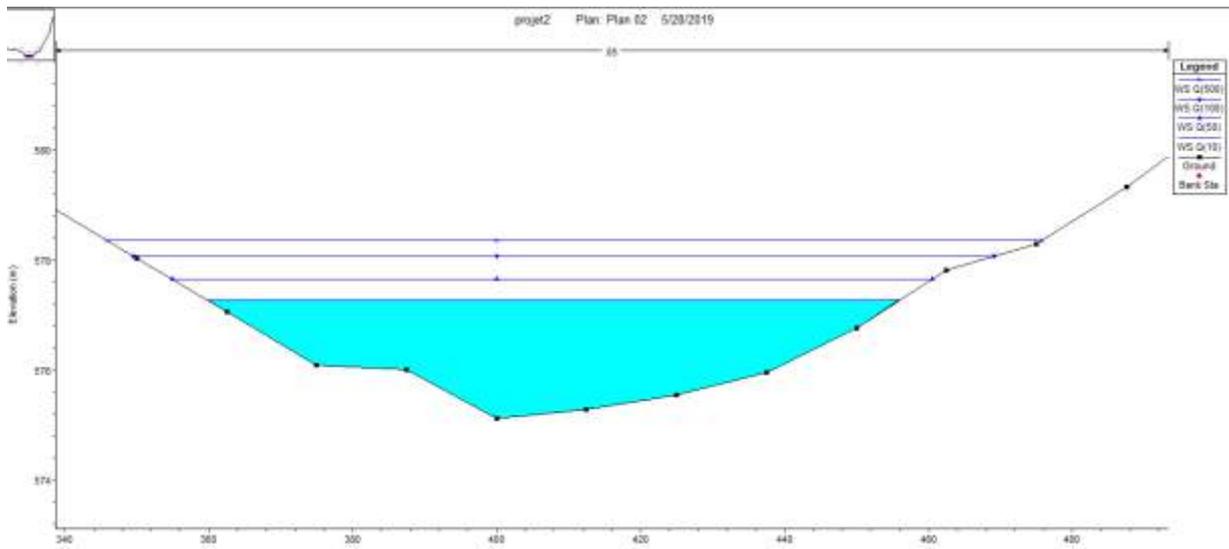
Zone 4 (amont)



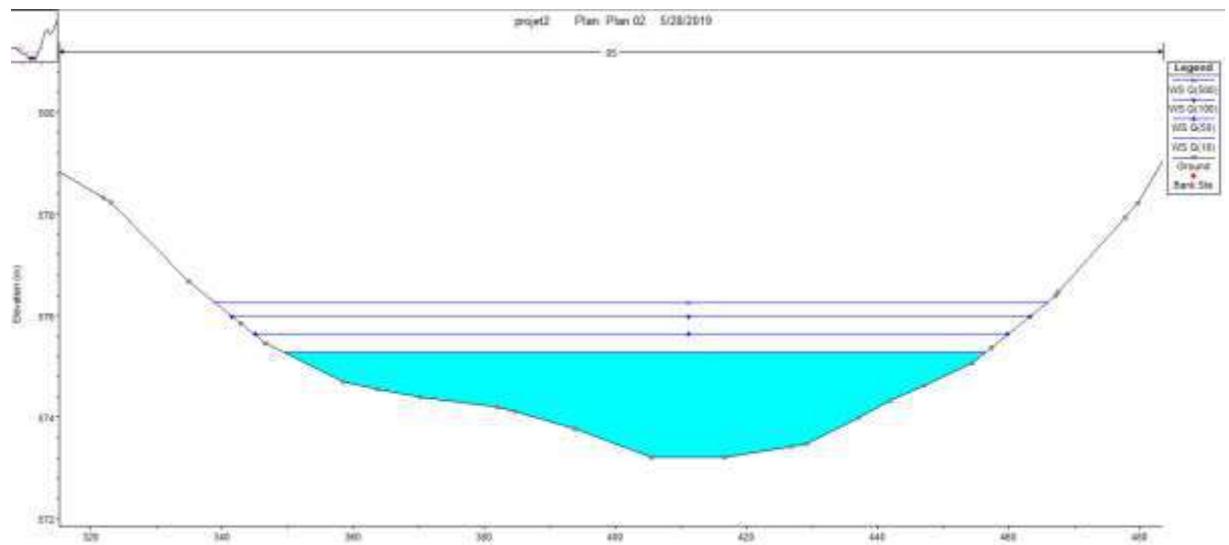
Zone 4 (Aval)



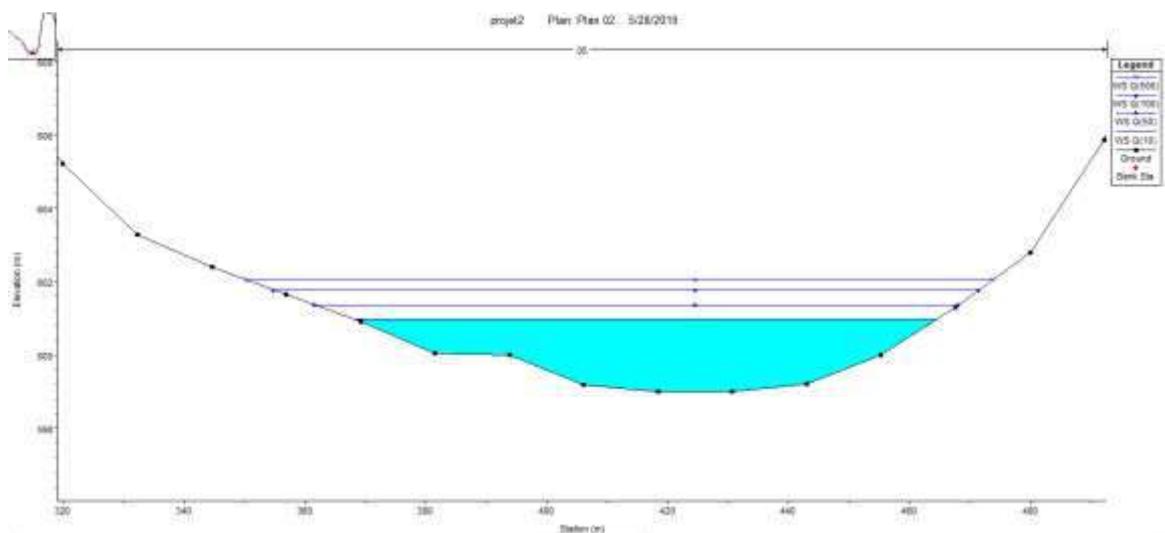
Zone 6 (amont)



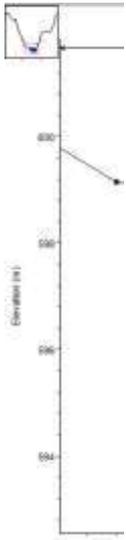
Zone 6 (aval)



Zone 7 (amont)



Zone 7 (aval)



XS		Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
	Profil	[m ³ /s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
1	Q10	455.84	628	630.09	2.09	3.51	129.75	104.01
	Q50	652.97	628	630.44	2.44	3.9	167.22	109.36
	Q100	892.66	628	630.82	2.82	4.24	210.68	116.91
	Q500	1079.83	628	631.09	3.09	4.45	242.55	121.93
2	Q10	455.84	629	631.07	2.07	3.54	128.81	101.38
	Q50	652.97	629	631.44	2.44	3.88	168.29	110.14
	Q100	892.66	629	631.82	2.82	4.21	211.95	117.63
	Q500	1079.83	629	632.09	3.09	4.43	243.88	122.36
3	Q10	455.84	630	632.02	2.02	3.53	129.25	101.98

	Q50	652.97	630	632.39	2.39	3.88	168.24	110.62
	Q100	892.66	630	632.76	2.76	4.23	210.91	117.34
	Q500	1079.83	630	633.03	3.03	4.44	243.07	121.94
4	Q10	455.84	631	632.94	1.94	3.51	129.73	103.25
	Q50	652.97	631	633.3	2.3	3.88	168.15	109.91
	Q100	892.66	631	633.68	2.68	4.23	211.24	116.82
	Q500	1079.83	631	633.94	2.94	4.45	242.44	120.68
5	Q10	455.84	632	633.8	1.8	3.52	129.37	102.23
	Q50	652.97	632	634.17	2.17	3.88	168.1	109.41
	Q100	892.66	632	634.55	2.55	4.23	210.81	115.62
	Q500	1079.83	632	634.81	2.81	4.47	241.64	119.13
Xseq	Q10	455.84	630.00	631.98	1.98	3.52	129.38	102.57
	Q50	652.97	630.00	632.35	2.35	3.88	168.00	109.89
	Q100	892.66	630.00	632.73	2.73	4.23	211.12	116.86
	Q500	1079.83	630.00	632.99	2.99	4.45	242.72	121.21

Annexe 4 : Résultats de la simulation hydraulique pour les zones agricoles

Tableau des résultats de la simulation hydraulique pour la zone 4

Tableau des résultats de la simulation hydraulique pour la zone 6

XS		Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
	Profil	[m3/s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
1	Q10	455.84	573.21	575.28	2.07	3.47	131.22	107.1
	Q50	652.97	573.21	575.63	2.42	3.84	169.99	114.84
	Q100	892.66	573.21	575.99	2.78	4.18	213.48	121.85
	Q500	1079.83	573.21	576.25	3.04	4.39	245.74	126.8
2	Q10	455.84	573.42	575.49	2.07	3.5	130.19	105.77
	Q50	652.97	573.42	575.85	2.43	3.86	169.16	113.39
	Q100	892.66	573.42	576.22	2.8	4.19	212.8	120.67
	Q500	1079.83	573.42	576.48	3.06	4.41	245.02	125.77
3	Q10	455.84	573.63	575.71	2.08	3.52	129.64	104.59
	Q50	652.97	573.63	576.07	2.44	3.87	168.52	112.06
	Q100	892.66	573.63	576.45	2.82	4.21	212.15	119.58
	Q500	1079.83	573.63	576.71	3.08	4.42	244.34	124.8
4	Q10	455.84	573.84	575.93	2.09	3.53	129.02	103.35
	Q50	652.97	573.84	576.3	2.46	3.89	167.9	110.79
	Q100	892.66	573.84	576.68	2.84	4.22	211.58	118.58
	Q500	1079.83	573.84	576.94	3.1	4.43	243.69	123.81
5	Q10	455.84	574.06	576.15	2.09	3.55	128.46	101.9
	Q50	652.97	574.06	576.52	2.46	3.9	167.29	109.61
	Q100	892.66	574.06	576.91	2.85	4.23	211.09	117.69
	Q500	1079.83	574.06	577.17	3.11	4.44	243.14	122.93
6	Q10	455.84	574.27	576.37	2.1	3.56	127.87	100.51
	Q50	652.97	574.27	576.75	2.48	3.92	166.78	108.53
	Q100	892.66	574.27	577.13	2.86	4.24	210.51	116.83
	Q500	1079.83	574.27	577.4	3.13	4.45	242.87	122.49
7	Q10	455.84	574.48	576.6	2.12	3.58	127.37	99.22
	Q50	652.97	574.48	576.97	2.49	3.93	166.26	107.57
	Q100	892.66	574.48	577.36	2.88	4.25	210.04	115.93
	Q500	1079.83	574.48	577.64	3.16	4.43	243.56	122.76
8	Q10	455.84	574.69	576.82	2.13	3.59	126.84	98.03
	Q50	652.97	574.69	577.2	2.51	3.94	165.84	106.74
	Q100	892.66	574.69	577.59	2.9	4.25	210.12	115.94
	Q500	1079.83	574.69	577.88	3.19	4.42	244.18	123.81
9	Q10	455.84	574.9	577.04	2.14	3.61	126.42	96.98
	Q50	652.97	574.9	577.42	2.52	3.95	165.48	106.04
	Q100	892.66	574.9	577.83	2.93	4.23	211.21	117.09
	Q500	1079.83	574.9	578.12	3.22	4.39	245.7	126.37
10	Q10	455.84	575.11	577.26	2.15	3.62	126.04	96.09
	Q50	652.97	575.11	577.65	2.54	3.95	165.21	105.66
	Q100	892.66	575.11	578.07	2.96	4.2	212.5	119.74

	Q500	1079.83	575.11	578.35	3.24	4.35	247.99	129.87
Xseq	Q10	455.84	574.161	576.265	2.104	3.553	128.307	101.354
	Q50	652.97	574.161	576.636	2.475	3.905	167.243	109.523
	Q100	892.66	574.161	577.023	2.862	4.22	211.548	118.39
	Q500	1079.83	574.161	577.294	3.133	4.413	244.623	124.941

Tableau des résultats de la simulation hydraulique pour la zone 7

XS		Q	Min Ch El	W.S. Elev	h	Vel Chnl	Flow Area	Top Width
	Profil	[m3/s]	[m]	[m]	[m]	[m/s]	[m ²]	[m]
1	Q10	455.84	594.83	596.93	2.1	3.54	128.71	101.33
	Q50	652.97	594.83	597.3	2.47	3.9	167.56	108.93
	Q100	892.66	594.83	597.69	2.86	4.22	211.56	117.2
	Q500	1079.83	594.83	597.96	3.13	4.4	245.43	125.05
2	Q10	455.84	595.25	597.33	2.08	3.54	128.71	100.8
	Q50	652.97	595.25	597.7	2.45	3.9	167.52	108.56
	Q100	892.66	595.25	598.1	2.85	4.21	212.06	117.43
	Q500	1079.83	595.25	598.38	3.13	4.39	245.97	125.21
3	Q10	455.84	595.66	597.73	2.07	3.57	127.73	100.09
	Q50	652.97	595.66	598.11	2.45	3.9	167.41	108.21
	Q100	892.66	595.66	598.51	2.85	4.21	211.89	117.49
	Q500	1079.83	595.66	598.79	3.13	4.39	245.77	125.18
4	Q10	455.84	596.08	598.15	2.07	3.55	128.44	99.74
	Q50	652.97	596.08	598.52	2.44	3.9	167.29	107.88
	Q100	892.66	596.08	598.92	2.84	4.21	211.86	117.51
	Q500	1079.83	596.08	599.2	3.12	4.4	245.65	125.08
5	Q10	455.84	596.5	598.54	2.04	3.58	127.27	99.02
	Q50	652.97	596.5	598.93	2.43	3.91	167.14	107.58
	Q100	892.66	596.5	599.33	2.83	4.21	211.89	117.53
	Q500	1079.83	596.5	599.6	3.1	4.4	245.52	124.99
6	Q10	455.84	596.91	598.96	2.05	3.56	128.02	98.71
	Q50	652.97	596.91	599.33	2.42	3.91	167	107.32
	Q100	892.66	596.91	599.73	2.82	4.21	211.9	117.51
	Q500	1079.83	596.91	600.01	3.1	4.4	245.34	124.7
7	Q10	455.84	597.33	599.35	2.02	3.59	126.87	98
	Q50	652.97	597.33	599.74	2.41	3.91	166.91	107.1
	Q100	892.66	597.33	600.14	2.81	4.21	211.94	117.46
	Q500	1079.83	597.33	600.42	3.09	4.4	245.2	124.39
8	Q10	455.84	597.75	599.77	2.02	3.57	127.65	97.8
	Q50	652.97	597.75	600.15	2.4	3.91	166.86	106.93
	Q100	892.66	597.75	600.55	2.8	4.21	211.92	117.35
	Q500	1079.83	597.75	600.82	3.07	4.41	245.04	124.1
9	Q10	455.84	598.17	600.16	1.99	3.6	126.56	97.15
	Q50	652.97	598.17	600.55	2.38	3.93	165.98	106.64
	Q100	892.66	598.17	600.96	2.79	4.21	211.85	117.18
	Q500	1079.83	598.17	601.23	3.06	4.41	244.89	123.85

10	Q10	455.84	598.58	600.57	1.99	3.58	127.38	97.02
	Q50	652.97	598.58	600.96	2.38	3.91	166.88	106.82
	Q100	892.66	598.58	601.36	2.78	4.22	211.74	116.95
	Q500	1079.83	598.58	601.64	3.06	4.41	244.77	123.62
11	Q10	455.84	599	600.97	1.97	3.61	126.25	96.41
	Q50	652.97	599	601.36	2.36	3.94	165.86	106.49
	Q100	892.66	599	601.77	2.77	4.22	211.62	116.69
	Q500	1079.83	599	602.04	3.04	4.41	244.66	123.45
Xseq	Q10	455.84	596.91	598.95	2.04	3.57	127.60	98.73
	Q50	652.97	596.91	599.33	2.42	3.91	166.95	107.50
	Q100	892.66	596.91	599.73	2.82	4.21	211.84	117.30
	Q500	1079.83	596.91	600.01	3.09	4.40	245.29	124.51

Annexe 5 : Analyse fréquentielle (ajustement des Pjmax et Qjmax)

Ajustement des Pjmax a la loi de Gumbel

Année	Pjmax	rang r	Fréquence de Hazen $f(x)=(r-0,5)/n$	Variable réduite de Gumbel $U= -\ln (-\ln (f(x)))$
	mm			
1982	13.6	1	0.0111111111	-1.504
2006	18.1	2	0.0333333333	-1.224
1999	18.8	3	0.0555555556	-1.061
2000	18.8	4	0.0777777778	-0.938
1993	19.5	5	0.1	-0.834
1992	20.1	6	0.1222222222	-0.743
1998	21.4	7	0.1444444444	-0.660
2011	21.7	8	0.1666666667	-0.583
1985	23	9	0.1888888889	-0.511
1972	23.7	10	0.2111111111	-0.442
1986	24.2	11	0.2333333333	-0.375
1980	24.7	12	0.2555555556	-0.311
1977	25.6	13	0.2777777778	-0.248
1973	27	14	0.3	-0.186
1976	27.3	15	0.3222222222	-0.124
1970	28.9	16	0.3444444444	-0.064
2007	30	17	0.3666666667	-0.003
2003	31.1	18	0.3888888889	0.057
1996	32.6	19	0.4111111111	0.118
2002	32.6	20	0.4333333333	0.179
1989	32.8	21	0.4555555556	0.240
1991	33.4	22	0.4777777778	0.303
1971	34	23	0.5	0.367

2004	34.7	24	0.522222222	0.431
1995	35.6	25	0.544444444	0.498
1983	35.9	26	0.566666667	0.566
1987	36.1	27	0.588888889	0.636
2013	36.5	28	0.611111111	0.708
1979	36.6	29	0.633333333	0.784
2008	39.5	30	0.655555556	0.862
2009	39.7	31	0.677777778	0.944
1990	42.6	32	0.7	1.031
1978	42.8	33	0.722222222	1.123
2005	45.4	34	0.744444444	1.220
1984	47.5	35	0.766666667	1.325
1997	48.7	36	0.788888889	1.439
1994	49.7	37	0.811111111	1.564
1975	50	38	0.833333333	1.702
2010	50.3	39	0.855555556	1.858
1981	53.2	40	0.877777778	2.037
1988	57.2	41	0.9	2.250
1974	61.3	42	0.922222222	2.514
2001	62.5	43	0.944444444	2.862
2012	69.1	44	0.966666667	3.384
2014	71.1	45	0.988888889	4.494

Ajustement des Qjmax a la loi de Gumbel

Année	Qjmax	rang r	Fréquence de Hazen $f(x)=(r-0,5)/n$	Variable réduite de Gumbel $U= -\ln (-\ln (f(x)))$	Ruisselement
	m3/s	[-]	[-]	[-]	mm/24h
1992	0.3	1	0.025	-1.305	0.00937
2000	9.8	2	0.038461538	-1.181	0.30601
1986	10.1	3	0.064102564	-1.011	0.31537
1982	11.6	4	0.08974359	-0.880	0.36221
1975	33	5	0.115384615	-0.770	1.03043
1991	38.7	6	0.141025641	-0.672	1.20841
1972	40.4	7	0.166666667	-0.583	1.26150
1973	49	8	0.192307692	-0.500	1.53003
1974	55.3	9	0.217948718	-0.421	1.72675
1980	55.6	10	0.243589744	-0.345	1.73612
1970	61.9	11	0.269230769	-0.272	1.93284
1971	67.1	12	0.294871795	-0.200	2.09521
1985	79.7	13	0.320512821	-0.129	2.48864
1981	93.6	14	0.346153846	-0.059	2.92267
1993	102	15	0.371794872	0.011	3.18497

1990	107	16	0.397435897	0.080	3.34109
1995	135	17	0.423076923	0.151	4.21540
1983	140	18	0.448717949	0.221	4.37152
1976	146	19	0.474358974	0.293	4.55887
2004	146.7	20	0.5	0.367	4.58073
1977	150	21	0.525641026	0.441	4.68377
2007	152.6	22	0.551282051	0.518	4.76496
1998	179.9	23	0.576923077	0.598	5.61741
1999	180	24	0.602564103	0.680	5.62053
1997	198.3	25	0.628205128	0.766	6.19195
1989	210	26	0.653846154	0.856	6.55728
2005	240.1	27	0.679487179	0.951	7.49716
1979	254	28	0.705128205	1.052	7.93119
1978	312	29	0.730769231	1.159	9.74225
1994	329	30	0.756410256	1.276	10.27308
2002	448.7	31	0.782051282	1.403	14.01073
1984	467	32	0.807692308	1.544	14.58215
1996	553	33	0.833333333	1.702	17.26751
2006	676.3	34	0.858974359	1.884	21.11757
2008	696.1	35	0.884615385	2.099	21.73583
1988	722	36	0.91025641	2.364	22.54456
2001	803.7	37	0.935897436	2.714	25.09566
1987	1860	38	0.961538462	3.239	58.07879
2009	1950.9	39	0.987179487	4.350	60.91715

BIBLIOGRAPHIE

- AGENCE DU BASSIN HYDRAULIQUE DU SOUSS MASSA « MODELISATION DE L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES RESSOURCES EN EAU AU NIVEAU DU BASSIN HYDRAULIQUE DE SOUS MASSA » – Mission 1- Version définitive- 04-01-2019
- Plan directeur d'aménagement intégré de la ressource en eau (PDAIR)
- J.J COLIN, *Les Eaux souterraines : Connaissance et gestion*, BRGM Editions, 2004
- Cours d'hydrologie (Pr Jihane Ahettab)
- *Hec-Ras User's Manual version 4.1*, jan. 2010
- *Hec-Ras Hydraulic Reference Manual version 4.1*, jan. 2010
- Revue des sciences de l'eau : Méthodes de désagrégation appliquées aux Modèles du Climat Global Atmosphère-Océan (MCGAO)- Edgar Herrera, Taha B.M.J. Ouarda and Bernard Bobée
- <http://www.experts-solidaires.org/fr/>
- <https://public.wmo.int/fr/bulletin/r%C3%A9gionalisation-de-l%E2%80%99information-sur-les-changements-climatiques-pour-les-%C3%A9valuations-des>
- <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/climatologie-nos-pollutions-ont-fait-nouvelle-victime-evapotranspiration-41687/>
- <https://www.ofme.org/documents/Chgmt-clim/Foret-medit-et-chgmt-clim.pdf>
- https://www.soussmassa.ma/sites/default/files/Synthese_PTRC_SM_compressed.pdf
- <https://global-climat.com/2015/12/21/la-sensibilite-climatique-reevaluee-par-la-nasa/>
- <https://unfccc.int/resource/docs/natc/marn3.pdf>
- https://www.4c.ma/medias/politique_du_changement_climatique_au_maroc.pdf
- <https://www.climate-change-performance-index.org/country/morocco-2019>
- https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01135374/file/Armandine_Les_Landes_Antoine.pdf
- http://www.marocmeteo.ma/?q=fr/climat_maroc
- <https://blog.lydec.ma/gestion-ressources-eau-enjeu-maroc-journee-mondiale-eau/>

