



N° d'ordre : 50/2023

Centre des Etudes Doctorales : Langues, Sciences Humaines, Arts et Sciences de l'Éducation
Formation Doctorale : Ressources, Aménagement et Développement Territorial
Discipline : Géographie
Spécialité : Géographie Physique
Equipe de recherche : Milieux Naturels, Aménagement et Dynamiques Socio-Spatiales

Thèse pour l'obtention de DOCTORAT

L'évolution des surfaces irriguées et leur impact sur les ressources en eau dans le contexte climatique actuel au Moyen Atlas tabulaire

Préparée par :

EL-BOUHALI Abdelaziz

Sous la direction de :

M. AMYAY Mhamed

Soutenue le 17 Mars 2023 devant le jury :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
M. BENBRAHIM Youssef	PES	FLSH, Saïs-Fès	Président
M. MAKRANE Ibrahim	PH	FLSH, Saïs-Fès	Membre
M. QADEM Abdelghani	PH	FLSH, Beni Mellal	Membre
M. LEBAUT Sébastien	MCF	Université de Lorraine, France	Membre
M. AMYAY Mhamed	PES	FLSH, Saïs-Fès	Directeur de thèse

Année Universitaire : 2022/2023

TABLES DES MATIERES

Table des matières

Tables des matières	2
Liste des tableaux	10
Tables des figures	12
Dédicace	19
Remerciements	21
Abréviations	24
Résumé	28
Introduction générale	32
PREMIERE PARTIE : CADRE GENERAL DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE D'OCCUPATION DES SOLS DANS LE MOYEN ATLAS TABULAIRE	37
Introduction de la première partie	37
Chapitre 1 : cadre général de la thèse, état de l'art et démarche méthodologique	39
Introduction	39
1 Cadre de la thèse	39
2 État de l'art	40
2.1 Le Moyen Atlas	40
2.2 Cartographie d'occupation des sols	42
3 Problématique	44
4 Objectifs de la recherche	45
5 Méthodologie et données	46
5.1 Collecte et organisation des données	46
5.2 Travail de terrain	46
5.3 L'extraction des données de télédétection	49
6 La zone d'étude	50
Conclusion	53
Chapitre 2 : Un contexte physique propice à l'évolution des surfaces agricoles dans le Moyen Atlas tabulaire	55
Introduction	55
1 Contexte géologique et lithologique de la zone d'étude	55

2	Caractéristiques topographiques	61
2.1	Les unités topographiques	62
3	Contexte hydro-climatique du Moyen Atlas tabulaire	64
3.1	Précipitations	64
3.1.1	La place du Moyen Atlas tabulaire à l'échelle du Maroc	64
3.1.2	Caractéristiques des précipitations dans la zone d'étude	65
3.1.2.1	Variation annuelle des précipitations	69
3.1.2.2	Variation mensuelle des précipitations	69
3.1.2.3	Variation saisonnière des précipitations	70
3.2	Température	72
3.2.1	Caractéristiques de la température dans la zone d'étude	72
3.2.1.1	Variation annuelle de la température	73
3.2.1.2	Variation mensuelle de la température	74
3.2.1.3	Variation saisonnière de la température	75
3.3	Les étages bioclimatiques	77
3.4	les ressources en eau	78
3.4.1	Les nappes d'eau souterraines	79
3.4.2	Les sources et les oueds	81
3.4.3	Les Lacs	83
	Conclusion	86
	Chapitre 3 : Le contexte socio-economiques de développement des surfaces agricoles	88
	Introduction	88
1	Aperçu sur l'histoire de l'agriculture au Maroc	88
1.1	Une faible extension des surfaces agricoles durant la période précolonial	89
1.2	L'augmentation des surfaces agricoles durant la période coloniale	90
1.3	Le développement de l'agriculture après l'indépendance	91
1.4	L'extension des cultures dans le Moyen Atlas	94
2	L'occupation des sols dans le Moyen Atlas tabulaire	96
2.1	Cultures irriguées	96

2.2	Cultures pluviales	99
2.3	Forêts	99
2.4	Terrains incultes	102
3	Les caractéristiques démographiques	103
3.1	Aperçu historique sur le peuplement dans le Moyen Atlas	103
3.2	La croissance démographique	103
Conclusion		107
Conclusion de la première partie		107
DEUXIEME PARTIE : ETUDE DIACHRONIQUE DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION		
DU SOL À L'ÉCHELLE DES DÉPRESSIONS DU MOYEN ATLAS TABULAIRE		
		110
Introduction de la deuxième partie		110
Chapitre 4 : Données et methodologie suivie pour étudier la dynamique d'oc-		
cupation des sols dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire		
		113
Introduction		113
1	Démarche d'extraction de l'information à partir des images satellites	113
2	Données satellitaires utilisées	114
2.1	Images satellites Corona	115
2.2	Images satellites Landsat	117
2.3	Images satellites Sentinel 2	118
2.4	Prétraitement des images satellites	120
3	Travail de terrain et inventaire des états de surfaces	122
4	Les types des cultures	123
5	Réalisation des calendriers agricoles	124
6	Échantillonnage des classes d'occupation des sols et l'élaboration de la légende .	125
6.1	Échantillonnage des classes d'occupation des sols	126
6.2	L'élaboration de la légende d'occupation des sols	128
7	Suivie de la réflectance spectrale	128
8	Réalisation du plan parcellaire	131
Conclusion		132

Chapitre 5 : La dynamique des vergers de rosacées dans les dépressions d’Imouzz-		
zer et de dayet Aoua		134
Introduction		134
1	Les dépressions d’Imouzzet et de Dayet Aoua	134
2	Classes d’occupation des sols dans les dépressions d’Imouzzet et de Dayet Aoua	136
3	Répartition des parcelles agricoles dans les dépressions d’Imouzzet et de Dayet Aoua	136
4	Évolution d’occupation des sols entre 1972 et 2018	138
4.1	Cantonement des premiers périmètres irrigués à l’aval des sources et dans les fonds des vallées	139
4.2	L’extension de l’irrigation dans les fonds des dépressions	142
4.3	L’extension de l’irrigation en dehors des fonds des dépressions	144
4.4	La dynamique des rosacées dans les dépressions d’Imouzzet et de Dayet Aoua .	146
Conclusion		149
Chapitre 6 : La dynamique des cultures maraîchères dans la dépression de Guigou		151
Introduction		151
1	La dépression de Guigou	151
2	Classes d’occupation des sols dans la dépression de Guigou	153
3	Répartition des parcelles agricoles dans la dépression de Guigou	153
4	Évolution d’occupation des sols dans la dépression de Guigou entre 1972 et 2018	154
4.1	Concentration des surfaces irriguées le long de l’oued Guigou	156
4.2	Vers l’explosion des surfaces irriguées dans la dépression de Guigou	158
4.2.1	Extension des cultures irriguées sur les fonds de la dépression	158
4.2.2	L’extension de l’irrigation dans toutes les directions de la dépression	160
4.3	La dynamique des cultures maraîchères irriguées dans la dépression de Guigou .	161
Conclusion		165
Chapitre 7 : La dynamique des cultures mixtes dans les dépressions d’Afourgagh		
et de Laanoucer		167
Introduction		167
1	Les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer	167

2	Classes d’occupation des sols dans les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer	169
3	Répartition des parcelles agricoles dans les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer	169
4	Évolution d’occupation des sols dans les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer entre 1972 et 2018	171
4.1	Phase de faible extension de l’agriculture dans les dépressions	172
4.2	Le remplacement des terres de pâturages par les cultures pluviales	172
4.3	La prédominance de l’irrigation sur l’ensemble des dépressions	174
4.4	La dynamique des surfaces irriguées dans les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer	177
	Conclusion	180
	Conclusion de la deuxième partie	181
	TROISIEME PARTIE : L’IMPACT DE L’EXTENSION DES SURFACES IRRIGUEES SUR LES RESSOURCES EN EAU DANS LE CONTEXTE DES TENDANCES CLIMATIQUES ACTUELLES	183
	Introduction de la troisième partie	183
	Chapitre 8 : Les tendances d’évolution du contexte climatique	185
	Introduction	185
1	L’essor des travaux relatifs à l’étude du climat durant les dernières années	185
2	Données et méthodes	186
2.1	Analyse de la variabilité climatique	187
2.1.1	Indice de Nicholson	188
2.1.2	Méthode du CUSUM et de segmentation de Hubert	188
3	Variabilité des précipitations mensuelles dans la zone d’étude	189
4	La tendance sécheresse pluviométrique durant les décennies récentes	190
4.1	L’analyse de la variabilité des précipitations sur longue durée	190
4.1.1	A l’échelle des stations de Fès et de Sefrou	190
4.1.2	A l’échelle de la station d’Ifrane	193
4.2	L’analyse de la variabilité des précipitations entre 1957 et 2017	194
5	L’augmentation remarquable des anomalies positives de la température	195

5.1	À l'échelle globale	196
5.2	À l'échelle du Moyen Atlas	197
6	Le contexte bioclimatique récent des périmètres irrigués	199
Conclusion		200
Chapitre 9 : Spatialisation des précipitations et des étages bioclimatiques dans le Moyen Atlas tabulaire et ses bordures		202
Introduction		202
1	Étude de la variation spatiale des précipitations	203
1.1	Modèle de spatialisation des précipitations	203
1.1.1	Extraction des variables explicatives : topographies et NDVI	204
1.2	Méthode de calcul des précipitations	205
1.3	Résultats de spatialisation des précipitations	209
2	L'étude de la variation des étages bioclimatiques	211
2.1	La spatialisation de la température	212
2.2	Résultats d'application du quotient pluviothermique d'Emberger	213
3	La validation des précipitations satellitaires	214
3.1	Précipitations satellitaires TRMM et GPM	215
3.2	La mesure de performance des précipitations satellitaires	216
3.3	Résultats de l'évaluation des précipitations satellitaires et les précipitations mesurées aux stations	216
3.4	Résultats de la comparaison entre les valeurs du modèle et les valeurs GPM annuelles pour 3 bassins versants du Moyen Atlas	223
Conclusion		223
Chapitre 10 : L'impact des changements climatiques et de la dynamique des surfaces irrigués sur les ressources en eau dans le Moyen Atlas tabulaire		226
Introduction		226
1	La question de l'impact des CC et de l'extension des surfaces irriguées	226
2	Les conséquences des CC et d'extension des surfaces irriguées sur les ressources en eau dans le Moyen Atlas	229
2.1	Le niveau piézométrique du Moyen Atlas tabulaire	229

2.2	Une baisse conséquente du niveau piézométrique de la nappe dans la dépression de Guigou	234
2.3	Une baisse remarquable du niveau des Lacs	239
2.3.1	Variation du niveau des lacs dans le Moyen Atlas tabulaire entre 1984 et 2022 . .	240
2.3.1.1	Fluctuations de niveau de dayet Aoua	240
2.3.1.2	Chute de niveau de dayet Afourgagh	243
2.3.1.3	Variation de niveau de dayet Ifrah	245
2.4	Chutes des débits des sources et des oueds	247
2.4.1	Débits des sources	247
2.4.2	Débits des oueds	251
3	Adaptation/réponse du système hydroagricole aux changements climatiques et aux pressions anthropiques	253
	Conclusion	257
	Conclusion de la troisième partie	257
	Conclusion générale	260
	Références	265
	Anexes	295

LISTE DES TABLEAUX

TABLES DES FIGURES

Liste des tableaux

1.1	Données de télédétection multi-sources utilisées	47
1.2	Données utilisées	48
2.1	Répartition des formations lithologiques dans la zone d'étude	59
2.2	Stations climatiques utilisées (ABHS)	67
2.3	Données thermiques disponibles	73
2.4	Indice bioclimatique d'Emberger	77
2.5	Débits des sources mesurés en 2005 par l'ABHS	82
2.6	Caractéristiques des lacs dans la zone d'étude	84
3.1	Superficies irrigables et équipées dans la zone d'action des Offices de mise en valeur agricole marocains en 2000	93
3.2	Les phases d'aménagement hydro-agricole du périmètre de Skoura	95
4.1	Images satellites Corona utilisées	116
4.2	Images satellites Landsat TM et OLI utilisées pour l'étude diachronique d'occupation des sols à l'échelle des dépressions moyen atlasique	117
4.3	Caractéristiques de l'instrument TM embarqué sur le satellite Landsat 5	118
4.4	Caractéristiques de l'instrument OLI et de l'instrument TIRS embarqués sur le satellite Landsat 8	119
4.5	Les images satellites Sentinel 2 utilisées	120
4.6	Caractéristiques de l'instrument MSI embarqué sur les deux satellites Sentinel 2A et Sentinel 2B	121
4.7	Calendrier agricole des cultures maraîchères irriguées	125
4.8	Calendrier agricole des rosacées	125
4.9	Calendrier agricole des cultures pluviales	126
5.1	Données de télédétection multi-sources utilisées	147
6.1	Dossiers de subvention accordée par l'État dans la dépression de Guigou entre 2008 et 2016	159
6.2	Evolution de l'occupation du sol entre 1985 et 2018 par période	162
7.1	Dossiers de subvention accordé par l'État « province de Sefrou » entre 2009 et 2017 dans le cadre du développement agricole	176

7.2	Dossiers de subvention accordé par l'Etat « commune Laanoucer» à partir de 2012 dans le cadre du plan Maroc vert	176
7.3	Évolution d'occupation du sol entre 1985 et 2018 par période	179
8.1	Données climatiques utilisées	186
8.2	Les tests statistiques utilisés pour étudier la tendance des climats dans ce travail . .	188
8.3	Résultat de segmentation d'Hubert des précipitations annuelles dans les stations de Fès et de Sefrou	191
9.1	Données utilisées pour la validation des précipitations	204
9.2	Regression multiple	205
9.3	Standardisation des variables	206
9.4	Équations du modèle	208
9.5	Données utilisées pour la validation des précipitations	217
9.6	Les indices statistiques utilisés pour évaluer les précipitations	217
9.7	Comparaison entre les précipitations aux stations et les précipitations GPM V6 à l'échelle annuelle	218
9.8	Comparaison entre les précipitations aux stations et les précipitations GPM V6 à l'échelle mensuelle	218
9.9	Comparaison entre les précipitations aux stations et les précipitations TRMM 3B43V7 à l'échelle annuelle	220
9.10	Comparaison entre les précipitations aux stations et les précipitations TRMM 3B43V7 à l'échelle mensuelle	220
10.1	Données utilisées dans ce chapitre	230
10.2	Exemples de surcreusement de puits entre 1981 et 2018 dans la dépression de Guigou	239

Table des figures

1.1	Les échantillons d'occupation des sols dans la zone d'étude	49
1.2	Travail de terrain dans la dépression de Guigou, mars 2020	49
1.3	Situation géographique et administrative de la zone d'étude	52
2.1	Carte lithologique de la zone d'étude (carte géologique du Maroc, carte structurale et cartes topographiques)	56
2.2	Coupe géologique traverse la plaine de Guigou	57
2.3	Vue panoramique sur trois dépressions du Moyen Atlas	58
2.4	Coupe structurale du Moyen Atlas plissé	60
2.5	Coupe géologique traverse trois unités structurales du Moyen Atlas tabulaire au préif	60
2.6	Carte d'altitudes de la zone d'étude (d'après le modèle numérique de terrain) . .	61
2.7	Carte des pentes de la zone d'étude (d'après le modèle numérique de terrain) . .	62
2.8	Répartition des altitudes et des pentes en fonction de la superficie dans la zone d'étude	62
2.9	Coupe topographique transversale dans la dépression de Guigou	63
2.10	Coupe topographique transversale dans la dépression d'Afourgagh	63
2.11	Coupe topographique transversale dans la dépression de d'Imouzzer	64
2.12	Répartition des précipitations à l'échelle du Maroc entre 2000 et 2018	66
2.13	Spatialisation des précipitations dans la zone d'étude entre 2000 et 2018	68
2.14	Valeurs Moyennes, Min, Max des précipitations et valeurs extrêmes enregistrées dans les 20 stations retenues dans ce travail entre 1975 et 2017 (ABHS)	69
2.15	Variation des précipitations moyennes mensuelles d'octobre à avril (hiver étendu / la saison pluvieuse) et de mai à septembre (ABHS)	70
2.16	Variation saisonnière des précipitations entre 1975 et 2017 (ABHS)	71
2.17	Variation des précipitations durant deux périodes de l'année d'octobre à avril (hiver étendu) et de mai à septembre (ABHS)	72
2.18	Spatialisation de la température moyenne dans la zone d'étude entre 1961 et 2017 sur la base des gradients thermiques	74

2.19	Variation de la température extrême enregistrée dans les 6 stations retenues dans ce travail entre 1985 et 2017 (ABHS)	75
2.20	Variation de la température moyenne mensuelle entre 1985 et 2017 (ABHS)	75
2.21	Variation saisonnière de la température (ABHS)	76
2.22	Situation de la zone d'étude dans le climagramme d'Emberger	78
2.23	Carte des bioclimats selon la classification d'Emberger	79
2.24	Répartition des nappes dans la zone d'étude (ABHS)	80
2.25	Les sources dans la zone d'étude	81
2.26	Répartition des principaux lacs dans la zone d'étude	83
2.27	Les principaux lacs dans la zone d'étude	85
3.1	Évolution du nombre de barrages au Maroc entre 1950 et 2015	92
3.2	Équipements hydrauliques abandonnés dans la cuvette de Skoura	95
3.3	Occupation des sols dans la zone d'étude en 2018	97
3.4	Cultures maraîchères et fourragères irriguées dans la zone d'étude (août 2018)	98
3.5	Pourcentage d'occupation des sols dans la zone d'étude en 2018	98
3.6	Vergers de rosacées dans la dépressions d'Imouzzer	99
3.7	Cultures pluviales dans la dépression de Guigou, août 2018	100
3.8	Les essences forestières dans la zone d'étude	100
3.9	Principales essences forestières dans la zone d'étude	101
3.10	Pourcentage des principales essences forestières dans la zone d'étude en 2018	101
3.11	Les terrains incultes dans la zone d'étude	102
3.12	Évolution de la population des 54 communes étudiées entre 1982 et 2014	104
3.13	Taux d'accroissement annuel moyen de la population, 1982 et 2014	104
3.14	Taux d'accroissement annuel moyen de la population, 1982 et 1994	105
3.15	Taux d'accroissement annuel moyen de la population, 1994 et 2004	105
3.16	Taux d'accroissement annuel moyen de la population, 2004 et 2014	106
3.17	Répartition du taux d'accroissement annuel moyen de la population, 1982 et 2014	106
3.18	Répartition de la densité des populations entre 1982 et 2014	107
4.1	Démarche méthodologique d'extraction des cartes d'occupation des sols dans la zone d'étude	115

Table des figures

4.2	Les étapes de la correction radiométrique des images satellites du CN au TOC .	121
4.3	Correction radiométrique des images satellites	122
4.4	Correction atmosphérique des images satellites	123
4.5	Illustration du travail de terrain dans la zone d'étude	124
4.6	Échantillonnage des classes d'occupation des sols	127
4.7	Échantillonnage des classes d'occupation des sols	127
4.8	Grandes classes d'occupation des sols dans la zone d'étude	128
4.9	Variation de la signature spectrale des cultures maraîchères irriguées (pomme de terre) dans la plaine de Guigou en août 2018	129
4.10	Variation de la signature spectrale des vergers (pommes) dans la dépression d'Imouzzzer en août 2018	130
4.11	Variation de la signature spectrale des cultures pluviales (orge) dans la dépression de Guigou en août 2018	130
4.12	Variation de la réflectance spectrale dans le PIR de janvier à décembre 2018 dans une partie de la zone d'étude	131
4.13	Exemple des images utilisées pour la réalisation des cartes des parcelles dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire	132
5.1	Situation géographique et administrative des dépressions d'Imouzzzer et de Dayet Aoua	135
5.2	Répartition des parcelles agricoles dans les dépressions d'Imouzzzer et de Dayet Aoua	137
5.3	Répartition des parcelles agricoles en fonction de la surface en % dans les dépressions d'Imouzzzer et de Dayet Aoua	138
5.4	Situation d'occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzzer et de Dayet Aoua en 1972	140
5.5	Occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzzer et de Dayet Aoua en 1985 .	141
5.6	Occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzzer et de Dayet Aoua en 1998 .	143
5.7	Occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzzer et de Dayet Aoua en 2010 .	144
5.8	Occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzzer et de Dayet Aoua en 2018 .	145

5.9	Évolution de la superficie (ha) d'occupation du sol dans les dépressions d'Imouzz- zer et de Dayet Aoua 1985 et 2018	146
5.10	Evolution des surfaces irriguées dans les dépressions d'Imouzz- zer et de Dayet Aoua entre 1985 et 2018	148
6.1	Situation géographique et administrative de la dépression de Guigou	152
6.2	Répartition des parcelles agricoles en fonction de la superficie en % dans la dé- pression de Guigou	154
6.3	Répartition des parcelles agricoles dans la dépression de Guigou	155
6.4	Occupation des sols dans la dépression de Guigou 1972	157
6.5	Occupation des sols dans la dépression de Guigou 1985	158
6.6	Occupation des sols dans la dépression de Guigou 1998	159
6.7	image satellite Landsat TM, 15 mai et 3 août 2010	160
6.8	Occupation des sols dans la dépression de Guigou 2018	161
6.9	Évolution de la superficie (ha) d'occupation du sol dans la dépression de Guigou entre 1985 et 2018	162
6.10	Les surfaces irriguées dans la dépression de Guigou en 1985	163
6.11	Les surfaces irriguées dans la dépression de Guigou en 1998	163
6.12	Les surfaces irriguées dans la dépression de Guigou en 2010	164
6.13	Les surfaces irriguées dans la dépression de Guigou en 2018	164
7.1	Situation géographique des dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer	168
7.2	Répartition des parcelles agricoles en fonction de la superficie en % dans les dé- pressions d'Afourgagh et de Laanoucer	170
7.3	Répartition des parcelles agricoles en fonction de la superficie en % dans la dé- pression d'Afourgagh	171
7.4	Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 1972 . . .	173
7.5	Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 1985 . . .	174
7.6	Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 1998 . . .	175
7.7	Aménagement des terres dans la commune de Laanoucer	176
7.8	Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 2010 . . .	177
7.9	Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 2018 . . .	178

7.10	Évolution de la superficie (ha) d'occupation du sol les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer entre 1985 et 2018	179
7.11	Évolution des surfaces irriguées les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer entre 1985 et 2018	180
8.1	Cinq grands thèmes de la littérature basés sur les 100 mots clés les plus utilisés .	187
8.2	Les précipitations mensuelles entre 1957 et 2017	189
8.3	CUSUM des précipitations annuelles (1915-2017) à la station de Fès	191
8.4	CUSUM des précipitations annuelles (1915-2015) à la station de Sefrou	192
8.5	Représentation graphique de l'indice de Nicholson calculé pour la station de Fès (1915 à 2017)	192
8.6	Représentation graphique de l'indice de Nicholson calculé pour la station de Sefrou (1915 à 2015)	192
8.7	CUSUM des précipitations annuelles (1935-2015) à la station d'Ifrane	193
8.8	Représentation graphique de l'indice de Nicholson calculé pour la station d'Ifrane (1935 à 2015)	193
8.9	CUSUM des précipitations annuelles (1957-2017) à l'échelle de cinq stations . . .	195
8.10	Représentation graphique de l'indice pluviométrique de Nicholson annuel calculé à l'échelle de six stations de 1957 à 2017	196
8.11	Anomalies des températures moyennes mensuelles sur la période 1910 - 2021 . .	197
8.12	La température mensuelle entre 1985 et 2017	198
8.13	Anomalies des températures moyennes annuelles sur la période 1985 – 2017 . .	198
8.14	Quotient d'Emberger Q2 et températures à la station de Fès	200
9.1	Fenêtres utilisées pour l'extraction des valeurs des altitudes	204
9.2	Histogrammes des pluies moyennes sur les trois périodes	206
9.3	Le choix des prédicteurs selon le critère R^2	207
9.4	Le choix des prédicteurs selon le critère BIC	207
9.5	Comparaison entre les précipitations observées et les précipitations modélisées .	208
9.6	Carte des précipitations moyennes 1974 - 2017	209
9.7	Carte des précipitations moyennes 1974 - 1977	210
9.8	Carte des précipitations moyennes 2014 - 2017	210

Table des figures

9.9	Gradients de températures dans le Moyen Atlas	212
9.10	Moyenne de Q2 sur la période 1974/79	213
9.11	Moyenne de Q2 sur la période 2012/2017	214
9.12	Régression des valeurs mesurées / valeurs GPM V6 annuelles	219
9.13	Régression des valeurs mesurées / valeurs GPM V6 mensuelles	219
9.14	Régression des valeurs mesurées / valeurs TRMM 3B43V7 annuelles	221
9.15	Régression des valeurs mesurées / valeurs TRMM 3B43V7	221
9.16	Régression valeurs modèles / valeurs GPM annuelles pour 3 bassins versants du Moyen Atlas	223
10.1	Carte piézométrique couvrant la région des lacs du Moyen Atlas	231
10.2	Niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mars 2020	232
10.3	Niveau piézométrique de la nappe dans la dépression d’Afourgagh en mai 2017 .	232
10.4	Nombre de mètres approfondis dans les puits d’Imouzzet et de Guigou	233
10.5	Illustration des mesures piézométriques réalisées dans la dépression de Guigou en mars 2020	233
10.6	Distribution gaussienne du niveau piézométrique (m) de la nappe de Guigou . .	235
10.7	Répartition du niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mai 2012	236
10.8	Répartition du niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mars 2020	236
10.9	Spatialisation du niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mai 2012 . . .	237
10.10	Spatialisation du niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mars 2020 . . .	237
10.11	Comparaison entre le niveau piézométrique et la profondeur des puits dans la plaine de Guigou en mai 2020	238
10.12	Date d’approfondissement des puits après le premier creusement	238
10.13	Bilan hydrique mensuel de Dayet Aoua entre 1980 et 2005 (ABHS)	241
10.14	Variation mensuelle de la superficie de dayet Aoua en 1985 (images Landsat 5) .	241
10.15	Variation mensuelle de la superficie de dayet Aoua en 2018 (images Landsat 8) .	241
10.16	Variation de la superficie de dayet Aoua entre août 1984 et août 2022	242
10.17	Variation de la superficie (ha) de dayet Aoua d’août 1984 à août 2022	243
10.18	Variation mensuelle de la superficie de dayet Afourgagh en 1985 (images Landsat 5)	243
10.19	Variation mensuelle de la superficie de dayet Afourgagh en 2018 (images Landsat 8)	243

10.20	Variation de la superficie de dayet Ifrah d'août 1984 à août 2022	244
10.21	Chute de la superficie (ha) de dayet Afourgagh d'août 1984 à août 2022	245
10.22	Variation mensuelle de la superficie de dayet Ifrah en 1985 (images Landsat 5) .	245
10.23	Variation mensuelle de la superficie de dayet Ifrah en 2018 (images Landsat 5) .	246
10.24	Variation de la superficie (ha) de dayet Ifrah d'août 1984 à août 2022	246
10.25	Variation de la superficie de dayet Ifrah d'août 1984 à août 2022	247
10.26	Variation du débit d'Ain Bittit (octobre 1975 au mai 2018)	248
10.27	Variation du débit de Ribaa amont (octobre 1975 au janvier 2018)	249
10.28	Variation du débit de Ribaa aval (mars 1969 au janvier 2018)	249
10.29	Anomalies au niveau des débits d'Ain Bittit (mars 1969 au janvier 2018)	250
10.30	Anomalies au niveau des débits de Ribaa amont (octobre 1975 au janvier 2018) .	250
10.31	Anomalies au niveau des débits de Ribaa aval (mars 1969 au janvier 2018)	250
10.32	Caractérisation du débit mensuel (M3/s) entre 1956 et 2013	251
10.33	Évolution interannuelle des modules annuels des débits des stations d'Ain Tima- drine, Azzaba et Dar El Hamra (1956 – 2013)	252
10.34	CUSUM des modules annuels à la station d'Azzaba (1958-2013) et d'Ain Tima- drine (1956 2013)	253
10.35	Canaux d'irrigation à partir d'oued Guigou après l'aménagement des anciennes Seguias	254
10.36	Techniques d'irrigation dans la plaine de Guigou	255
10.37	Techniques utilisées par les agriculteurs pour pallier la problématique de dégra- dation des eaux souterraines dans la dépression de Guigou	256

إهداء | Dédicace

أهدي هذا البحث
إلى أمي الغالية رحمها الله وأسكنها فسيح جناته
إلى أبي الحبيب أطال الله في عمره
إلى إخوتي وسندي. اللهم احفظهم ووفقهم في حياتهم
إلى زوجتي الغالية وسندي في هذه الحياة
إلى ابنتي الغالية أمل. اللهم احفظها ووفقها في حياتها
إلى جميع أساتذتي الكرام، الذين لم يتوانوا في مد يد العون لي

REMERCIEMENTS

Remerciements

Je tiens à exprimer ici mes sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre à la concrétisation de ce travail de thèse.

Avant tout, j'adresse mes plus sincères remerciements à mon directeur de thèse **Mr. AMYAY Mhamed** pour la qualité de leur encadrement tant sur le plan scientifique qu'humain. Je tiens à le remercier pour tout ce qu'il a fait pour moi et pour la grande confiance qu'il m'a accordée durant la période de réalisation de ce travail. Merci pour vos orientations, vos remarques et vos critiques qui m'ont fait progresser dans la recherche. Vos compétences, l'intégrité scientifique et la rigueur scientifique m'ont beaucoup appris. *Aucune expression ne pourra traduire la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous.*

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre du projet **PHC Toubkal**, « sources, ressources et mutations récentes des paysages du Moyen Atlas, Maroc » établi entre l'université de Lorraine, Metz - France et l'université Sidi Mohamed Ben Abdellah, Fès – Maroc. Je voudrais donc remercier tous les professeurs qui ont participé à la réalisation de ce projet.

Dans le cadre du projet, j'exprime mes remerciements à **Mr. LEBAUT Sébastien** et **Mr. GILLE Emmanuel** pour l'accueil chaleureux au sein du laboratoire LOTERR-Université de Lorraine et pour l'encadrement. **Sébastien**, merci pour votre disponibilité, votre encouragement et vos orientations durant toutes les périodes de mon séjour à Metz. Votre encadrement m'a aidé beaucoup à avancer dans les travaux de recherche. Merci de m'avoir apporté une aide précieuse sur le plan scientifique et sur le plan humain.

Dans le cadre du projet, je tiens également à remercier **Mme. COTONNEC Adeline** pour l'accueil chaleureux au sein du laboratoire LETG-Rennes-Université Rennes2. Merci pour vos orientations, vos encouragements, votre soutien et votre qualité d'encadrement sur le plan scientifique et sur le plan humain.

Je tiens aussi à présenter mes remerciements les plus distinguées aux membres de jury ; mes professeurs **Mr. BENBRAHIM Youssef**, **Mr. MAKRANE Ibrahim**, **Mr. QADEM Abdelghani** et **Mr. LEBAUT Sébastien**.

Il est également de mon devoir de remercier tous mes professeurs du MNADSS ancien LAGEA-DD. J'insiste à les remercier chacun par son nom : **Mr. LAAOUANE Mohamed**, **Mr. OBDA Khalid**, **Mr. EL HOUARI Abdelghani**, **Mr. TRIBAK Abdelatif**, **Mr. TAOUS Ali**, **Mr. BENBRAHIM Youssef**, **Mr. AKODAD Mohamed** et **Mr. IDRISSE JANATI Abdelhamid**. J'ai l'honneur d'être parmi vos étudiants.

J'exprime aussi mes remerciements les plus sincères aux membres de LOTERR pour l'accueil chaleureux et pour la qualité scientifique et humaine. Merci d'avoir mis à ma disposition leurs compétences et leurs connaissances. J'insiste à les remercier chacun par son nom : **Mr. FRANCOIS Didier**, **Mr. DELUS Claire**, **Mr. HAIDU Ionel**, **Mr. DROGUE Gilles**, **Mr. HAMEZ Grégory**, **Mr. MANCEAU Luc**, **Mr. LOSSON Benoît**, **Mr. BOQUET Mathias**, **Mr. DORKEL Nicolas**.

Remerciements

Je tiens à remercier les professeurs du laboratoire LETG-Rennes qui m'ont aidé beaucoup à développer mes compétences en télédétection spatiale et au traitement des images satellites. Merci **Mr. CORNGE Samuel**, **Mr. THOMAS Alban** et **Mr. OSZWALD Johan**. Merci **THIBAUT Jeanne**. J'exprime aussi mes remerciements à **Mme. THOMAS Zahra** pour l'accueil à l'Institut Agro-Rennes. Merci pour vos orientations.

Mes remerciements s'adressent également à **Mr. LOPEZ LARA Enrique**, **Mr. BAENA Rafael** et **Mme. GUERRERO Immaculada** pour l'accueil chaleureux au sein de l'Université de Séville en Espagne dans le cadre du programme **ERASMUS+**. Merci d'avoir accepté de m'encadrer durant la période de mobilité.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux professeurs qui m'ont aidé à la réalisation des travaux de terrains dans des conditions et des périodes difficiles. J'insiste à les remercier chacun par son nom : **Mr. AMYAY Mhamed**, **Mr. LAAOUANE Mohamed**, **Mr. LEBAUT Sébastien**, **Mme. COTONNEC Adeline**, **Mr. QADEM Abdelghani** et mes amis ; **EL GHALMI Imad**, **BOUYERMANE Monir**, **AKH-NIGE Yassine** et **CHRIF EL IDRISSE Mohammed**.

Mes remerciements vont aussi aux services administratifs de l'université Sidi Mohamed Ben Abdellah (**USMBA**), de l'université de Lorraine (**UL**), du Centre National pour la Recherche Scientifique et Technique (**CNRST**) et de **CAMPUS France**.

J'adresse un remerciement tout particulier à mes parents pour m'avoir donné la chance de faire de longue étude, pour leur soutien sans limites durant toute ma scolarité. Merci à mes chers frères ; **ABD ESSAMAD** et **MOHAMED** et mes *chères sœurs* ; **AMINA**, **SIHAM**, **IMANE**, **SALMA**. Je suis très fière de vous.

J'adresse un remerciement très particulier à ma chère femme **KHADIJA** et à ma *petite ESPOIR*, ma fille **AMAL**. Elles sont simplement le pilier de ma vie. Ma chère, votre soutien sans faille et votre encouragement sont les clés de ma réussite. Merci de tout mon cœur...

Ce travail n'aurait pu voir le jour sans les efforts et les sacrifices personnels et économiques de mes parents, le soutien de ma famille, de mes amis et de mes professeurs.

ABREVIATIONS

Abréviations

ADA	>	Agence pour le Développement Agricole
BIC	>	Bayesian Information Criterion
CC	>	Coefficient de Corrélation
CIHEAM	>	Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes
CN	>	Compte Numérique
DERRO	>	Développement Économique et Rural du Rif Occidental
DN	>	Digital Number
DOS1	>	Dark Object Substract1
ESA	>	European Space Agency
ETM+	>	Enhanced Thematic Mapper Plus
GIE	>	Groupement d'Intérêt Economique
GIEC	>	Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GPM	>	Global Precipitation Measurement
HDF	>	Hierarchical data format
HYDE	>	History Database of the Global Environment
IMERG	>	Integrated Multisatellite Retrievals for GPM
IPCC	>	Intergovernmental Panel on Climate Change
JAXA	>	Japan Aerospace Exploration Agency
MAE	>	Mean Absolute Error
MAPMDREF	>	Ministère de l'Agriculture, de la Pêche Maritime, du Développement Rural, des Eaux et Forêts
MAPE	>	Mean Absolute Percentage Error

Abréviations

MIR	>	Moyen Infra-Rouge
ML	>	Maximum Likelihood
MODIS	>	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSI	>	Multi-Spectral Instrument
MSS	>	Multispectral Scanner System
NASA	>	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	>	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	>	Near Infrared
NOAA	>	National Oceanic and Atmospheric Administration
NRMSE	>	Normalized Root Mean Square Error
NSE	>	Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient
OLI	>	Operational Land Imager
OMVA	>	Office de Mise en Valeur Agricole
ONI	>	Office National d'Irrigation
ONMR	>	Office National de Modernisation Rurale
ORMVA	>	Offices Régionaux de Mise en Valeur Agricole
PBias	>	Percent Bias
PDR	>	Programme de Développement Régional
PIB	>	Produit Intérieur Brut
PLS	>	Partial Least Square Regression
PMAC	>	Projet du Moyen Atlas Central
PMV	>	Plan Maroc Vert
RF	>	Random Forest
RMSE	>	Root Mean Square Error

Abréviations

SCP	>	Semi-Automatic Classification Plugin
SVM	>	Support Vector Machine
TIFF	>	Tagged Image File Format
TIRS	>	Thermal Infra-Red Sensor
TM	>	Thematic Mapper
TMI	>	TRMM Microwave Imager
TOA	>	Top of Atmosphere
TOC	>	Top of Canopy
TRMM	>	Tropical Rainfall Measuring Mission
USGS	>	United States Geological Survey
VCE	>	Variables Climatiques Essentielles

RESUME
ABSTRACT

ملخص

Résumé

Durant les dernières décennies, les ressources en eau dans le Moyen Atlas tabulaire sont soumises à une immense pression sous l'effet des changements climatiques (CC) et des modifications majeures au niveau d'occupation des sols. L'analyse de la variabilité et de la tendance du climat montre une chute brutale des précipitations à partir des années 1980. Il s'agit de la tendance générale des précipitations à la baisse et l'augmentation de nombres des années déficitaires. En parallèle avec la diminution des apports pluviométriques, la température a enregistré une hausse remarquable. Ces changements au niveau des paramètres climatiques ont participé largement à la perturbation des systèmes agricoles pluviaux et permettent d'orienter les pratiques agricoles vers l'irrigation pour faire pousser l'agriculture pendant les périodes sèches de l'été.

La cartographie et la quantification de la dynamique d'occupation des sols dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire entre 1985 et 2018 montrent une évolution progressive des surfaces irriguées au détriment des terres de pâturages et de cultures pluviales. Les modifications exercées sur les paysages agricoles des dépressions ont participé à l'effondrement des activités traditionnelles et à la déconnexion continue des populations de leur territoire rural. En trois décennies, la superficie des cultures irriguées a été multipliée par plus de cinq dans les dépressions de Guigou et d'Afourgagh, et plus de trois dans les dépressions d'Imouzzer et de dayet Aoua. Cette phase de développement de l'agriculture irriguée a coïncidé avec de longues périodes de sécheresse.

L'intensification de l'irrigation dans un contexte des CC a conduit à une situation très critique des ressources en eau dans le Moyen Atlas tabulaire. Les mesures piézométriques réalisées dans la dépression de Guigou indiquent une baisse remarquable du niveau de la nappe. Le suivi de la superficie des lacs montre qu'ils ont enregistré des fluctuations bien nettes, avec des périodes d'assèchement total. En outre, les débits des oueds et des sources sont fortement influencés par la dégradation quantitative des eaux souterraines. La situation inquiétante des ressources en eau dans le Moyen Atlas a provoqué des changements consécutifs au niveau du système hydro-agricole. Actuellement, la question se pose sur le problème de la résilience des activités agricoles basées sur l'irrigation et leurs capacités d'adaptation aux CC et à l'amplification continue du déficit hydrologique.

Mots clés : Moyen Atlas tabulaire, ressources en eau, changements climatiques, dynamique d'occupation des sols, surfaces irriguées, SIG et télédétection.

Abstract

During the last decades, water resources in the tabular Middle Atlas and its borders are under immense pressure due to climate change (CC) and major changes in land use. The analysis of climate variability and trend shows a brutal drop in precipitation since the 1980s. This is the general trend of decreasing precipitation and increasing numbers of deficit years. In parallel with the decrease in rainfall, the temperature recorded a remarkable increase. These changes in climatic parameters have largely contributed to the perturbation of pluvial agricultural systems and allow to orientate agricultural practices towards irrigation to make agriculture grow during the dry periods of the summer.

The mapping and quantification of land use dynamics in the depressions of the Tabular Middle Atlas between 1985 and 2018 show a progressive evolution of irrigated areas to the detriment of pasture lands and rainfed crops. The changes in the agricultural landscapes of the depressions have contributed to the deterioration of traditional activities and the continued disconnection of populations from their rural territory. In three decades, the area of irrigated crops has increased more than five in the Guigou and Afourgagh depressions, and more than three in the Imouzzer and Dayet Aoua depressions. This phase of development of irrigated agriculture coincided with long periods of drought.

The intensification of irrigation in a context of CC has led to a very critical situation of water resources in the Tabular Middle Atlas and its borders. The piezometric measurements carried out in the depression of Guigou indicate a remarkable drop in the level of the water table. The monitoring of the surface area of the lakes shows that they have recorded clear fluctuations, with periods of total drying up. In addition, the flows of wadis and springs are strongly influenced by the quantitative degradation of groundwater. The worrying situation of water resources in the Middle Atlas has caused consequent changes in the hydro-agricultural system. Currently, the question arises about the resilience of agricultural activities based on irrigation and their capacity to adapt to CC and the continuous amplification of the hydrological deficit.

Keywords : Tabular Middle Atlas, water resources, climate change, land use dynamics, irrigated areas, GIS and remote sensing.

ملخص

خلال العقود الأخيرة، تعرضت الموارد المائية بالأطلس المتوسط الهضبي وهوامشه لضغوطات كبيرة تحت تأثير التغيرات المناخية وتغير أنماط استعمال الأراضي. وقد أظهر تحليل المعطيات المناخية انخفاضاً حاداً في كمية التساقطات المطرية منذ ثمانينيات القرن الماضي، وارتفاع عدد سنوات العجز المطري. بالموازات مع ذلك سجلت درجات الحرارة ارتفاعاً ملحوظاً. وقد ساهمت هذه التغيرات في المؤشرات المناخية إلى حد كبير في اضطراب الأنظمة الفلاحية التي تعتمد على التساقطات وعملت على توجيه الأنشطة الزراعية نحو الري لضمان استمرارية الزراعة خلال فترات الصيف الجافة.

أظهر العمل الخرائطي والتقييم الكمي لديناميات استخدام الأراضي في منخفضات الأطلس المتوسط الهضبي بين عامي 1985 و2018 تطوراً تدريجياً في مساحة الأراضي المسقية على حساب المراعي وأراضي الفلاحة الموسمية. وقد أدت التغيرات التي عرفت المشاهد الزراعية في المنخفضات إلى تراجع الأنشطة التقليدية وتراجع ارتباط السكان بأراضيهم الزراعية. فخلال ثلاثة عقود الأخيرة، تضاعفت المساحة المسقية أكثر من خمس مرات في منخفضات كيكو وأفورغاع، وأكثر من ثلاث مرات في منخفضات إيموزار وضاية عوا. وتزامن هذا التزايد في مساحة الزراعات المسقية مع فترات طويلة من الجفاف.

أدى تكثيف الري في سياق التغيرات المناخية إلى وضع حرج للموارد المائية في الأطلس المتوسط الهضبي وهوامشه. حيث تشير القياسات البيزومترية التي أجريت في منخفض كيكو إلى تراجع ملحوظ في مستوى الفرشة الجوفية. كما يظهر تتبع الضايات/البحيرات أنها عرفت تغيرات واضحة في مساحاتها، مع تسجيل فترات من الجفاف الكلي. بالإضافة إلى ذلك، تأثر صبيب الوديان والعيون بشكل كبير بسبب انخفاض مستوى المياه الجوفية. وقد تسبب الوضع المقلق الذي بلغته لموارد المائية في الأطلس المتوسط في حدوث تغييرات متتالية في الأنظمة الزراعية. حالياً، يطرح التساؤل حول مدى مرونة الأنشطة الزراعية القائمة على السقي وقدرتها على التكيف مع التغيرات المناخية والعجز الهيدرولوجي المستمر.

الكلمات المفتاحية: الأطلس المتوسط الهضبي، الموارد المائية، التغيرات المناخية، دينامية استخدام الأراضي، المجالات المسقية، نظم المعلومات الجغرافية والاستشعار عن بعد.

INTRODUCTION

GENERALE

Introduction générale

L'occupation des sols (Land Cover) est classée par le programme Global Climate Observing System parmi les variables climatiques essentielles (GCOS, 2016). Durant les dernières décennies, la dynamique d'occupation des sols a fait l'objet de nombreuses études aux échelles internationale, nationale, régionale et locale (Chaves et al., 2020 ; Masiliunas et al., 2021 ; Ouzemou et al., 2018 ; Xie et Lark, 2021 ; Xu et al., 2022). Globalement, les résultats obtenus par les chercheurs suggèrent une augmentation remarquable des terres cultivées au détriment des forêts et des prairies naturelles (Goldewijk et al., 2017 ; Lemmen, 2009 ; Morrison et al., 2021).

A l'instar d'autres régions du globe, le bassin méditerranéen a enregistré durant les dernières décennies une dynamique socio-économique, spatiale et environnementale (Delgado-Artés et al., 2022). Les montagnes et les milieux ruraux sont considérés parmi les zones les plus touchées par cette dynamique. Les études récemment axées sur la région méditerranéenne montrent l'effondrement général des activités et des systèmes traditionnelles (Delgado-Artés et al., 2022 ; Jiménez-Olivencia et al., 2021 ; Tomaz et al., 2013) et la déconnection continue des populations de ces racines et de leur territoire rural. En outre, plusieurs paysages méditerranéens sont soumis à une pression anthropique croissante et un changement continue au niveau d'occupation des sols (Quintas-Soriano et al., 2022 ; Ruiz et al., 2020). Les principaux aspects des modifications exercées dans les milieux montagnards/ruraux méditerranéens résident dans la régression de la société traditionnelle, l'expansion de l'urbanisation et l'apparition des pratiques modernes d'occupation et d'utilisation des sols.

Globalement, dans un contexte de changement climatique, les mutations socio-économiques et socio-spatiales à l'échelle globale et à l'échelle de la région méditerranéenne ont entraîné d'importantes modifications au niveau des paysages montagnards traditionnels et ont conduit à la dégradation de l'environnement et à l'amplification du déficit hydrologique.

Durant les dernières années, les travaux relatifs à l'étude de l'impact combiné des changements climatiques et de la pression des surfaces agricoles sur les ressources en eau enregistrent une augmentation remarquable (Lyazidi et al., 2020 ; Mendieta-Mendoza et al., 2021 ; Xiong et al.,

2021 ; Yifru et al., 2021 ; Yue et al., 2020). Dans ce contexte, notre travail de recherche tente de comprendre les forces motrices d'évolution des pratiques modernes d'occupation des sols dans les montagnes marocaines et d'évaluer ses conséquences sur les ressources en eau et sur les systèmes hydro-agricoles.

Au Maroc, les milieux montagnards sont très diversifiés et présentent des potentialités naturelles, humaines, historiques et culturelles très variées. Malgré ces caractéristiques, l'intérêt envers cette portion de territoire marocain s'est limité à l'exploitation de ses richesses (Ait-Hamza et Popp, 2005). La marginalisation et la surexploitation des ressources dans les zones montagneuses ont conduit au cours du temps à des problématiques socioéconomiques et environnementales très alarmantes. Il s'agit de l'augmentation du phénomène de l'exode rural vers les villes et l'accélération de la dégradation des ressources sous l'effet des contraintes liées aux aléas climatiques et à la pression anthropique. Pour pallier ces problématiques, le développement des milieux ruraux est devenu une nécessité à partir des années 90 par le lancement des programmes et des stratégies étatiques qui visent la modernisation des techniques de production notamment dans le secteur de l'agriculture irriguée (Firdawcy et Lomri, 2000).

Dans les montagnes marocaines, l'eau est un facteur décisif dans l'installation des populations et dans le développement des territoires. Depuis longtemps, les populations montagnardes tentent de trouver les techniques les plus adaptées aux conditions du milieu pour garantir une gestion efficace de l'eau. Si dans un premier temps, elles ont adopté des aménagements traditionnels pour l'accès et la collecte de l'eau. Aujourd'hui, les techniques de partage, de mobilisation et d'exploitation de la ressource sont totalement différentes. En parallèle avec l'évolution de ces techniques, plusieurs zones montagnardes, marocaines ont enregistré au cours des dernières décennies une extension remarquable des périmètres irrigués, ce qui engendre des modifications paysagères, économiques, environnementales et sociales très profondes (El-Bouhali et al., 2021d,a).

Ce travail porte sur l'étude d'un élément majeur des montagnes marocaines. Il s'intéresse à une grande partie du Moyen Atlas tabulaire. Cette partie du Maroc se caractérise par la diversité de ses paysages et de ses ressources naturelles (sources, lacs, oueds, forêts...). Au cours des dernières décennies, ce territoire est sujet à une série de transformations socio-économiques et

spatiales sous la conjugaison des facteurs naturels et anthropiques. Les aspects de ses grandes transformations résident dans la régression des pratiques traditionnelles d'occupation et d'utilisation des sols et l'intensification des activités agricoles basées essentiellement sur l'irrigation dans un contexte des changements climatiques. Ces changements (d'occupation des sols et des paramètres climatiques) ont provoqué une forte pression sur les ressources en eau.

En fonction de la problématique qui se situe à l'interface de la société et de l'environnement, cette thèse est structurée en trois parties :

> **La première partie** est dédiée à la présentation du cadre général de la thèse. Dans le premier chapitre, nous avons abordé la problématique, les objectifs, la méthodologie et les données utilisées pour la réalisation de ce travail. Dans le deuxième chapitre, une présentation détaillée du contexte physique (climat, lithologie, topographie, ...) comme élément catalyseur dans l'évolution des terres agricoles et notamment des surfaces irriguées dans les dépressions du Moyen Atlas. Le troisième chapitre est réservé à l'analyse des facteurs socio-économiques et historiques responsables des modifications de l'occupation des sols et des grandes mutations paysagères dans le Moyen Atlas.

> **La deuxième partie** est réservée à l'étude de la dynamique d'occupation du sol à l'échelle des dépressions du Moyen Atlas tabulaire. En premier lieu, une méthodologie détaillée pour la cartographie et la quantification d'occupation des sols est présentée. Les chapitres 5, 6 et 7, exposent les résultats obtenus à partir du traitement des images satellites multispectrales dans trois dépressions (dépression de Guigou, dépressions d'Imouzzer et de dayet Aoua, dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer).

> **La troisième partie** est consacrée à l'analyse de la tendance des variables climatiques comme éléments principaux pour la compréhension de la dégradation quantitative actuelle des ressources en eau dans le Moyen Atlas tabulaire. Le neuvième chapitre présente la méthodologie et les résultats de spatialisation des pluies et des étages bioclimatiques sur l'ensemble de la zone d'étude d'une part, et la comparaison entre les produits des précipitations (mesures/satellites) d'autre part. Le dernier chapitre (chapitre 10) de cette partie expose l'impact des changements climatiques et de la dynamique des surfaces irriguées sur les ressources en

eau (lacs, nappes souterraines, sources et oueds) et sur le système hydro-agricole.

Les objectifs soulignés dans cette étude sont abordés par l'utilisation des données multi-sources et multi-dates (images satellitaires, données climatiques, travail de terrain, ...) et le suivi d'une méthodologie multidisciplinaire. Le traitement des différents types de données et l'application des étapes méthodologiques sont facilités par l'utilisation des outils statistiques, des systèmes d'information géographique et de la télédétection.

PREMIERE PARTIE

**CADRE GENERAL DE LA DYNAMIQUE ACTUELLE D'OCCUPATION
DES SOLS DANS LE MOYEN ATLAS TABULAIRE**

CHAPITRE 1 : CADRE GENERAL DE LA THESE, ETAT DE L'ART ET DÉMARCHE MÉTHODOLOGIQUE

CHAPITRE 2 : UN CONTEXTE PHYSIQUE PROPICE À L'ÉVOLUTION DES SURFACES AGRICOLES DANS LE MOYEN ATLAS TABULAIRE

CHAPITRE 3 : LE CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUES DE DÉVELOPPEMENT DES SURFACES AGRICOLES

Introduction de la première partie

La compréhension de la dynamique actuelle d'occupation des sols en général et des surfaces irriguées en particulier nécessite de construire une méthodologie robuste et une analyse approfondie des facteurs intervenant dans cette dynamique. La première partie de ce travail porte sur l'étude des éléments de base pour comprendre la dynamique d'occupation des sols dans le Moyen Atlas tabulaire. Il s'agit de placer notre travail de recherche dans son contexte scientifique d'une part et une analyse détaillée des caractéristiques physiques et socio-économiques d'autre part. Pour atteindre ces objectifs, cette partie est organisée en trois chapitres.

Le premier chapitre permet de situer notre travail dans le cadre scientifique. Dans un premier temps, nous avons placé notre travail dans le cadre de l'action intégrée franco-marocaine du PHC Toubkal et dans un deuxième temps une étude bibliographique est réalisée pour comprendre les caractéristiques de la zone d'étude afin d'orienter la problématique de recherche vers l'originalité et de déterminer une méthodologie adéquate et capable de répondre aux objectifs.

Le deuxième chapitre fait le point sur les caractéristiques lithologiques, géologiques, topographiques et hydro-climatiques comme des éléments/facteurs clés pour le développement et de l'extension des surfaces agricoles irriguées dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire.

Le troisième chapitre présente les facteurs socio-économiques responsables du déclenchement de la dynamique de l'agriculture à l'échelle du Maroc et du Moyen Atlas. Ainsi, les grandes phases d'évolution de l'agriculture au Maroc ont été abordées sur la base d'une étude bibliographique.

CHAPITRE 1

Chapitre 1 : cadre général de la thèse, état de l'art et démarche méthodologique

Introduction

Le premier chapitre est consacré à la présentation du cadre général de la thèse, suivie par une étude bibliographique des travaux relatifs à la problématique de recherche. Enfin, les objectifs, la méthodologie et la zone d'étude seront explicités.

1. Cadre de la thèse

Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet PHC Toubkal, "sources, ressources et mutations récentes des paysages du Moyen Atlas, Maroc (SRMRPMA)" établi entre l'université de Lorraine, Metz - France et l'université Sidi Mohamed Ben Abdallah, Fès - Maroc. Le projet de recherche SRMRPMA fait suite à des travaux réalisés dans le cadre d'actions intégrées franco-marocaines effectuées depuis la fin des années 1990 (Nejjari, 2002 ; Qadem, 2015) liant les mêmes laboratoires. Les premiers travaux se sont essentiellement focalisés sur l'hydrologie du Haut Sebou dans le Moyen Atlas et l'étude des précipitations.

Le présent projet « *SRMRPMA* » s'intéresse aux mutations paysagères récentes et à l'étude de la tendance des paramètres climatiques afin de mettre en évidence leurs impacts sur les ressources en eau dans le Moyen Atlas. Afin d'atteindre les objectifs du projet qui se situe à l'interface société-environnement, nous avons utilisé plusieurs sources d'informations à savoir les données de terrain, les données climatiques, les données hydrologiques, les recensements des populations, et l'exploitation d'énormes archives des images satellites (Landsat, Sentinel, CORONA, TRMM, GPM...).

2. État de l'art

Dans ce travail, l'étude bibliographique concerne tous les documents et sources d'informations relatives à notre problématique. Cette étude a été menée dans deux directions. La première a porté sur l'objet géographique Moyen Atlas dans le but d'identifier ces principales caractéristiques et pour faire une synthèse des études réalisées. La deuxième direction, thématique, s'est intéressée dans un premier temps aux travaux sur les méthodes de télédétection appliquée à la dynamique d'occupation et d'utilisation des sols. Dans un deuxième temps, la bibliographie a porté également sur les aspects hydro-climatiques. Ces différents corpus ont constitué une base pour l'orientation des travaux de la thèse et pour construire une méthodologie adéquate pour répondre aux objectifs définis.

2.1. Le Moyen Atlas

Grâce à sa position stratégique, « château d'eau du Maroc », le Moyen Atlas a fait l'objet de nombreuses études dans différents domaines inhérents à l'eau : géologie, hydrologie, végétation, climat et occupation des sols.

> **Les études géologiques** : Le contexte géologique du Moyen Atlas est très bien documenté par de nombreux travaux depuis le début du XXème siècle (Benabid, 2000 ; Charrière et al., 2011,? ; Colo, 1961 ; Detriche, 2007 ; Fedan, 1978 ; Louis, 1912 ; Martin, 1981 ; Michard, 1976 ; Nicod, 1997 ; Pique, 1994 ; Sabaoui, 1998 ; Termier, 1937 ; Zeryouhi, 1977). Ces études fournissent des informations détaillées pour comprendre la géologie du Moyen Atlas. En effet, l'étude des caractéristiques géologiques dans le Moyen Atlas en général et dans la zone d'étude en particulier constitue une base solide pour expliquer la dynamique actuelle des terres agricoles irriguées.

> **Les études hydrologiques et climatiques** : De point de vue hydrologique, le Moyen Atlas se caractérise par un réservoir karstique important qui alimente les principales cours d'eau du Maroc (oued Oum Er-Rbia, oued Sebou, oued Moulouya, oued Beht,...), les sources (Ain Bittit, Ain Ribaa, Ain Tit Zill,...) et les Lacs (dayet Aoua, dayet Ifrah, dayet Afourgagh,...). De cette diversité, le Moyen Atlas tire son originalité comme « *château d'eau* ». Vu son importance en terme de ressources en eau, cette partie du Maroc a fait l'objet d'un intérêt accru par les

chercheurs (Akdim et al., 2011 ; Amraoui, 2005 ; Bekkari, 2009 ; Chilasse, 2004 ; Devos et Nejjari, 1998 ; Gille et al., 2000 ; Mazoz, 2015 ; Nejjari, 2002 ; Obda, 2004 ; Obda et al., 2000 ; Qadem, 2015 ; Sayad et al., 2011). Ces travaux ont porté sur les différentes thématiques relatives aux ressources en eau à savoir : l'étude de la variabilité spatio-temporelle des débits (sources et oueds), la variation de niveau des lacs et des nappes phréatiques, la non-stationnarité des variables climatiques et le système hydro-agricole. D'autres travaux se sont intéressés à la combinaison des facteurs naturels et anthropiques (la succession des années pluviales et pression sur la source) comme moteur de la dégradation des zones humides (lacs) à haute valeur écologique.

> **Végétation naturelle** : Le Moyen Atlas est également caractérisé par la richesse des écosystèmes forestiers. En effet, les différentes essences forestières (chêne vert, cèdre, chêne zeen, pins et chêne liège,...) s'étalent sur une large superficie et occupent une place très importante sur le plan écologique, socio-économique et patrimonial. Selon Emberger (1939), le Moyen Atlas appartient au climat méditerranéen pour une très large part dans ses nuances particulièrement propices au Chêne vert et au Cèdre. Les travaux menés dans ce cadre (Achhal et al., 1979 ; Benabid, 1988, 2000 ; Emberger, 1938, 1939 ; Labhar, 1998 ; Labhar et Lebaut, 2012 ; Lecompte, 1986 ; Mohajane et al., 2017 ; Pujos, 1966 ; Rhanem, 2011 ; Till, 1986) mettent en évidence la répartition spatiale des espèces forestières, l'importance des forêts dans la régularisation du climat et leur valeur économique et écologique. En outre, certains auteurs ont étudié les forêts du Moyen Atlas comme un détecteur des changements climatiques et de la pression anthropique. Cela a été démontré par la dégradation continue des espèces forestières et notamment le cèdre.

> **Occupation des sols** : les travaux relatifs à l'étude de l'occupation des sols dans le Moyen Atlas sont rares, à l'exception de quelques uns qui ont traité cette problématique partiellement (Amyay et al., 2000 ; Badidi, 1995 ; Jennan, 1986, 2004 ; Tag et Loew, 2000). Un constat commun identifie toutefois le Moyen Atlas comme étant autrefois une terre de pâturage avec une agriculture pluviale limitée. L'irrigation se pratiquait essentiellement le long des oueds et à proximité des ressources en eau en exploitant les eaux de surface à l'aide de techniques traditionnelles (ouvrages de dérivation des eaux «séguias»). Actuellement, le Moyen Atlas est

empreint de mutations socio-spatiales importantes, résultats de la combinaison de plusieurs facteurs. Les différents aspects de ces mutations récentes dans le Moyen Atlas et leurs impacts sur les ressources en eau seront étudiés dans ce travail.

L'étude bibliographique révèle finalement que peu de travaux ont porté sur l'étude de l'impact combiné de la dynamique d'occupation des sols et de la tendance climatique (sécheresse) sur les ressources en eau dans le Moyen Atlas.

2.2. Cartographie d'occupation des sols

La télédétection et les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) sont apparus comme des outils puissants et efficaces pour produire des cartes d'occupation des sols et pour suivre l'évolution des terres irriguées dans de nombreux endroits à travers le monde, et dans diverses conditions environnementales (Alexandridis et al., 2008 ; Thenkabail et al., 2009, 2005 ; Xie et Lark, 2021). L'évolution de ces techniques a contribué à une augmentation très soutenue des publications dans le domaine de la cartographie d'occupation et d'utilisation des sols (Chance et al., 2018 ; Czekajlo et al., 2021 ; Dutrieux et al., 2016 ; Liu et al., 2018 ; Maselli et al., 2020 ; Vieira et al., 2012). La consultation des bases de données internationale montre le nombre considérable d'études qui se basent sur l'utilisation des séries temporelles des images satellites à des échelles différentes, locale, régionale et continentale (Belgiu et Csillik, 2018 ; Bhatnagar et al., 2020 ; Bian et al., 2020 ; Bretreger et al., 2020 ; Chaves et al., 2020 ; Maselli et al., 2020 ; Ouzemou et al., 2018 ; Pervez et al., 2014 ; Vogels et al., 2019 ; Wang et al., 2020 ; Xu et al., 2020 ; Zhang et al., 2020). Parallèlement à l'augmentation de la diffusion des images satellites on a assisté au développement des algorithmes de traitement et d'extraction des informations à partir des images bruts (SVM, RF, ML...). Ces algorithmes de classification des images satellites, Support Vector Machine (SVM), Random Forest (RF) et Maximum Likelihood (ML), ont connu une large application à l'échelle mondiale (Ahmadi et al., 2020 ; Belgiu et Drăguț, 2016 ; Chen et al., 2018 ; Htitiou et al., 2019 ; Khatami et al., 2016 ; Kumar-Sharma et al., 2018 ; Mountrakis et al., 2011 ; Pelletier et al., 2016 ; Rana et Venkata-Suryanarayana, 2020 ; Rodriguez-Galiano et al., 2012). La plupart des travaux en télédétection utilisent les images satellites pour étudier l'occupation des sols dans sa globalité mais peu incluent explicitement l'irrigation comme une classe distincte (Xie et Lark, 2021). Et selon Ozdogan et al.

(2010) les études qui ont utilisé la télédétection pour cartographier les terres irriguées restent relativement rares, par rapport aux milliers d'articles qui ont étudié la couverture terrestre.

Ces dernières années, l'utilisation des images satellites pour cartographier l'occupation des sols est facilitée par le libre accès aux archives satellitaires Landsat, MODIS, Sentinel et récemment SPOT. Mais les images satellites issues des archives Landsat sont parmi les plus utilisées dans les études relatives à la cartographie des surfaces terrestres (Ozdogan et al., 2010). Généralement, l'extraction des informations à partir des images satellites se fait par l'application des méthodes de classification supervisée et non-supervisée (Clustering) ce qui permet de regrouper les pixels similaires dans une même classe (étiquette). Ces méthodes sont très utilisées dans le domaine de la cartographie d'occupation du sol et des différentes composantes de la surface terrestre (Blaschke, 2010 ; Churches et al., 2014 ; Mao et al., 2020 ; Steinhausen et al., 2018 ; Xu et al., 2020).

Les méthodes employées pour l'extraction de l'information à partir des images satellites varient d'un chercheur à l'autre en fonction des objectifs recherchés et des caractéristiques de la zone étudiée. Un grand nombre d'auteurs utilise les indices dérivés des images satellites comme le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) et le SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) pour distinguer les cultures irriguées, les forêts et les autres classes d'occupation des sols (Maxwell et Sylvester, 2012 ; Nasser-Mohamed-Eid et al., 2020 ; Pervez et al., 2014 ; Rhyma et al., 2020 ; Saadi et al., 2015 ; Zheng et al., 2015). D'autres chercheurs ont privilégié les méthodes de classification supervisée couramment utilisées pour traiter les données de télédétection à savoir SVM, RF, ML... (Deines et al., 2019 ; Ihuoma et al., 2021 ; Pageot et al., 2020 ; Ren et al., 2021 ; Xie et Lark, 2021 ; Xie et al., 2019 ; Zurqani et al., 2021). La cartographie et la quantification de la dynamique d'occupation des sols en général et des cultures irriguées en particulier à partir des images satellites constituent une base pour la mise en place d'une politique de gestion durable des ressources naturelles et notamment les ressources en eau. Ainsi, les images satellites aient montré tout leur potentiel dans le suivi de l'évolution des surfaces irriguées et d'occupation des sols à différentes échelles.

3. Problématique

Actuellement, l'étude de la dynamique des différents états de surface en général et celle des cultures en particulier est un enjeu de société, car elle permet de mettre en évidence soit l'érosion de la biodiversité soit les pressions sur les ressources. À l'échelle mondiale, plusieurs études montrent l'évolution d'occupation des sols sur des siècles à partir d'une base de données historique de l'environnement global HYDE (History Database of the Global Environment) (Goldewijk et al., 2017 ; Goldewijk, 2001 ; Hurtt et al., 2020 ; Lemmen, 2009 ; Morrison et al., 2021). Les résultats obtenus suggèrent une augmentation globale de la superficie des terres cultivées au détriment des prairies naturelles et des forêts. Selon Goldewijk (2001), la superficie des terres cultivées augmente de 265 millions d'ha en 1700 à 1471 millions d'ha en 1990, tandis que la superficie des pâturages a plus que sextuplé de 524 à 3451 millions d'ha. La modélisation du système terrestre montre que les changements d'origine anthropique de la couverture terrestre ont influencé le climat régional et mondial (Morrison et al., 2021). Dans le bassin méditerranéen, l'augmentation des surfaces agricoles dans un contexte de changements globaux et d'urbanisation a provoqué une régression ou dégradation des zones humides ; elles ont perdu au cours du XXème siècle 50 % de leur superficie (Beltrame et al., 2015).

L'étude de la dynamique de l'agriculture et de l'occupation des sols durant les dernières décennies fait l'objet d'une attention croissante à différents niveaux, international, national, régional et local. À l'échelle mondiale, la combinaison de plusieurs facteurs, technologiques politiques, économiques... modifient largement l'agriculture (Roetter et al., 2007). Ainsi, le développement de l'agriculture a été considéré comme élément majeur dans la structuration et l'amélioration de l'économie, mais le rythme de développement a été, et reste encore, très variable d'un pays à l'autre (Bertheliet Lipchitz, 2005).

Au Maroc, le suivi de la trajectoire de la dynamique d'occupation des sols montre une extension remarquable des terres agricoles sous l'effet de l'interaction de plusieurs facteurs. Dans un premier temps, l'agriculture s'est essentiellement basée sur les précipitations (cultures en bour ou pluviales) et a été pratiquée sur de grandes surfaces. Mais il s'agit d'une agriculture très vulnérable aux aléas climatiques. L'intervention de l'État dans le secteur agricole a favorisé l'amélioration des cultures en bour et le développement des périmètres irrigués dans les

grandes plaines (Gharb, Chaouïa, Abda, Doukkala, etc.) et dans les milieux montagnards. Les transformations actuelles d'occupation et d'utilisation des sols dans les montagnes marocaines sont considérées parmi les facteurs explicatifs des problèmes environnementaux rencontrés aujourd'hui dans ces territoires.

Situé à l'interface société-environnement, ce travail vise l'étude de l'impact combiné des déficits pluviométriques et des mutations paysagères, marquées essentiellement par l'extension des surfaces irriguées, sur les ressources en eau dans les dépressions intra-montagnardes du Moyen Atlas tabulaire (dépression de Guigou, dépressions d'Imouzzet et de dayet Aoua, dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer). En effet, la préservation des ressources en eau constitue l'une des composantes de la stratégie de gestion et du développement durable des activités humaines. L'exploitation abusive des ressources en eau dans le Moyen Atlas « *château d'eau du Maroc* » modifie largement les structures paysagères et entraîne d'importantes perturbations au niveau du système hydrologique : prélèvements croissants d'eau à partir des cours d'eau et des nappes induisant un déséquilibre marqué et durable de ces ressources hydriques.

Face à ces problèmes, il est nécessaire d'établir un constat des grandes transformations actuelles au niveau d'occupation des sols à l'échelle des dépressions du Moyen Atlas tabulaire, afin d'identifier leur impact sur les ressources en eau et les limites à l'expansion des surfaces irriguées pour garantir la pérennité de cette ressource.

4. Objectifs de la recherche

L'occupation des sols ou couvertures terrestres (Land Cover), débit des rivières, eaux souterraines, lacs, précipitations et température sont classés par le programme Global Climate Observing System (GCOS) parmi les variables climatiques essentielles (VCE). Ce groupe de variables contribue de manière critique à la caractérisation du climat de la terre (GCOS, 2016) et fournit des informations nécessaires pour comprendre et prédire l'évolution du climat d'une part, et pour orienter les mesures d'adaptation d'autre part. Au vu de notre problématique qui combine l'impact de la dynamique d'occupation des sols et de la tendance du climat vers la sécheresse sur les ressources en eau, nous avons souligné les objectifs ci-après :

1 > La détermination des forces motrices responsables du déclenchement de la dynamique

actuelle des surfaces agricoles dans les dépressions du Moyen Atlas.

2 > La cartographie et la quantification de la dynamique d'occupation des sols dans trois secteurs intra-montagnards du Moyen Atlas tabulaire entre 1985 et 2018.

3 > l'analyse de la tendance des variables climatiques (précipitations et température) sur le Moyen Atlas et ses bordures.

4 > La mise en évidence de la pression anthropique et du climat sur les ressources en eau (superficielles et souterraines) et sur le système hydro-agricole.

Atteindre ces objectifs nécessite de suivre une méthodologie précise afin de traiter, d'analyser et de critiquer les différents types de données multi-sources.

5. Méthodologie et données

La détermination d'une méthodologie adéquate permet d'orienter les travaux de recherche et d'atteindre les objectifs définis précédemment.

5.1. Collecte et organisation des données

La collecte et l'organisation des données constituent une étape primordiale. Elle concerne toutes les sources d'informations disponibles et accessibles : références bibliographiques, travaux de terrain (mesures piézométriques, photos, enquêtes auprès des populations...), données géologiques (carte géologique du Maroc, carte néotectonique), données de télédétection (images CORONA, Landsat, Sentinel, MODIS...), données climatiques (précipitations et températures), hydrologiques (débits des sources et des oueds) et topographiques (MNT, cartes topographiques). Cette étape est suivie par l'organisation des différents types de données (fiche de lecture, tableaux de données...) afin de les exploiter plus facilement. Les tableaux 1.1 et 1.2 montrent les principales données utilisées dans le cadre de ce travail.

5.2. Travail de terrain

Durant les dernières décennies, le travail de terrain en géographie témoigne d'un intérêt croissant (Verne, 2012), et selon Claval (2013) « le terrain fournit au géographe une garantie de l'au-

thenticité des données qu'il mobilise; il lui permet d'appréhender les structures de l'espace qu'il étudie et les divisions qui le caractérisent ».

Données	Source	Période/date	Données dérivées
Images satellites CORONA KH-4B	USGS	1972	> L'identification de la situation de référence d'occupation et d'utilisation des sols
Images satellites Landsat TM, OLI et OLI-2	USGS	1984 - 2022	> Le suivi de la réflectance spectrale. -La réalisation d'une étude diachronique d'occupation des sols dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire et la spatialisation des surfaces irriguées. > l'étude de la variation spatiotemporelle des lacs.
Images satellites Sentinel 1	ESA	2018	> La réalisation du modèle numérique de terrain (MNT) à haute résolution (10m)
Images satellites Sentinel 2	ESA	2018	> La réalisation du travail de terrain et la localisation des différents types des cultures et états de surfaces
Images satellites TRRM et GPM	USGS	1999 - 2017	> L'extraction des données des précipitations à l'échelle du Moyen Atlas et ses bordures (précipitations mensuelles et annuelles)

TABLEAU 1.1. Données de télédétection multi-sources utilisées

Dans notre approche, le travail de terrain constitue un élément central, car il fournit des données précises sur la thématique qui combine l'impact des changements climatiques (déficits pluviométriques cumulés) et des transformations d'occupation et d'utilisation des sols sur les ressources en eau. La mise en évidence des grandes modifications paysagères et des modes d'utilisation de l'eau dans les dépressions du Moyen Atlas a nécessité d'arpenter l'ensemble des sites d'étude. Entre 2018 et 2021, nous avons effectué plusieurs campagnes de terrain, avec

les objectifs suivants :

» Identification et relevés des variétés de cultures et types d'occupation des sols et transposition sur les images (fig. 1.1). Ces informations ont servi à l'élaboration d'une banque de signatures spectrales mobilisées dans les procédures de classification supervisée d'images satellites pour la cartographie diachronique de l'affectation d'occupation des sols. Les différents modes et pratiques d'irrigation ont été également relevés, soit directement par repérage soit auprès des agriculteurs locaux par entretiens directs.

Données	Source	Période/date	Données dérivées
Climatiques : précipitations et température	ABHS	P. 1914- 2017 T. 1961- 2020	> La validation des précipitations satellitaires TRMM et GPM > L'analyse de la tendance du climat sur la zone d'étude > Évaluation des étages bioclimatiques
Q des sources des oueds	ABHS	1956-2018	> La mise en évidence de la tendance du climat vers la sécheresse et la pression de l'extension des surfaces irriguées sur les ressources en eau
Populations	HCP	1982 - 2014	> L'étude de son impact sur les milieux naturels

TABLEAU 1.2. Données utilisées

À partir des données collectées sur le terrain, des calendriers agricoles ont été élaboré afin de lister les différentes cultures existantes sur le secteur et l'évolution des états de surface durant l'année. Ces calendriers ont été utilisé pour sélectionner les dates des images satellites favorables à l'identification et à la distinction des différents types de cultures au moment des prises de vue, et pour la détermination de la nomenclature des cartes d'occupation du sol.

» Réalisation d'une campagne de levés piézométriques (photos 1.1 et photo 1.2 *infig. 1.2*) dans la dépression de Guigou pour avoir une mesure tangible du changement récent de l'état de la ressource en eau souterraine. En parallèle, des entretiens ont été réalisés avec les populations pour identifier les éventuels changements du niveau de la nappe.

Les sorties consécutives sur le terrain nous ont permis de découvrir les caractéristiques des

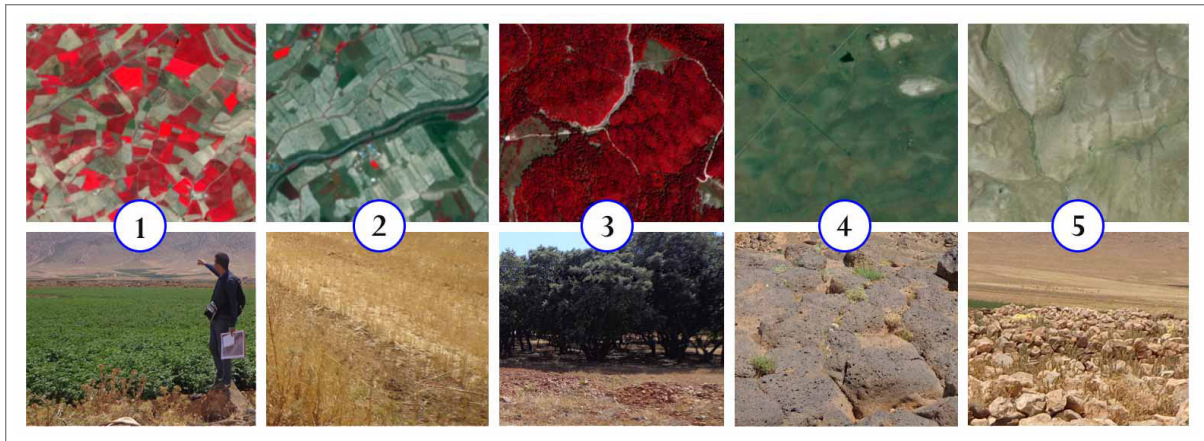


FIGURE 1.1. Les échantillons d'occupation des sols dans la zone d'étude

Comparaison entre le terrain et l'image satellite Sentinel 2 (août 2018). 1 : Cultures irriguées; 2 : Cultures pluviales; 3 : Forêts; 4 : Terrains basaltiques; 5 : Terrains calcaires.

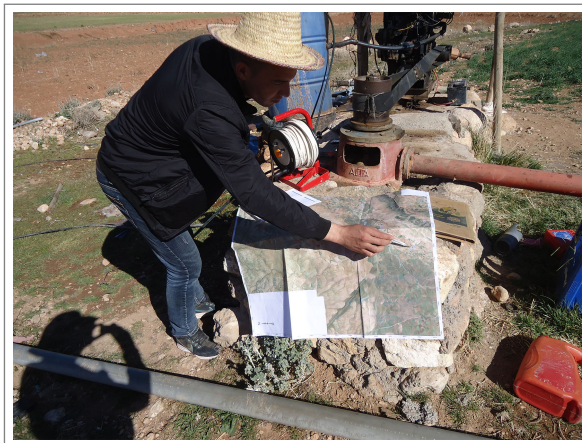


Photo 1.1. Réalisation des mesures et localisation des puits dans la dépression de Guigou



Photo 1.2. Récupération d'une sonde piézométrique

FIGURE 1.2. Travail de terrain dans la dépression de Guigou, mars 2020

dépressions du Moyen Atlas tabulaire. Ainsi, les observations de terrain mettent en évidence la variété des cultures (irriguées et pluviales), les techniques utilisées pour l'irrigation et la situation actuelle des ressources en eau (superficielles et souterraines). Le travail de terrain a constitué également la base pour le traitement des images satellites; de l'échantillonnage des classes d'occupation des sols jusqu'à la validation des résultats.

5.3. L'extraction des données de télédétection

L'extraction des informations à partir des images issues des archives satellitaires (Landsat, Sentinel, TRMM, GPM, MODIS) constitue une source de données fondamentale. L'acquisition et le traitement de ces différents types de données exigent la maîtrise d'un certain nombre de

logiciels spécifiques et une connaissance des méthodes de traitement des images satellitaires.

L'extraction des classes d'occupation des sols : cette étude propose une méthodologie pour cartographier et quantifier la dynamique d'occupation des sols dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire entre 1985 et 2018. Elle se base sur la combinaison du travail de terrain et de l'utilisation des données de télédétection Landsat TM (Thematic Mapper) et OLI (Operational Land Imager). L'extraction de l'information à partir des images satellites Landsat sur plus de trois décennies a commencé par la collecte des données à partir du terrain (données d'apprentissages, types des cultures, calendriers agricoles...) suivi par le prétraitement des images satellites et l'étude de l'évolution de la réflectance spectrale et enfin, la classification des différentes classes d'occupation des sols par la méthode qui se base sur le principe de l'apprentissage automatique (Machine Learning).

L'extraction des données climatiques : L'extraction des données de précipitations a été faite à partir des images satellites GPM 3IMERGM V6 (Global Precipitation Measurement) et TRMM 3B43V7 (Tropical Rainfall Measuring Mission), afin de les comparer avec les données mesurées aux stations dans le Moyen Atlas et ses bordures et à un modèle de quantification spatiale des précipitations. Dans cette partie, nous avons présenté d'une manière générale la méthodologie suivie pour choisir et extraire les données de télédétection. Dans les parties suivantes, une méthodologie détaillée sera développée pour chaque type de données.

6. La zone d'étude

Les montagnes occupent une place très importante dans la géographie du Maroc (fig. 3.A *in* fig. 1.3). Les chaînes de montagnes marocaines (Haut Atlas, Moyen Atlas, Anti Atlas et le Rif) se distinguent par une riche diversité de point de vue écologique, paysagère, historique et culturelle. Au cours des dernières décennies, elles ont enregistré une dynamique socio-spatiale très forte marquée essentiellement par l'extension des terres agricoles. Ce travail porte sur l'étude d'un secteur stratégique des montagnes marocaines. Il s'intéresse à l'étude d'une grande partie du Moyen Atlas tabulaire.

Géographiquement, la zone d'étude est située dans le Moyen Atlas tabulaire (fig. 1.3). Elle s'étale sur une superficie d'environ 3744 km², délimitée au Nord par la plaine de Saïs, au Sud

par l'Accident Nord moyen Atlasique (ANMA) qui sépare le Moyen Atlas tabulaire et le Moyen Atlas plissé, à l'Ouest par la plaine de Tigrigra et à l'Est par oued Sebou. Administrativement, elle s'étend sur quatre provinces (Ifrane, Boulmane, Sefrou et El Hajeb).

Par sa situation géographique dans le Moyen Atlas tabulaire qui constitue une des principales chaînes des montagnes marocaines, elle est caractérisée par la dominance des formations à fort coefficient d'emménagement qui en fait le principal « *château d'eau* » du Maroc. Cela favorise l'abondance des ressources en eaux superficielles et souterraines (oueds, sources, lacs et nappes souterraines).

Le Moyen Atlas tabulaire constitue un milieu important pour mesurer la tendance actuelle d'occupation et d'utilisation des sols dans un contexte de changements globaux et d'étudier les ressources en eau comme éléments naturels identitaires de cette partie du Maroc.

Comme d'autres régions montagnardes, la zone d'étude a enregistré au cours des dernières décennies des modifications paysagères, sociales et environnementales très profondes sous l'effet de la combinaison de multiples facteurs d'ordre naturel et anthropique. Les principaux aspects des grandes transformations résident dans le développement et l'extension des cultures irriguées et la régression des aires de pâturages (terrains basaltiques, terrains calcaires...) et les terres des cultures pluviales. Ainsi, depuis plusieurs années, le territoire connaît une régression très remarquable de la société traditionnelle qui a cédé la place au développement des périmètres agricoles. En effet, il est passé :

> D'une économie basée sur des techniques traditionnelles d'irrigation des cultures sur les terrasses des oueds à une société qui exploite de nouvelles techniques puisant l'eau dans des puits à des profondeurs qui dépassent souvent une centaine de mètres,

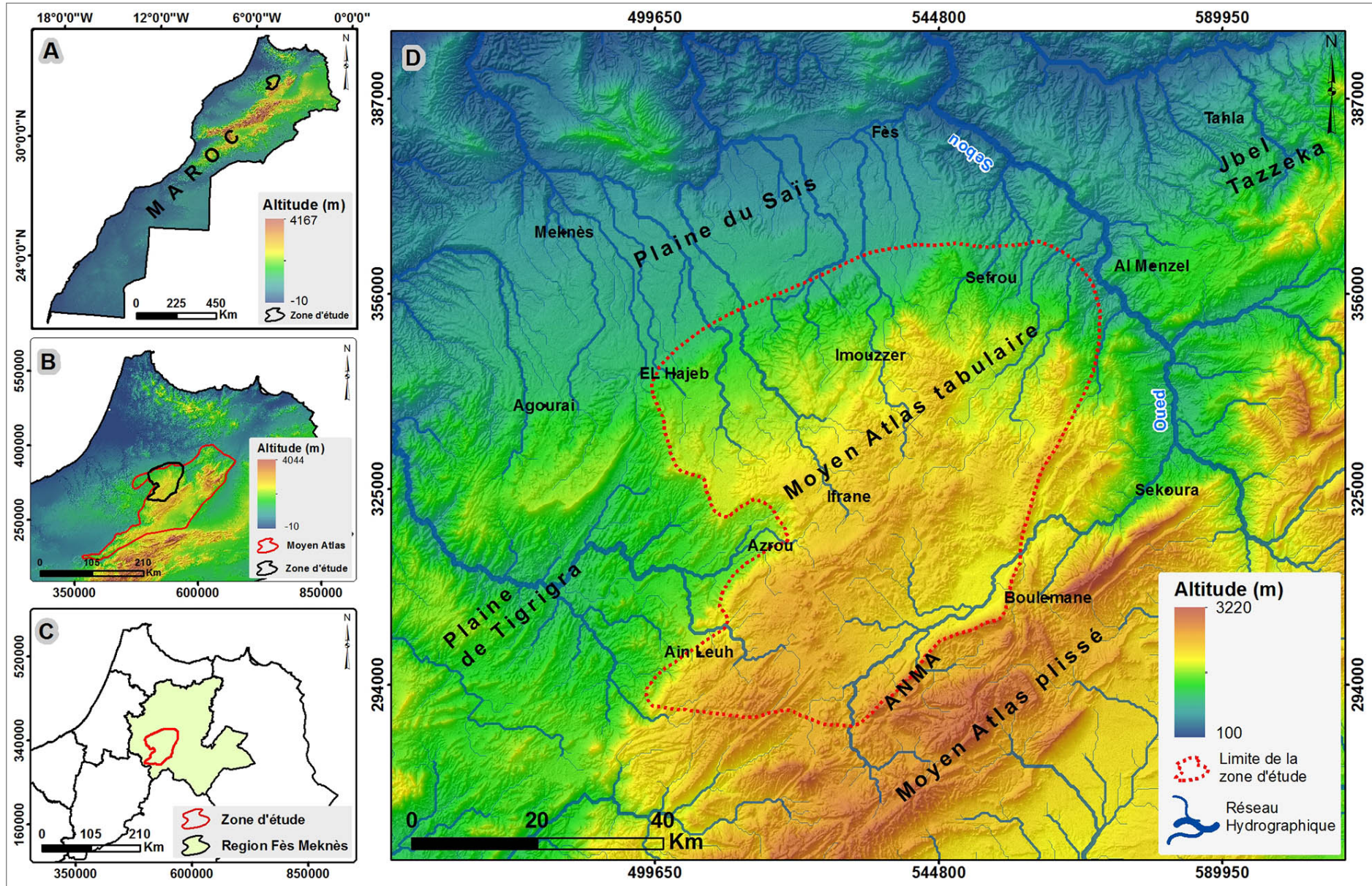


FIGURE 1.3. Situation géographique et administrative de la zone d'étude

A : situation de zone d'étude à l'échelle du Maroc ; B : localisation de la zone d'étude à l'échelle du Moyen Atlas ; C : situation de la zone d'étude à l'échelle de la région Fès-Meknès ; D : la zone d'étude

> D'une économie locale basée sur le pastoralisme à une économie basée sur l'agriculture évoluée associée à l'élevage.

Il est indéniable que ces grandes transformations socio-économiques ont d'ores et déjà un impact conséquent sur les ressources en eau notamment souterraines, en même temps qu'elles favorisent l'extension des terres agricoles, l'amélioration du niveau de vie des populations et l'augmentation de leur densité qui reste de loin très faible.

Conclusion

Sur la base de l'étude bibliographique, nous avons affiné la problématique de la thèse et les objectifs recherchés. Pour atteindre ces objectifs, nous avons proposé une méthodologie multidisciplinaire. Ainsi, dans cette première étape, la présentation de la structure générale de la thèse et les critères de choix de la zone d'étude ont été nécessaires.

CHAPITRE 2

Chapitre 2 : Un contexte physique propice à l'évolution des surfaces agricoles dans le Moyen Atlas tabulaire

Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'étude des caractéristiques lithologiques, topographiques et hydro-climatiques puisqu'elles imposent la localisation et l'étendue des secteurs favorables à une valorisation agricole. L'identification des différentes formations lithologiques donne également une clé de lecture de la répartition du potentiel hydrogéologique. L'analyse des paramètres topographiques comme facteurs influençant fortement le climat, l'installation des populations et les pratiques d'occupation et d'utilisation des terres. Ainsi dans ce chapitre, les caractéristiques des variables climatiques (précipitations et températures) et hydrologiques (sources, lacs et oueds) du Moyen Atlas tabulaire sont présentées afin de comprendre son impact sur la dynamique actuelle des surfaces agricoles.

1. Contexte géologique et lithologique de la zone d'étude

Le Moyen Atlas en général a fait l'objet de nombreuses études géologiques ([Bentayeb et Leclerc, 1977](#) ; [Charrière, 1990](#) ; [Colo, 1961](#) ; [Fedan, 1978](#) ; [Louis, 1912](#) ; [Martin, 1981](#) ; [Michard, 1976](#) ; [Pique, 1994](#) ; [Sabaoui, 1998](#) ; [Termier, 1937](#)) sur lesquelles nous nous appuyons pour montrer l'influence du facteur géologique dans la dynamique actuelle des surfaces agricoles dans le Moyen Atlas tabulaire.

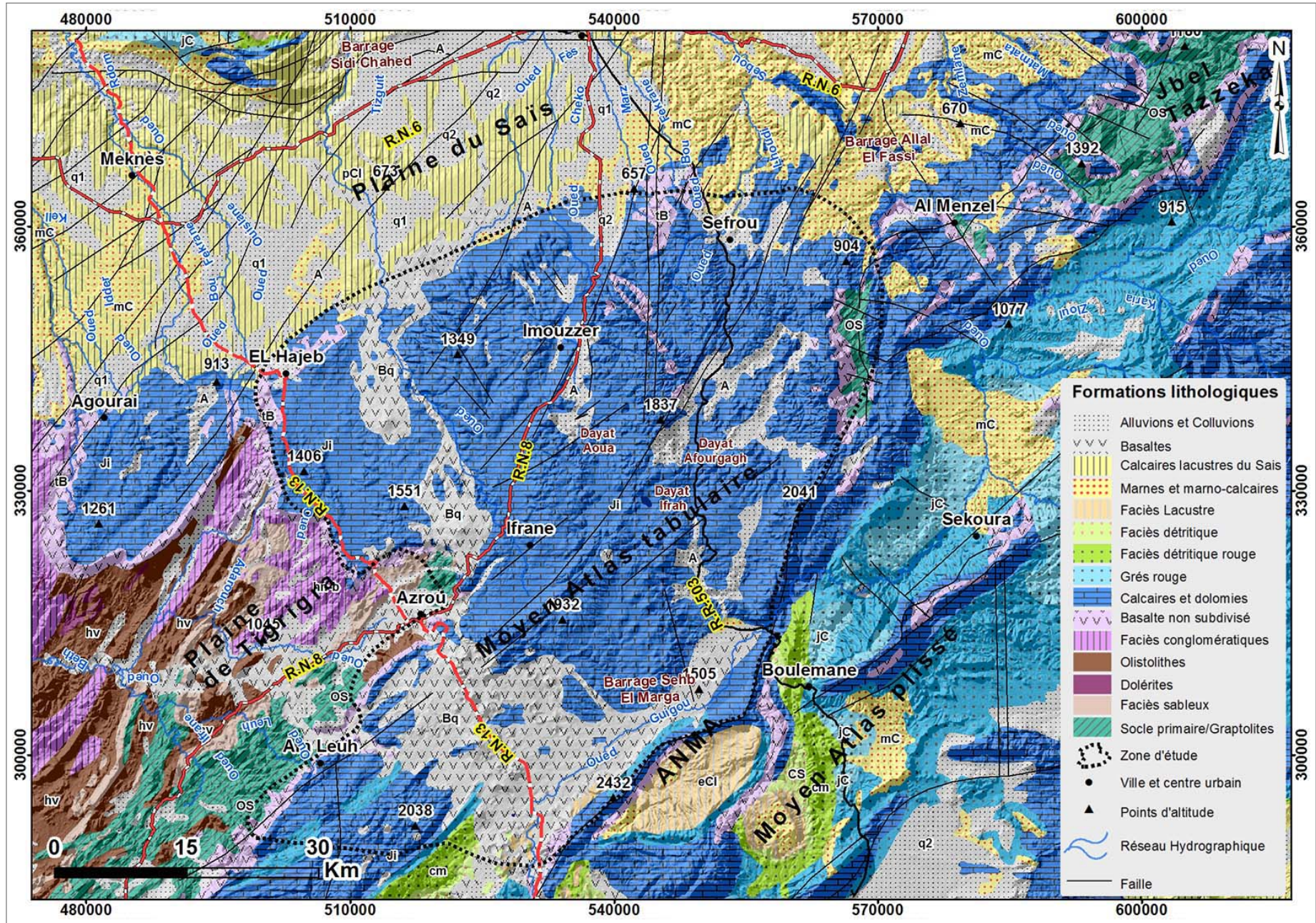


FIGURE 2.1. Carte lithologique de la zone d'étude (carte géologique du Maroc, carte structurale et cartes topographiques)

L'expression cause moyen atlasique ou Moyen Atlas tabulaire a été utilisée la première fois par Daguin F. (Martin, 1981). Cette unité se caractérise par une structure tabulaire, plus faillée que plissée (Martin, 1981 ; Zeryouhi, 1977) (figs. 2.1 et 2.2), et par la dominance des formations lithologiques du Lias (calcaires) qui constituent l'élément majeur de la géologie du milieu. Le calcaire du Lias à haut coefficient de perméabilité forme une superficie importante de la zone d'étude (tableau 2.1). Cette superficie est capable d'emmagasiner une quantité considérable d'eau sous forme des réservoirs souterrains qui donnent naissance aux sources, oueds et lacs. Le territoire se caractérise par la présence de nombreuses failles et accidents les plus importants ; l'accident de Tizi N'Treten qui subdivise le Moyen Atlas tabulaire en deux tronçons (méridional et septentrional) et l'Accident Nord Moyen Atlasique (ANMA) qui sépare le Moyen Atlas tabulaire et plissé.

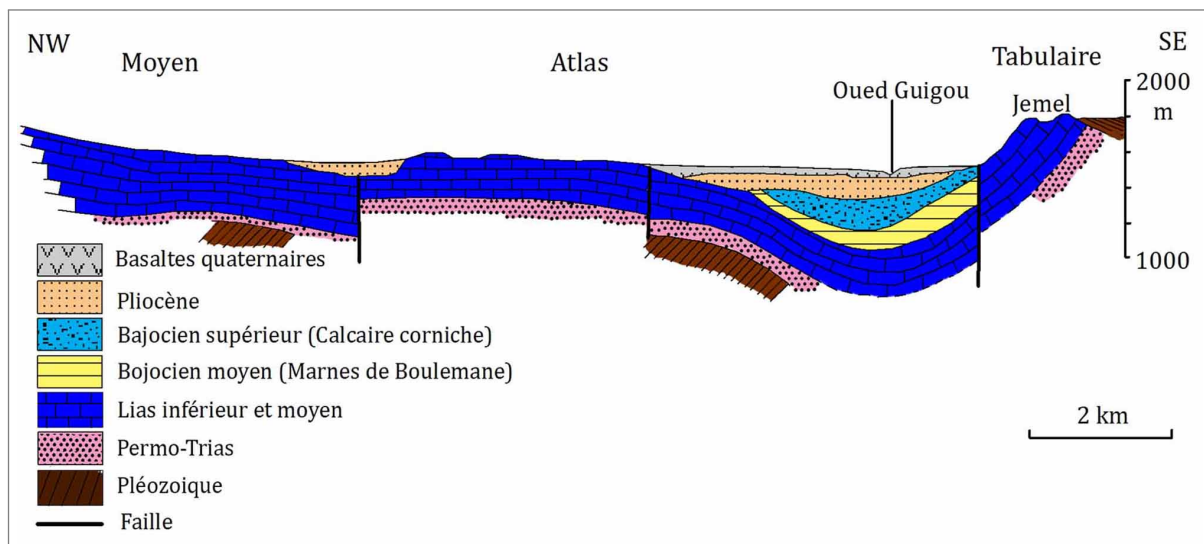


FIGURE 2.2. Coupe géologique traversant la plaine de Guigou (Bentayeb et Leclerc, 1977) redessinée

Les formations du quaternaire provenant de la décomposition sur place des calcaires et dolomies et du ruissellement périphérique peuvent atteindre de fortes épaisseurs (Bentayeb et Leclerc, 1977). Elles occupent 972 km² environ de la zone d'étude (26 %) et constituent les fonds de vallées et les dépressions intra-montagnardes (photos 2.1, 2.2 et 2.3 in fig. 2.3) sous forme de dépôts d'érosion des versants. Les dépôts du quaternaire favorisent des milieux très riches en sol et en eau pour pratiquer l'agriculture. Ces types des zones ont une double importance, d'une part, ce sont des milieux d'accumulation de sédiments riches, d'autre part ils reposent sur les formations liasiques qui emmagasinent une quantité d'eau capable d'assurer l'irrigation

des cultures soit par le pompage soit directement à partir des sources.



Photo 2.1. Vue panoramique sur la dépression d'Imouzzer (août 2018)



Photo 2.2. Vue panoramique sur la dépression d'Afourgagh (avril 2018)



Photo 2.3. Vue panoramique sur la dépression de Guigou (avril 2018)

FIGURE 2.3. Vue panoramique sur trois dépressions du Moyen Atlas

Le substratum paléozoïque du Moyen Atlas affleure à l'ouest (Meseta) et à l'est (massif de Tazekka) (Charrière et al., 2011 ; Sabaoui et al., 2009). Dans la zone d'étude, il s'étale sur une superficie de 64 km² environ (2 %). Ces formations se caractérisent par une faible perméabilité.

Les formations lithologiques dans le secteur d'étude sont caractérisées par une diversité in-

Formations lithologiques	Ere	Superficie	%	Superficie totale	%. Totale
Alluvions et Colluvions	Quaternaire	286.8	7.7	972.3	26
Basaltes	Quaternaire	685.4	18.3		
Calcaires lacustres du Sais	Tertiaire	4.76	0.1	61.9	2
Marnes et marno-calcaires	Tertiaire	45.31	1.2		
Faciès Lacustre	Tertiaire	11.83	0.3		
Faciès détritique	Secondaire	2.41	0.1	2644.8	71
Faciès détritique rouge	Secondaire	8.79	0.2		
Corniches calcaires	Secondaire	42.8	1.1		
Calcaires et dolomies	Secondaire	2450.9	65.5	64.9	2
Basalte nom subdivisé	Secondaire	139.9	3.7		
Faciès conglomératiques	Primaire	0.02	0.0		
Olistolithes	Primaire	11.44	0.3	3744	100
Faciès sableux	Primaire	3.98	0.1		
Socle primaire/Graptolites	Primaire	49.4	1.3		
		3744	100	3744	100

TABLEAU 2.1. Répartition des formations lithologiques dans la zone d'étude

égale (tableau 2.1) et une perméabilité variable (très perméables, semi-perméables et imperméables) en fonction des conditions structurales, topographiques et stratigraphiques. La carte des formations lithologiques permet de mettre en évidence une forte dominance des formations du Lias dans le Moyen Atlas tabulaire. L'étude de ces formations nous a permis de comprendre leur rôle dans la disponibilité de l'eau et dans la dynamique actuelle des surfaces agricoles.

Le Moyen Atlas tabulaire est situé entre deux grandes unités structurales principales. Il est délimité au Nord par la plaine du Saïs et au Sud par le Moyen Atlas plissé.

> **Le Moyen Atlas plissé** (fig. 2.4) est l'ensemble montagneux du Moyen Atlas oriental qui se situe à l'est de l'accident « *Nord Moyen Atlasique* » (Colo, 1961 ; Zeryouhi, 1977). Il montre une succession de rides étroites et de larges gouttières synclinales allongées dans la direction NE-SW (Sabaoui et al., 2009). En général, le Moyen Atlas plissé est constitué par la succession des formations lithologiques moins faillées que celles du Moyen Atlas tabulaire. Le Lias n'affleure que dans les anticlinaux et ne couvre qu'une faible étendue en dehors du massif du Bou-Iblane (Zeryouhi, 1977).

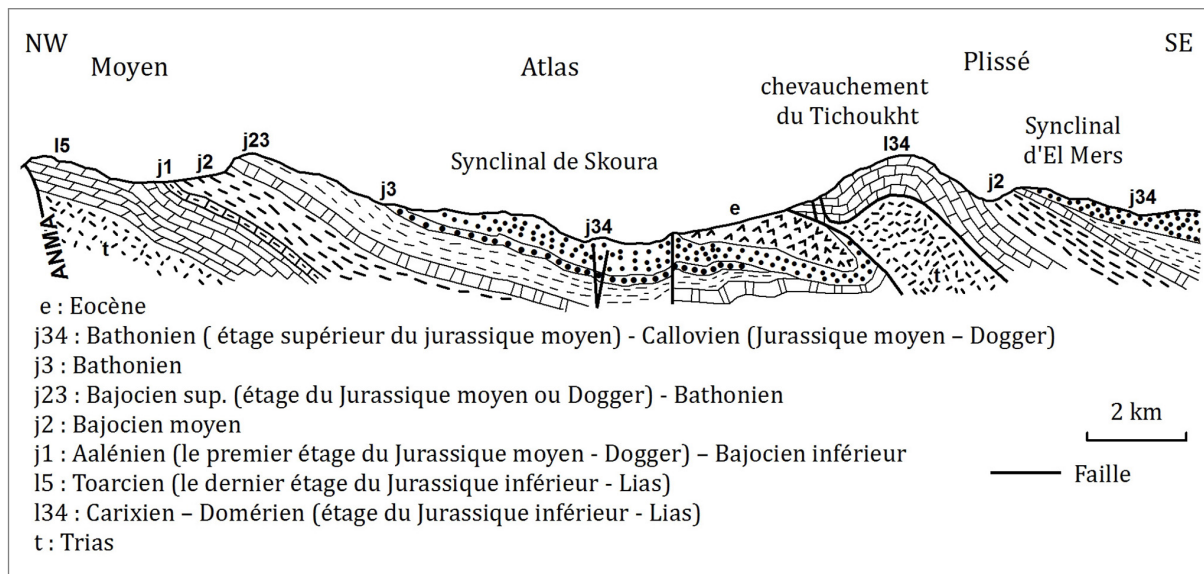


FIGURE 2.4. Coupe structurale du Moyen Atlas plissé

(Charrière, 1990) redessinée

> La plaine du Saïs constitue la limite Nord de la zone d'étude. Structuellement, elle est très différente des unités précédentes (Moyen Atlas tabulaire et Moyen Atlas plissé), et constitue une dépression des formations lithologiques (marnes et marno-calcaires du miocène) très profondes avec environ 1000 m (fig. 2.5). Du Dir Moyen Atlasique jusqu'aux sillons sud-rifains, la profondeur des formations marneuses varie progressivement, celles-ci surmontent les formations du Lias (calcaires) qui forment la nappe profonde du Saïs (Boumir, 1990 ; Chamayou et al., 1975 ; Fassi, 1999 ; Taltasse, 1953).

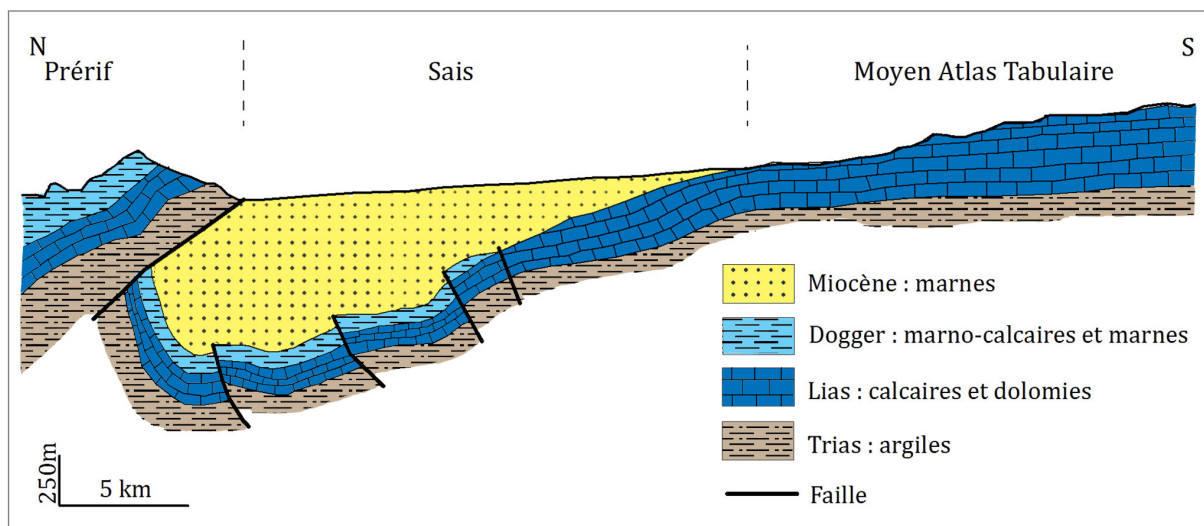


FIGURE 2.5. Coupe géologique traverse trois unités structurales du Moyen Atlas tabulaire au pré-rif

(Chamayou et al., 1975 ; Taltasse, 1953) redessinée

2. Caractéristiques topographiques

L'analyse des caractéristiques topographiques constitue un élément important pour la compréhension du régime climatique. Dans le Moyen Atlas en général, la dominance des hautes altitudes favorise l'abondance des précipitations et contrôle le gradient thermique. Ainsi, la caractérisation de la topographie est nécessaire pour la mise en évidence des zones favorables à la mise en culture.

Les altitudes varient entre 2432 m (Accident Nord moyen Atlasique vers le Sud) et 500 mètres (plaine de Sais vers le Nord). Généralement, elles décroissent du sud vers le nord. Les figures 2.6 et 2.8 mettent en évidence la dominance remarquable des altitudes comprises entre 1500 mètres et 2000 mètres, elles constituent environ 52 % de la superficie totale de la zone d'étude, contre 11 % environ pour les altitudes inférieures à 1000 mètres.

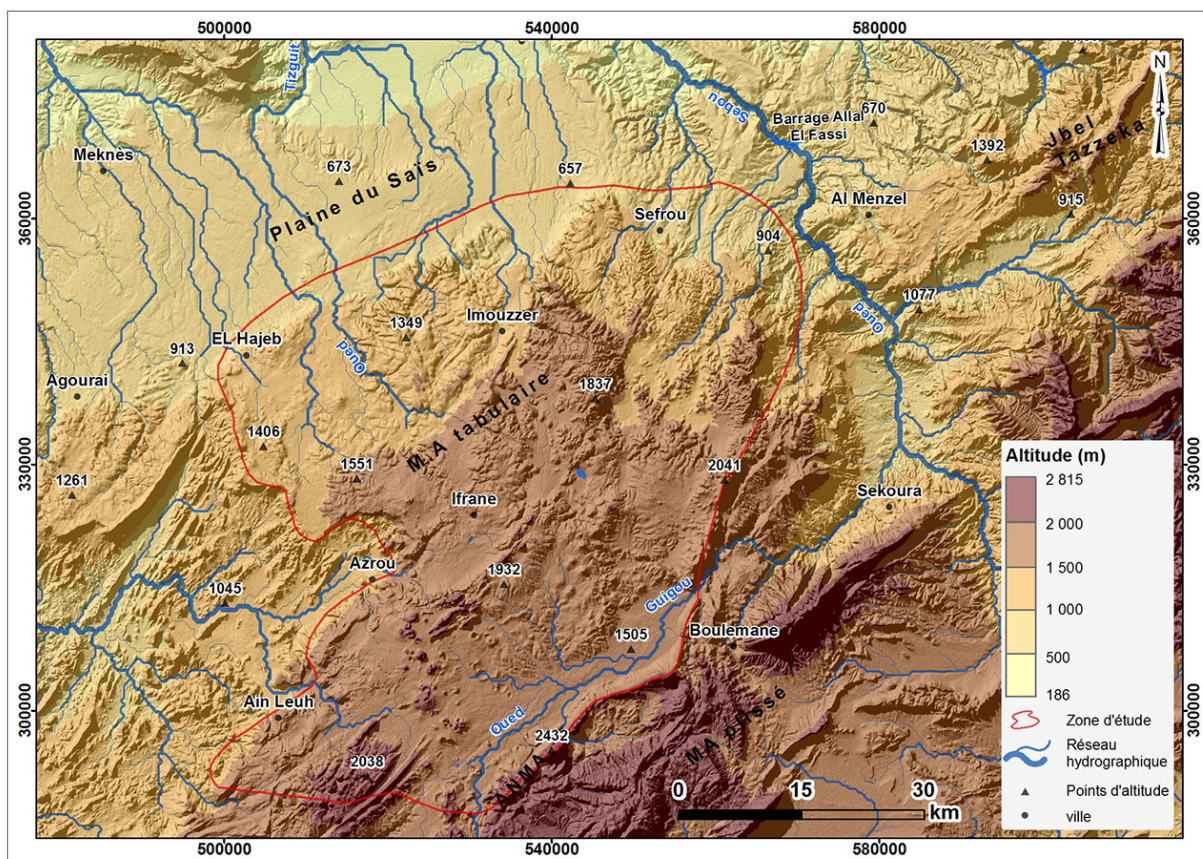


FIGURE 2.6. Carte d'altitudes de la zone d'étude (d'après le modèle numérique de terrain)

Dans les processus de ruissellement, les pentes jouent un rôle important. La dominance des pentes faibles à très faibles (environ 70 % de la zone d'étude (figs. 2.7 et 2.8) sont ici favorables

à la diminution du ruissellement et à une meilleure infiltration des eaux des précipitations.

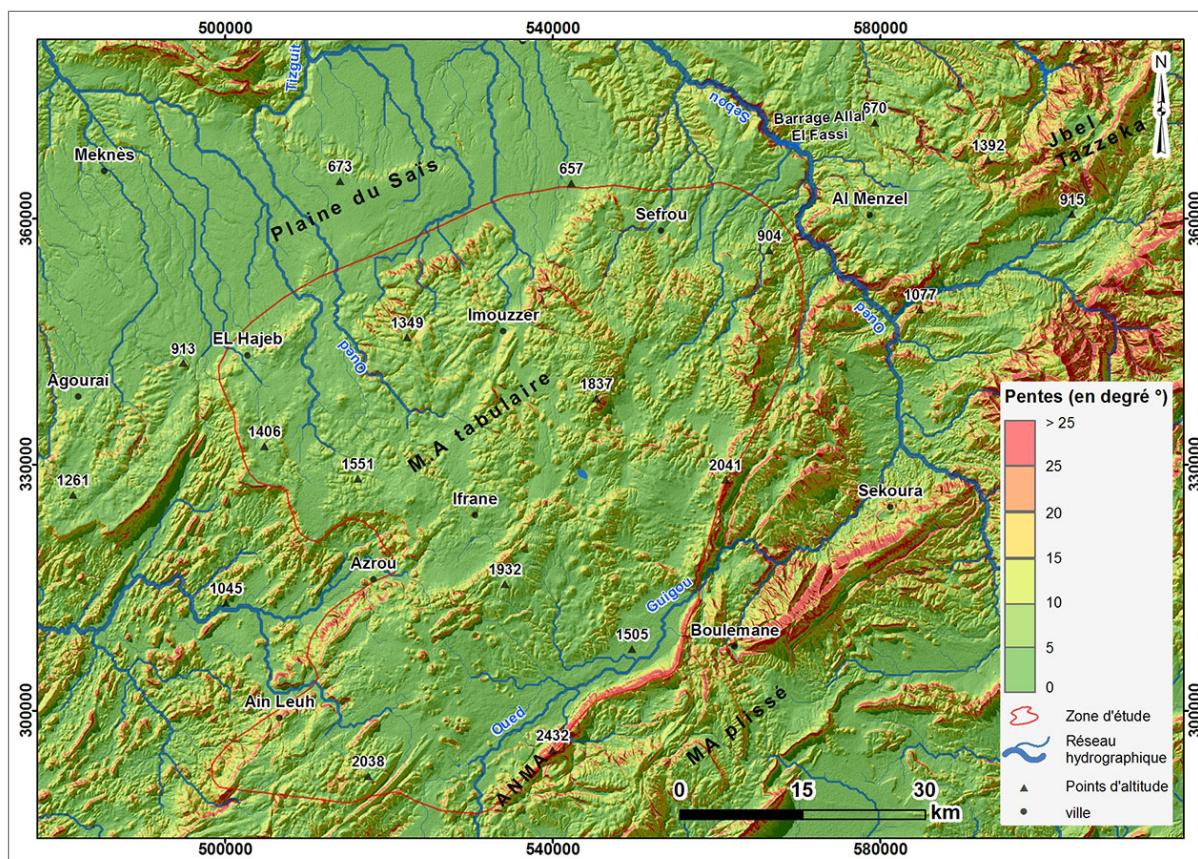


FIGURE 2.7. Carte des pentes de la zone d'étude (d'après le modèle numérique de terrain)

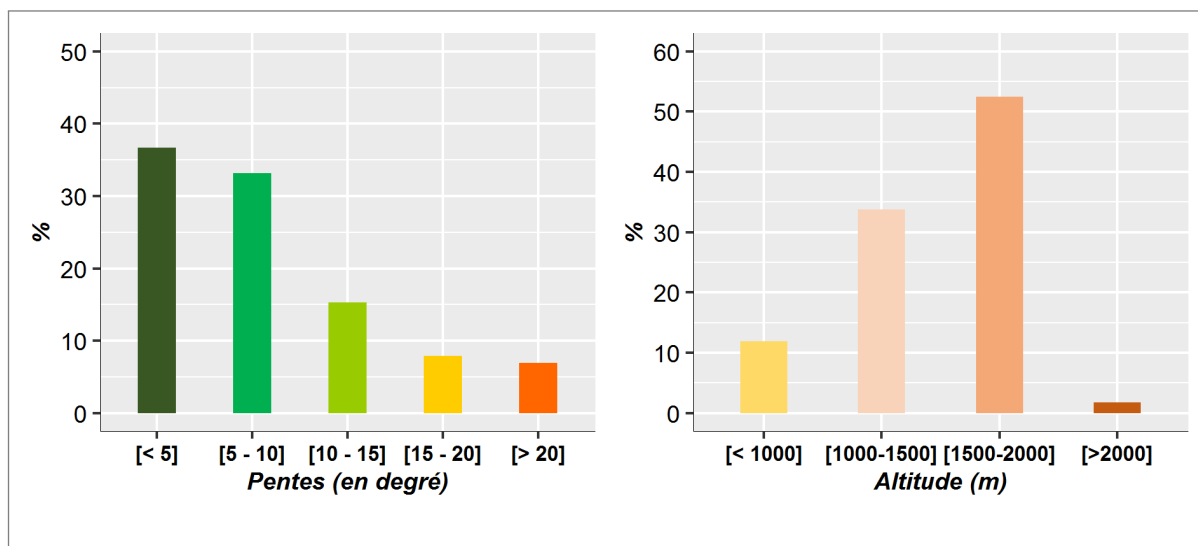


FIGURE 2.8. Répartition des altitudes et des pentes en fonction de la superficie dans la zone d'étude

2.1. Les unités topographiques

Dans la zone d'étude, plusieurs unités topographiques peuvent être distinguées : Les Causes Moyen-Atlasiques, le Dir, la plaine de saïs et les dépressions intramontagnardes.

Les dépressions intramontagnardes sont des dépressions topographiquement moins élevées que les Causses. Au Moyen Atlas, elles forment les secteurs des lacs (Aoua, Ifrah, Hachelef, Afourgagh, etc.) et se caractérisent par des pentes généralement très faibles inférieures à 5°. Dans cette étude, la dépression est considérée comme échelle /unité de travail pour le suivi et la quantification de l'occupation des sols en général et des cultures irriguées en particulier. Les figures 2.9 à 2.11 illustrent les formes des trois dépressions étudiées.

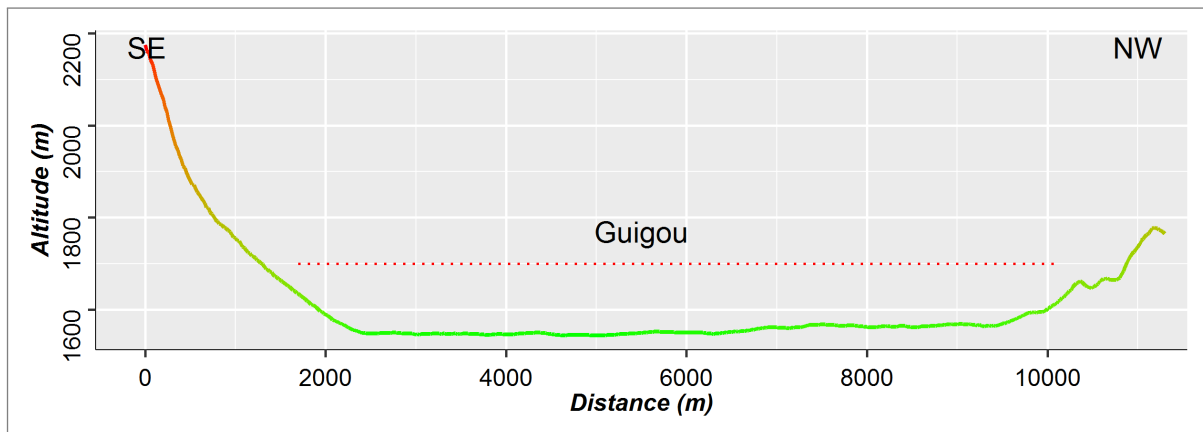


FIGURE 2.9. Coupe topographique transversale dans la dépression de Guigou

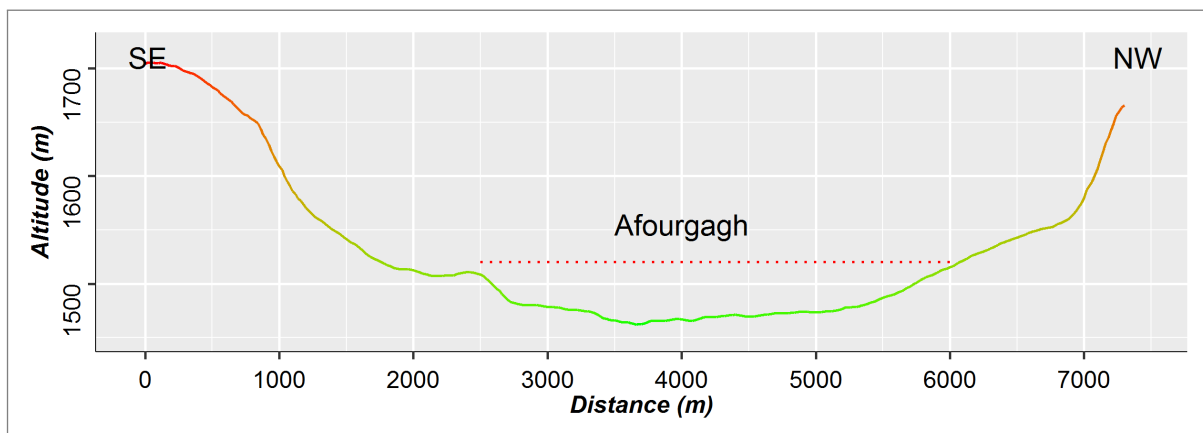


FIGURE 2.10. Coupe topographique transversale dans la dépression d'Afourgagh

Les Causses Moyen-Atlasiques : Ils correspondent à la zone la plus élevée ; causses d'Imouzzer, d'Ifrane, de Sefrou, d'Agourai, de Tahala, d'El Menzel et de Guigou. Ils se situent sur des altitudes supérieures à 1000m avec des pentes très faibles.

Le Dir : cette unité topographique occupe la partie transitoire entre le Causse du Moyen Atlas et la plaine de Sais vers le Nord (Dir d'Imouzzer, Dir de Sefrou).

La plaine de Sais : se situe dans le nord de la zone d'étude et présente des altitudes relativement faibles.

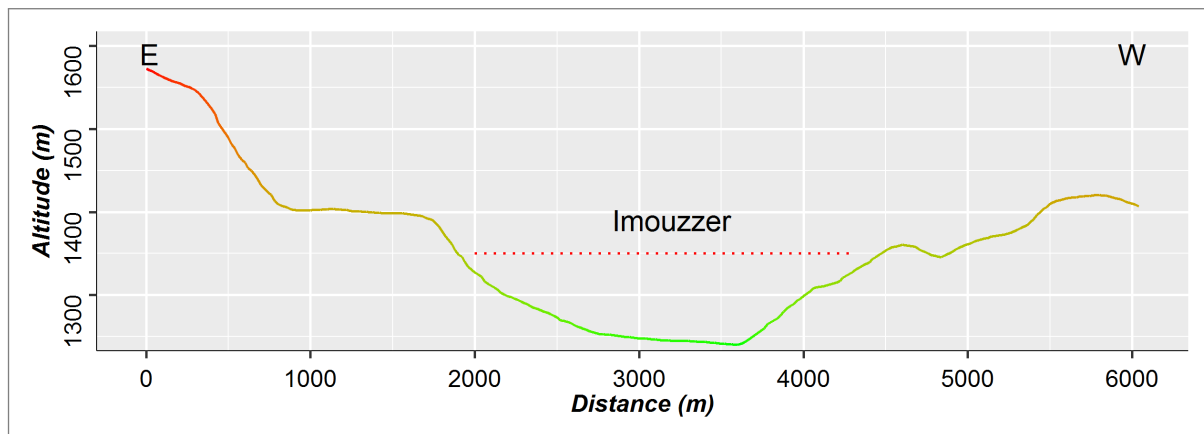


FIGURE 2.11. Coupe topographique transversale dans la dépression de d'Imouzzer

3. Contexte hydro-climatique du Moyen Atlas tabulaire

La zone d'étude s'inscrit dans un contexte climatique méditerranéen influencé par la continentalité et marqué par un fort contraste entre l'été (chaud) et l'hiver (froid). Ce chapitre est réservé à l'étude des paramètres climatiques (précipitations et températures) et hydrologiques (sources, lacs et oueds) du Moyen Atlas tabulaire et ses bordures afin de comprendre son impact sur la dynamique actuelle des surfaces agricoles.

3.1. Précipitations

L'analyse des précipitations s'avère très intéressante pour montrer son importance dans la dynamique des surfaces agricoles. Elle repose ici sur les données mesurées par l'Agence du Bassin Hydraulique du Sebou (ABHS) et les produits du satellite GPM 3IMERGM V6 (Global Precipitation Measurement).

3.1.1. La place du Moyen Atlas tabulaire à l'échelle du Maroc

Le contexte du Moyen Atlas est le domaine géographique du Maroc qui reçoit des quantités importantes de précipitations et de fait, favorables à une valorisation agricole. Avant de commencer le traitement des données climatiques sur la zone d'étude, la spatialisation des précipitations à l'échelle du Maroc a été effectuée. La figure 2.12 présente cette répartition des précipitations moyennes annuelles entre 2000 et 2018 issues de données des satellites GPM 3IMERGM V6 (Global Precipitation Measurement) mises gratuitement à la disposition du pu-

blic (NASA)¹.

Au Maroc, les précipitations se caractérisent par une grande variabilité spatiale, entre 40 mm/an à l'extrême Sud du pays et plus de 850 mm/an dans le Rif (moyenne calculée sur la période 2000/2018). Plus de 40 % du territoire marocain reçoit des précipitations inférieures à 100 mm (fig. 2.12). Avec les latitudes et les altitudes, la quantité des précipitations s'accroît pour atteindre plus de 850 mm dans les milieux montagnards humides et subhumides (Rif, Moyen Atlas, Haut Atlas). Par contre, les milieux arides enregistrent des précipitations inférieures à 100 mm. La répartition spatiale des précipitations au Maroc montre un gradient longitudinal et altitudinal résultant de la combinaison des courants océaniques humides avec les barrières orographiques des Atlas. Cette inégalité spatiale des précipitations sur l'ensemble du territoire influence largement la répartition des populations et des activités anthropiques.

3.1.2. Caractéristiques des précipitations dans la zone d'étude

Pour étudier les caractéristiques des précipitations dans la zone d'étude, nous avons analysé les données de 20 Stations (tableau 2.2) fournies par l'ABHS. Ces 20 stations s'inscrivent dans un domaine pluviométrique homogène qui a été défini par Qadem (2015) par la méthode du vecteur régional.

La zone d'étude se situe dans la partie la plus arrosée du Maroc avec des précipitations comprises entre 500 mm et plus de 800 mm en moyenne durant la période 2000/2018. La figure 2.13 montre une variation remarquable des précipitations avec les altitudes : les relevés pluviométriques des stations sont ainsi fortement influencés par leur position géographique.

1. Les satellites GPM fournissent des cartes des précipitations mondiales pour aider les chercheurs à améliorer la prévision des événements extrêmes, à étudier le climat mondial et à accroître les capacités actuelles d'utilisation de ces données satellitaires au profit de la société.

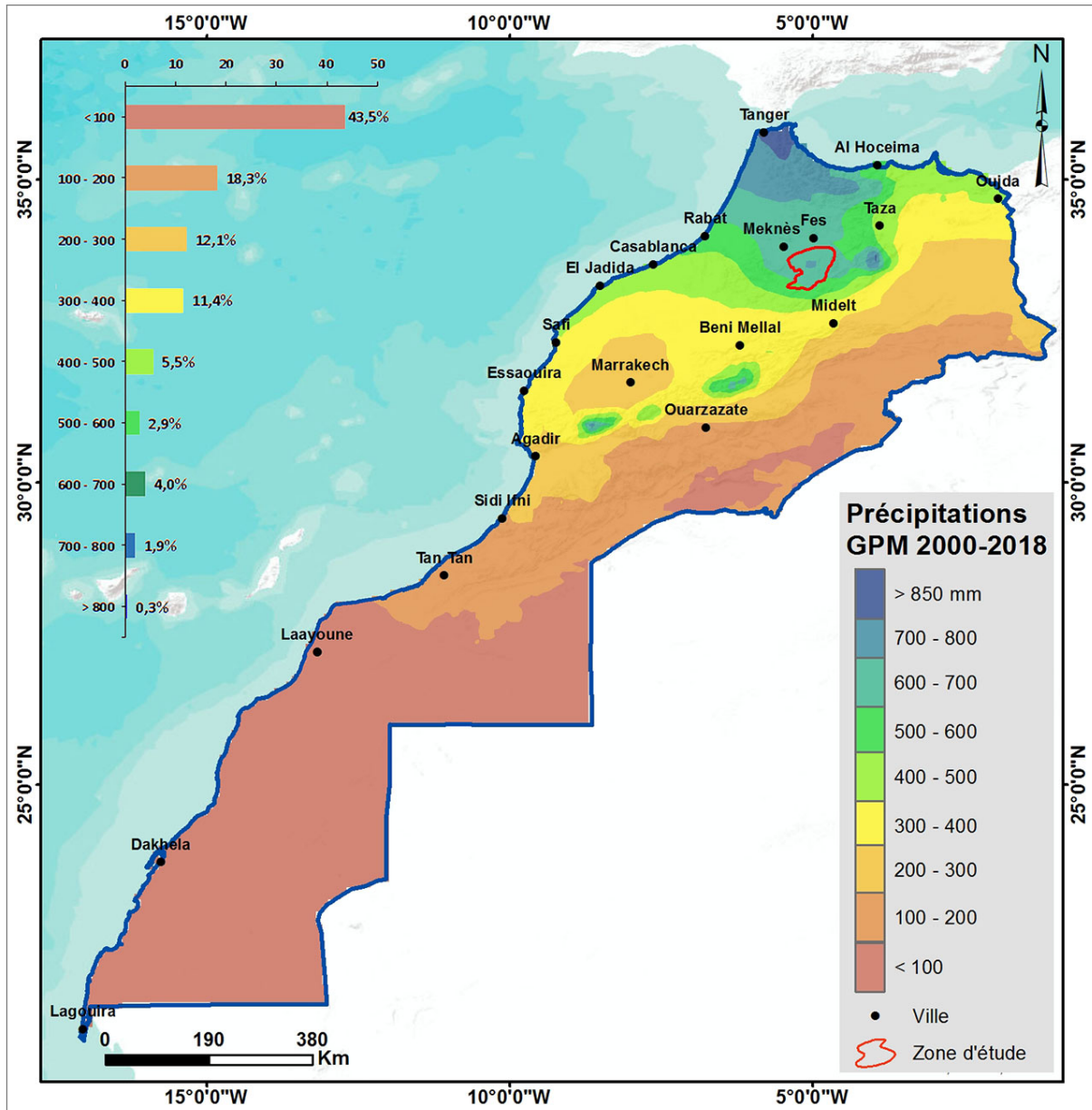


FIGURE 2.12. Répartition des précipitations à l'échelle du Maroc entre 2000 et 2018

[GPM 3IMERGM V6]

Stations	X	Y	Altitude (m)	Période	P (mm)
Aguelmam Sidi Ali	537800	276000	2078	1976 - 2017	420
Ain Bittit	519826	354753	790	1978 - 2017	503
Ain Leuh	505941	300720	1365	1975 - 2017	745
Azrou	516864	317842	1275	1975 - 2017	710
Ain Timdrine	578585	350436	687	1991 - 2017	384
Ait Khabbach	556717	315185	1474	1971 - 2017	357
Azzaba	569572	359594	626	1958 - 2017	369
Bab Marzouka	615840	400840	368	1971 - 2017	587
Bab Ouender	578000	439000	312	1957 - 2017	756
Boulmane	561735	307215	1901	1957 - 2017	430
Dar El Arsa	543282	399662	164	1974 - 2017	431
Dar El Hamra	592800	353350	830	1983 - 2017	460
El Hajeb	502399	343820	1017	1993 - 2013	584
El Mers	593100	318620	1230	1982 - 2017	417
Fès	535530	385185	378	1914 - 2017	506
Hajria	552850	432500	200	1997 - 2017	525
Ifrane	524539	323451	1649	1935 - 2010	985
Pont Mdez	581400	341900	725	1957 - 2017	313
Sidi El Moukhfi	507584	311631	1075	1976 - 2017	490
Taza	629300	402200	629	1957 - 2017	575

TABLEAU 2.2. Stations climatiques utilisées (ABHS)

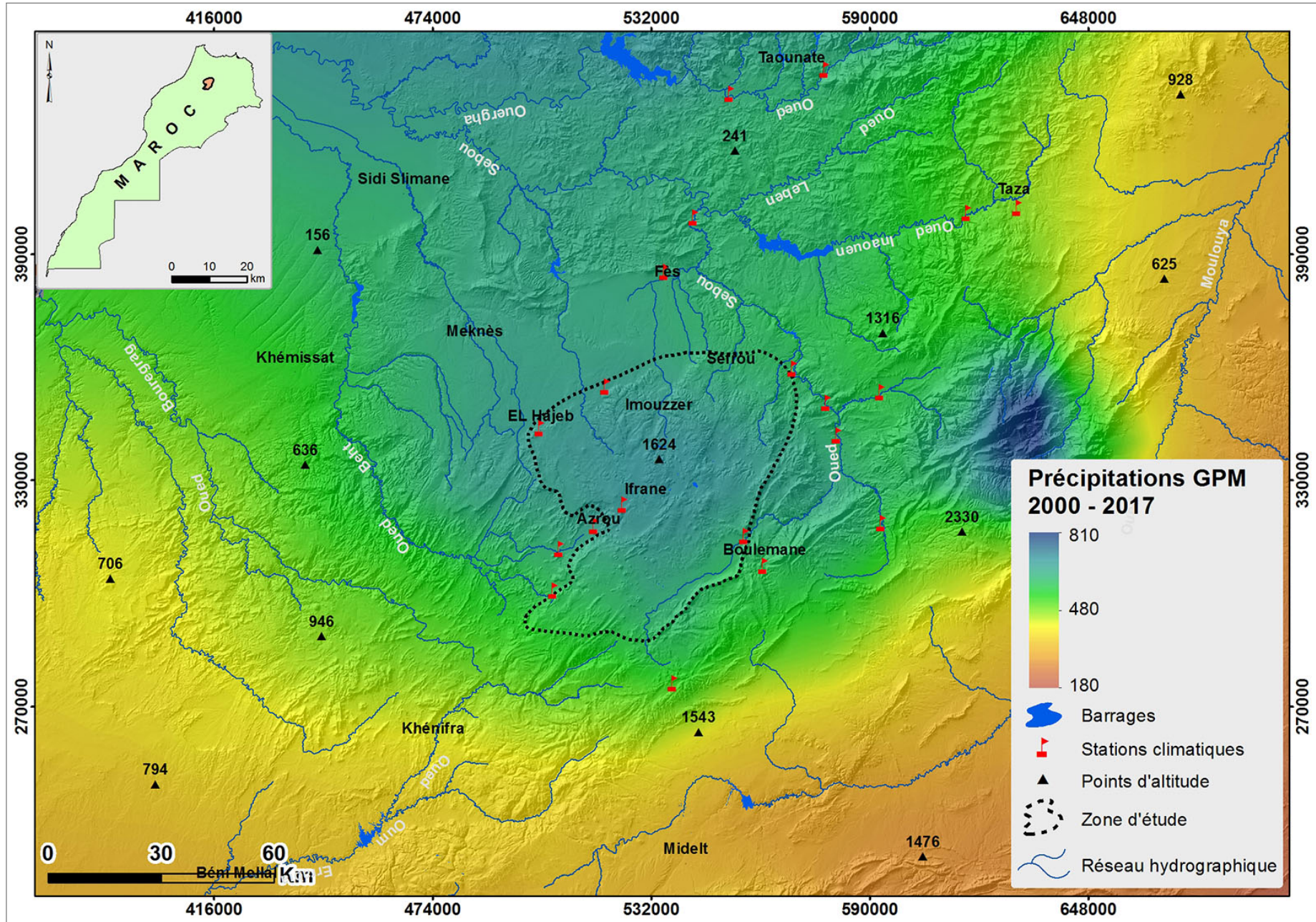


FIGURE 2.13. Spatialisation des précipitations dans la zone d'étude entre 2000 et 2018

[GPM 3IMERGM V6]

3.1.2.1. Variation annuelle des précipitations

L'analyse des séries de précipitations dans la zone qui s'étend du Moyen Atlas jusqu'au Rif central met en évidence de forts contrastes entre les stations. Les plus fortes valeurs moyennes de précipitations ont été enregistrées à la station d'Ifrane avec 985 mm environ (Moyen Atlas tabulaire), la station de Bab Ouander 746 mm environ (Rif central). Tandis que les moyennes les plus faibles ont été enregistrées dans les stations d'Ait khabach 357 mm et Mdez 315 mm (Moyen Atlas tabulaire). Le diagramme de Tukey (fig. 2.14) montre que plusieurs stations ont enregistré des valeurs extrêmes. La plus haute valeur a été enregistrée dans la station d'Ifrane 1865 mm en 1995/1996. Pour d'autres stations, on peut distinguer trois dates différentes d'enregistrement des valeurs extrêmes des précipitations. 1962/1963 Azzaba, Bab Ouander et Mdez, 2008/2009, Dar El Hamra et Hajria et 2009/2010 Aguelmame Sidi Ali, Dar El Arssa, El Mers et Sidi El Mokhefi. L'étude des précipitations à l'échelle annuelle montre qu'elles se caractérisent par une remarquable variation d'une année à l'autre et d'une station à l'autre.

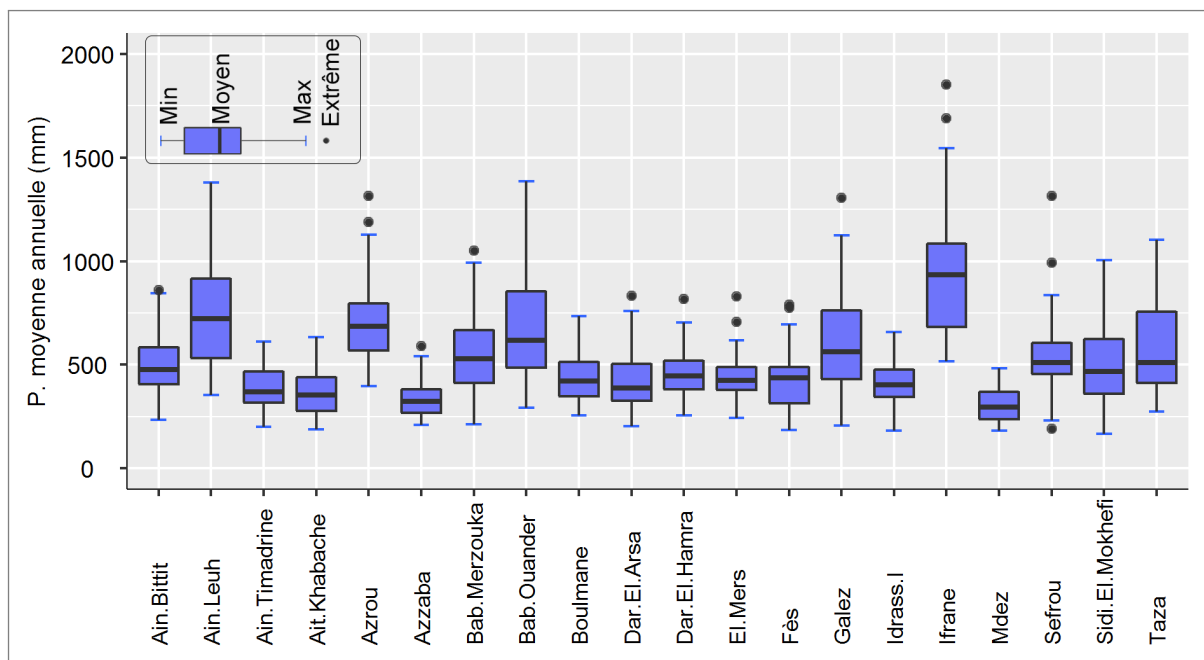


FIGURE 2.14. Valeurs Moyennes, Min, Max des précipitations et valeurs extrêmes enregistrées dans les 20 stations retenues dans ce travail entre 1975 et 2017 (ABHS)

3.1.2.2. Variation mensuelle des précipitations

De façon générale, les moyennes mensuelles des précipitations commencent à augmenter à partir d'octobre. Les valeurs les plus élevées ont été enregistrées en décembre à Ifrane (156 mm), Bab Ouander (138 mm) et Fès (71 mm). A Ain Bittit, le mois le plus arrosé est novembre.

Les stations d'Ait Khabache et d'Azzaba révèlent une situation différente avec les plus hautes valeurs de précipitations enregistrées en mai. À partir du mois de mai, l'ensemble des stations note une diminution des précipitations moyenne jusqu' à atteindre la période la plus sèche de l'année (juin, juillet et août). Dans cette région du Moyen Atlas, la période de forte pluviométrie s'étend donc d'octobre à avril qualifiée d'hiver étendu / la saison pluvieuse par [Driouech \(2010\)](#). La figure 2.15, montre que l'hiver étendu / la saison pluvieuse (octobre à avril) se caractérise par une augmentation remarquable des précipitations. Alors, cette période de l'année est importante de point de vue hydrologique.

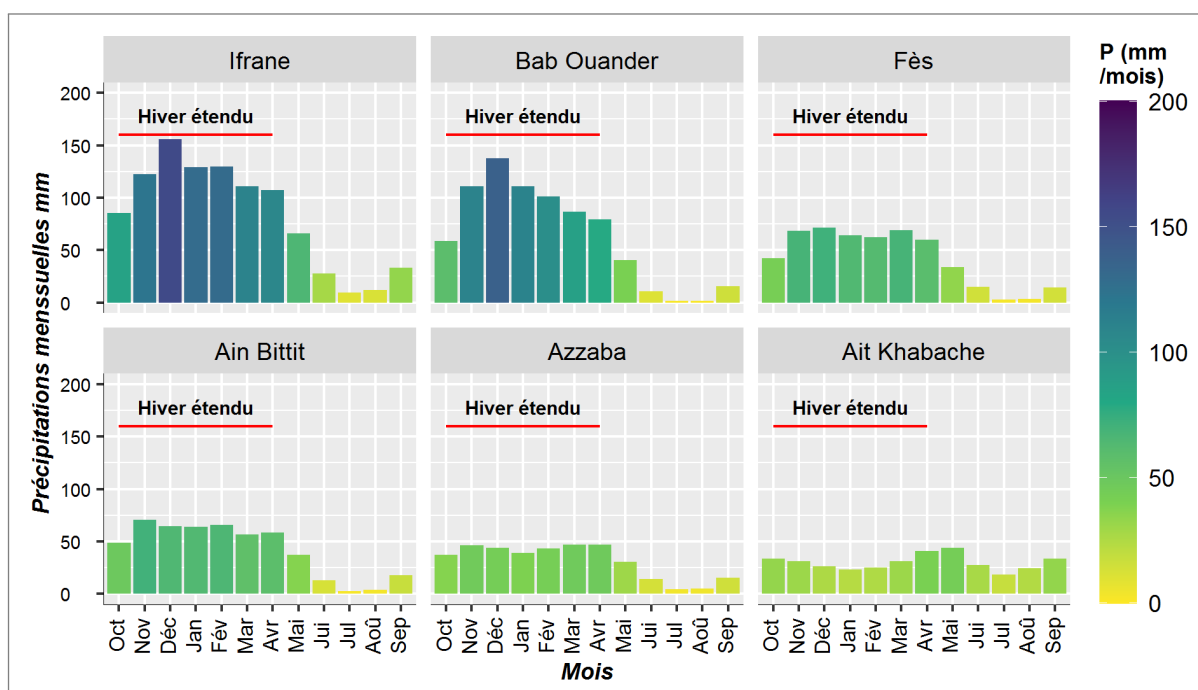


FIGURE 2.15. Variation des précipitations moyennes mensuelles d'octobre à avril (hiver étendu / la saison pluvieuse) et de mai à septembre (ABHS)

3.1.2.3. Variation saisonnière des précipitations

Les précipitations saisonnières sont extrêmement variables (fig. 2.16). Globalement, les plus hautes valeurs des précipitations ont été enregistrées en hiver et les plus basses valeurs en été (Ifrane, Bab Ouader, Fès, Ain Bittit). Mais il y a des exceptions dans certaines stations qui enregistrent les plus hautes valeurs en printemps (Azzaba et Ait khabache).

L'analyse des variations saisonnières des précipitations dans la zone d'étude et ses bordures permet de déterminer les périodes où les précipitations sont les plus fréquentes. Les données montrent que les précipitations se concentrent en hiver, avec une moyenne hivernale de 413

mm à Ifrane, 250 mm à Bab Ouander et 199 mm à Fès. La période estivale est marquée par un minima de précipitations. La variation des précipitations durant deux périodes de l'année, d'octobre à avril et de mai à septembre (fig. 2.17), indique que la première période (hiver étendu) se distingue par une dominance bien nette des précipitations dans l'ensemble des stations, alors que la deuxième période est caractérisée par une quantité très faible de précipitations.

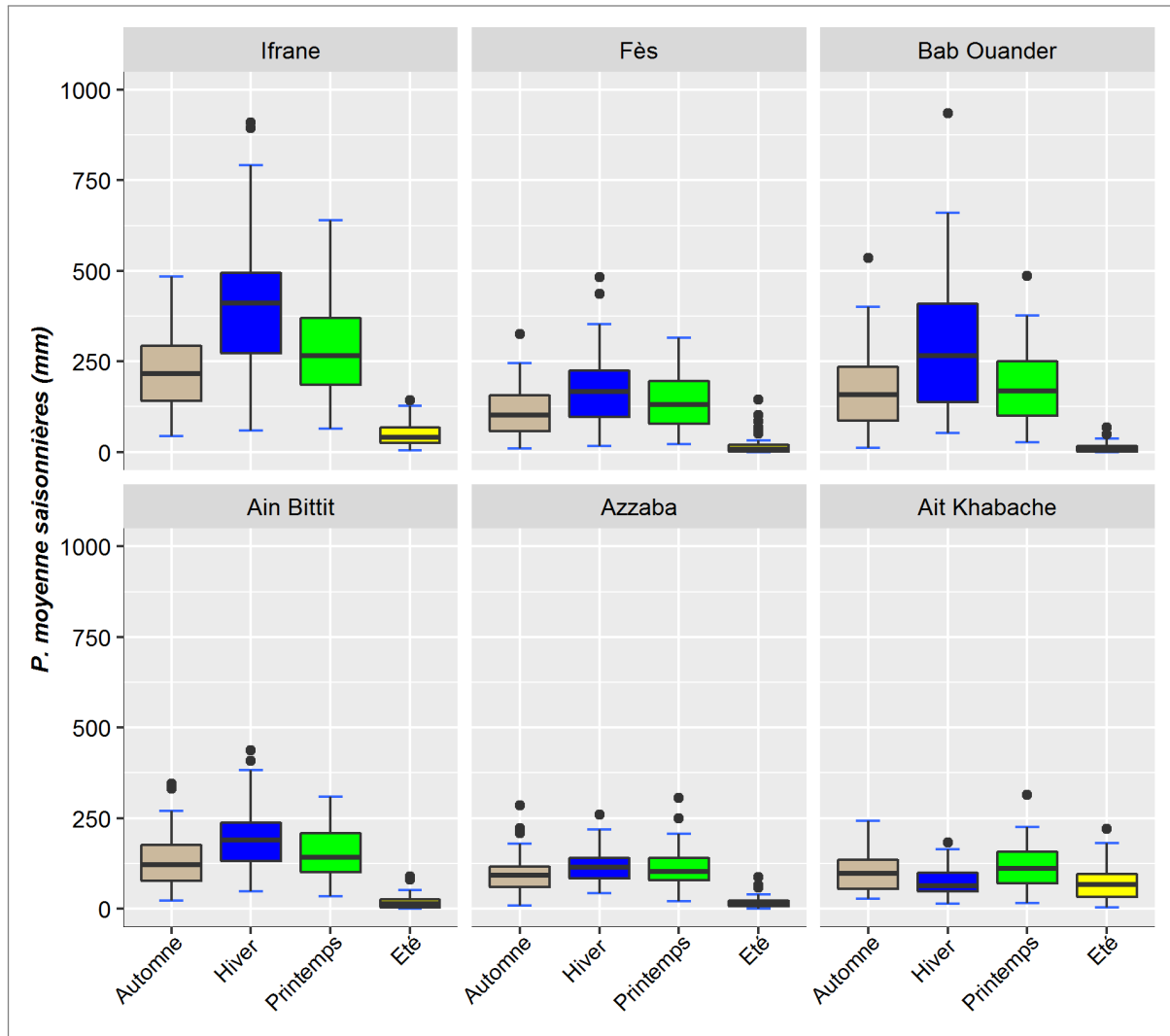


FIGURE 2.16. Variation saisonnière des précipitations entre 1975 et 2017 (ABHS)

L'analyse des données des stations climatiques montre que la zone d'étude et ses bordures se caractérisent par un contraste remarquable des précipitations aux différentes échelles temporelles (annuelle, mensuelle et saisonnière) et spatiales.

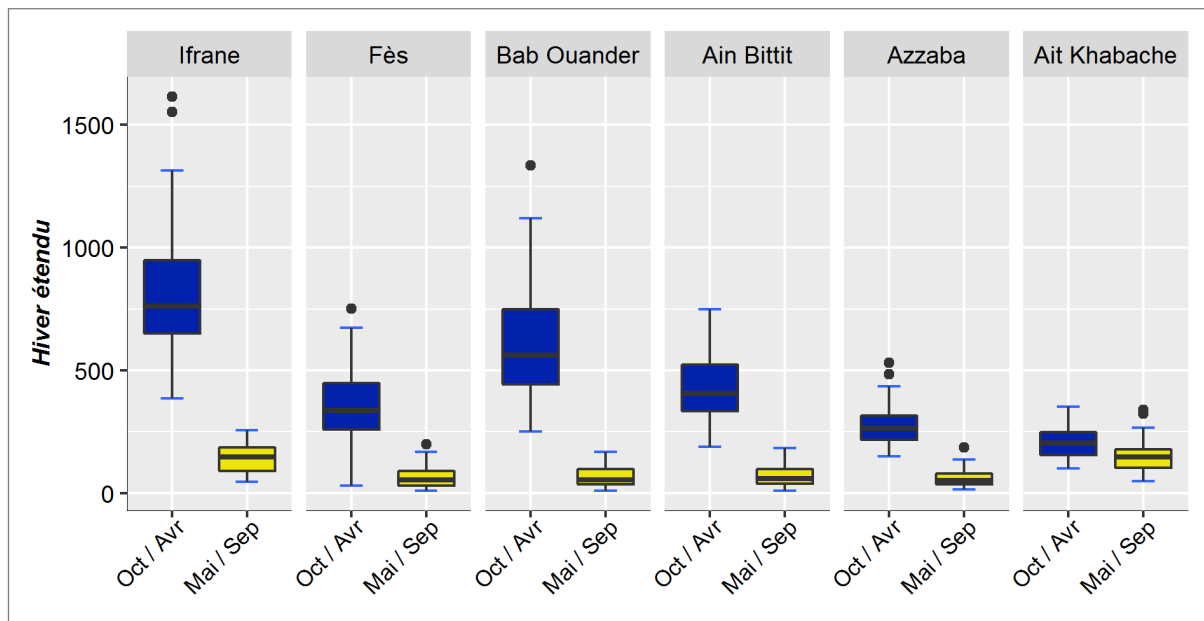


FIGURE 2.17. Variation des précipitations durant deux périodes de l'année d'octobre à avril (hiver étendu) et de mai à septembre (ABHS)

3.2. Température

Dans la zone d'étude, la répartition de la température est fortement influencée par l'orographie. La mise en évidence de la variation spatiotemporelle de la température se base sur l'analyse des données de plusieurs stations (tableau 2.3). Signalons que l'obtention des données de la température auprès des administrations et des services responsables a été très difficile. Mais par la persévérance nous avons collecté des chroniques de plusieurs stations situées dans le Moyen Atlas tabulaire et ses bordures.

3.2.1. Caractéristiques de la température dans la zone d'étude

Les données de températures collectées ne couvrent pas la totalité de la zone d'étude ce qui rend l'analyse spatiale très difficile. Pour pallier le manque des données, un gradient thermique de $0.44\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ a été appliqué à partir des valeurs enregistrées à la station de Fès durant la période 1961 et 2017 et généralisé au domaine d'étude. En effet [Delannoy et al. \(1979\)](#) ont montré que la valeur des gradients thermiques dans le Moyen Atlas est variable à la journée en fonction des types de temps et qu'il existe une différence entre la partie occidentale et orientale. Néanmoins si les gradients de l'ordre de $0.4^{\circ}\text{C}/100\text{m}$ n'expriment pas la totalité de la complexité entre topographie/exposition et température, ils doivent malgré tout refléter une certaine permanence qui prévaut à l'échelle mensuelle.

Stations	Altitude (m)	Chronique	Type de données		
Ain Taoujdate	465	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Azrou	1276	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Fès	380	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Fès Saïs	579	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Ifrane	1652	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Immouzer Kandar	1351	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Meknès	576	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Moulay Yakoub	312	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Sefrou	822	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Taza	459	1985-2017	T moy	T min	Tmax
Hajria	190	1985-2017	T moy	T min	Tmax

TABLEAU 2.3. Données thermiques disponibles

La figure 2.18 indique que la répartition spatiale de la température dans la zone d'étude varie en fonction des altitudes. Les hautes altitudes enregistrent de faibles valeurs de température, les valeurs les plus élevées sont relevées aux altitudes les plus basses et dans les dépressions intra-montagnardes (dépressions de Guigou, d'Imouzer, d'Afourgagh, etc.).

3.2.1.1. Variation annuelle de la température

Sur le plan spatial, la température se caractérise par un net contraste en fonction des conditions topographiques. Pour étudier la température dans la zone d'étude, nous avons comparé les données de 6 stations. En effet, le site de chaque station influence beaucoup la valeur de la température moyenne annuelle enregistrée durant la période qui s'étend de 1985 à 2017. La figure 2.19 présente la température moyenne annuelle sur cette période et montre que les valeurs de température varient d'une station à l'autre ; les plus basses valeurs ont été enregistrées dans les stations d'Azrou (13.8 C°) et d'Ifrane (15.8 C°) tandis que les plus hautes ont été enregistrées à la station de Taza (22 C°). Le diagramme de Tukey indique que la plupart des sta-

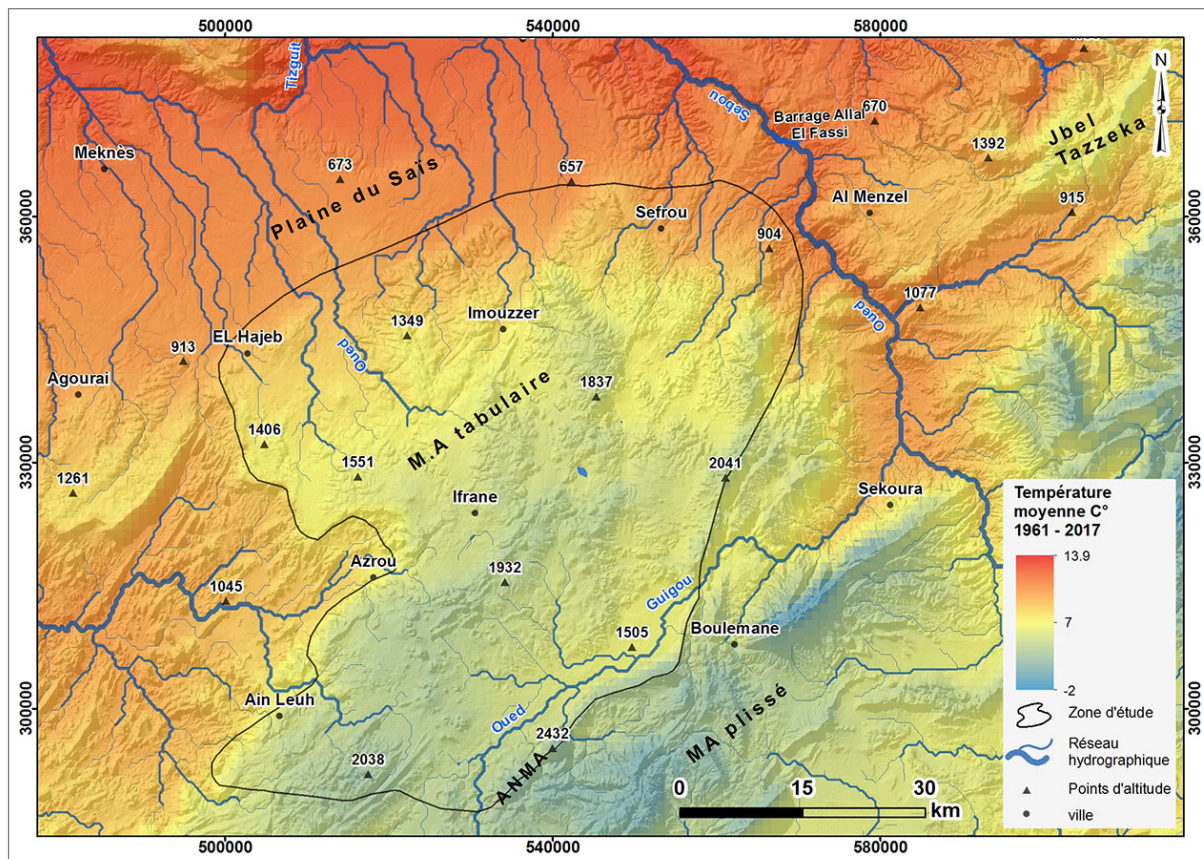


FIGURE 2.18. Spatialisation de la température moyenne dans la zone d'étude entre 1961 et 2017 sur la base des gradients thermiques

tions ont enregistré des valeurs extrêmes des températures minimales et maximales liées aux conditions atmosphériques qui provoquent l'augmentation ou la diminution de la température (masses d'airs froides et masses d'airs chaudes).

3.2.1.2. Variation mensuelle de la température

L'analyse de la température à l'échelle mensuelle (fig. 2.20) met en évidence un fort contraste entre mois humides et mois secs. Les valeurs de température commencent à diminuer à partir de septembre pour atteindre les plus basses en décembre et janvier. Par la suite, la température augmente légèrement en février, avril et mars. Pendant les mois de juillet et août, elle atteint une valeur maximale.

La comparaison des données issues des 6 stations illustre la variation de la température d'une station à l'autre au cours de l'année. Elle montre également l'homogénéité des courbes de la température durant l'année. En effet, la température enregistre les valeurs les plus basses en période hivernale et les valeurs les plus élevées en période estivale. Ainsi, les minima et les

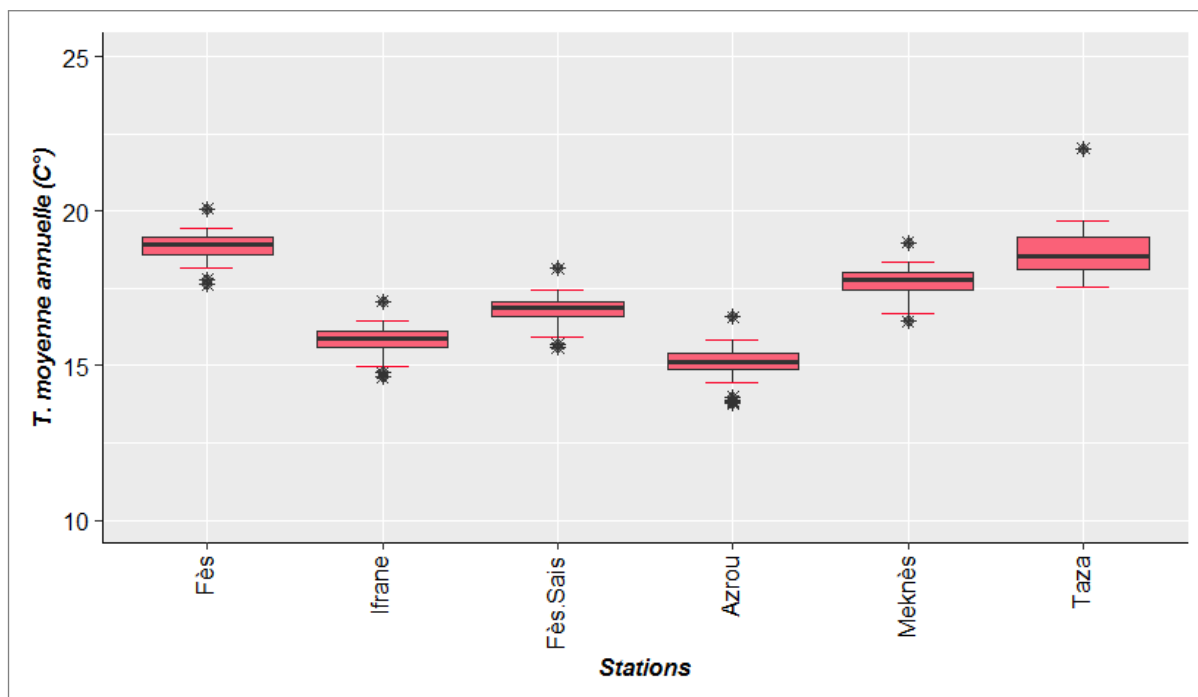


FIGURE 2.19. Variation de la température extrême enregistrée dans les 6 stations retenues dans ce travail entre 1985 et 2017 (ABHS)

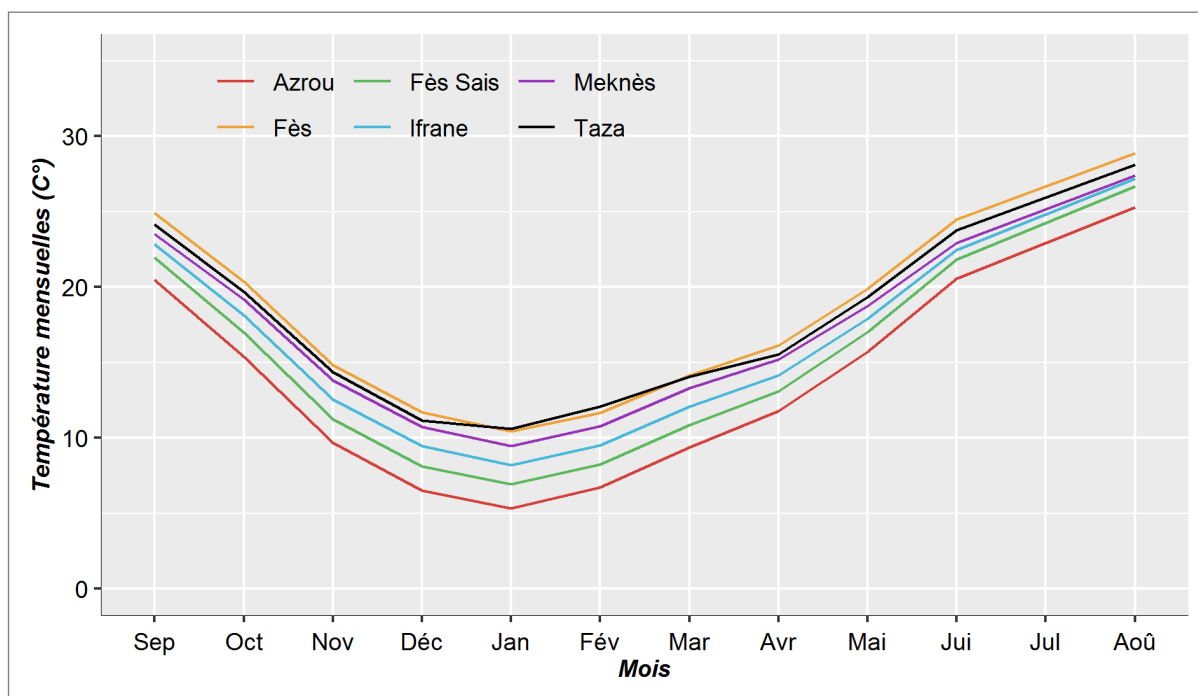


FIGURE 2.20. Variation de la température moyenne mensuelle entre 1985 et 2017 (ABHS)

maxima varient légèrement entre les stations en fonction de leur site dans la zone d'étude (altitude, exposition des versants).

3.2.1.3. Variation saisonnière de la température

D'après l'analyse des données de températures à l'échelle saisonnière dans la zone d'étude et

ses bordures (fig. 2.21), les valeurs de la température saisonnière enregistrées se caractérisent par une variation marquée. La température augmente en été, 29 C° environ dans la station de Fès et de Meknès et diminue en hiver avec 6 C° environ pour la station d'Azrou et 8 C° pour Ifrane (moyenne de la période 1985 - 2017).

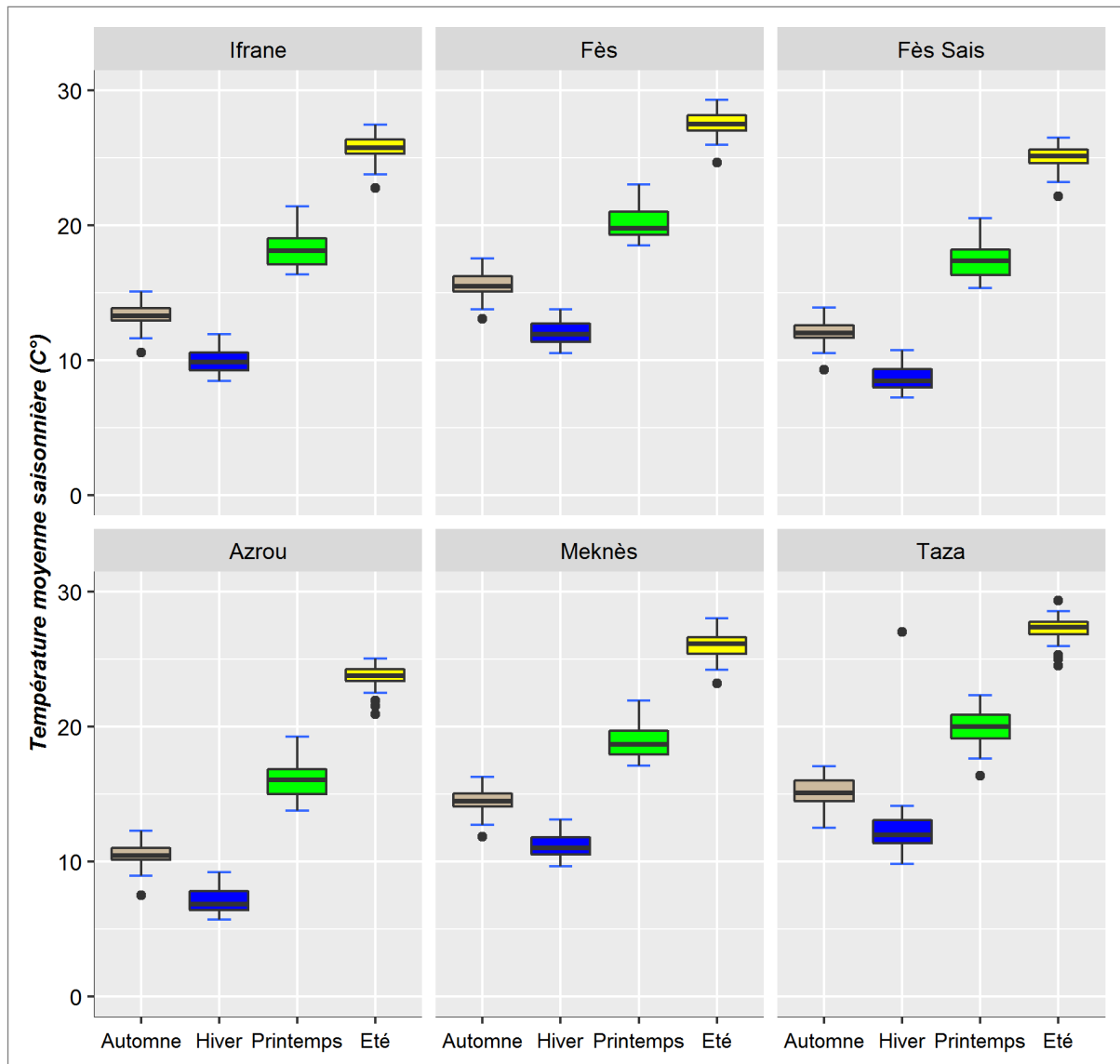


FIGURE 2.21. Variation saisonnière de la température (ABHS)

L'étude des variations saisonnières de la température dans la zone d'étude est très importante pour comprendre son impact sur les ressources en eau. L'augmentation remarquable de la température en été coïncide avec la période de la forte demande sur l'eau d'irrigation notamment dans les zones des dépressions (dépressions de Guigou, d'Imouzzer et de dayat Aoua, d'Afourgag...).

3.3. Les étages bioclimatiques

Dans les pays méditerranéens, la détermination des étages bioclimatiques se base essentiellement sur l'application d'indices qui combinent les données de la température et des précipitations. Parmi les indices bioclimatiques ceux d'Emberger (1955), de Gaussen et de Sauvage sont les plus utilisés pour caractériser les nuances que l'on trouve en Afrique du Nord et dans les régions méditerranéennes. Dans ce travail, l'indice pluviothermique d'Emberger a été appliqué (fig. 2.22) sur quelques stations dans le Moyen Atlas tabulaire et ses bordures pour déterminer les étages bioclimatiques. Cet indice s'exprime par la formule 1 tableau 2.4 :

Indicateur	Formule	N°
Indice d'Emberger	$Q = \frac{2000 * P}{M^2 - m^2}$	(1)

TABLEAU 2.4. Indice bioclimatique d'Emberger

Où :

P : les précipitations moyennes annuelles en mm

M : la température maximale du mois le plus chaud en Kelvin

m : la température minimale du mois le plus froid en Kelvin

Ce quotient, particulièrement adapté aux régions méditerranéennes, traduit le rapport entre la quantité des précipitations et la moyenne des extrêmes thermiques, le tout corrigé par l'amplitude thermique extrême ($M - m$). Emberger a remarqué que l'amplitude thermique est un facteur important de la répartition des végétations (Mokhtari et al., 2013). L'application de l'indice d'Emberger (fig. 2.22) et la carte figure 2.23 montrent que la zone d'étude se situe dans un milieu très hétérogène de point de vue bioclimatique. Les étages bioclimatiques retenus dans le Moyen Atlas tabulaire sont les suivants :

- + Étage bioclimatique semi-aride;
- + Étage bioclimatique sub-humide;
- + Étage bioclimatique humide.

Cette diversité bioclimatique contrôle la répartition de la végétation naturelle et les types des

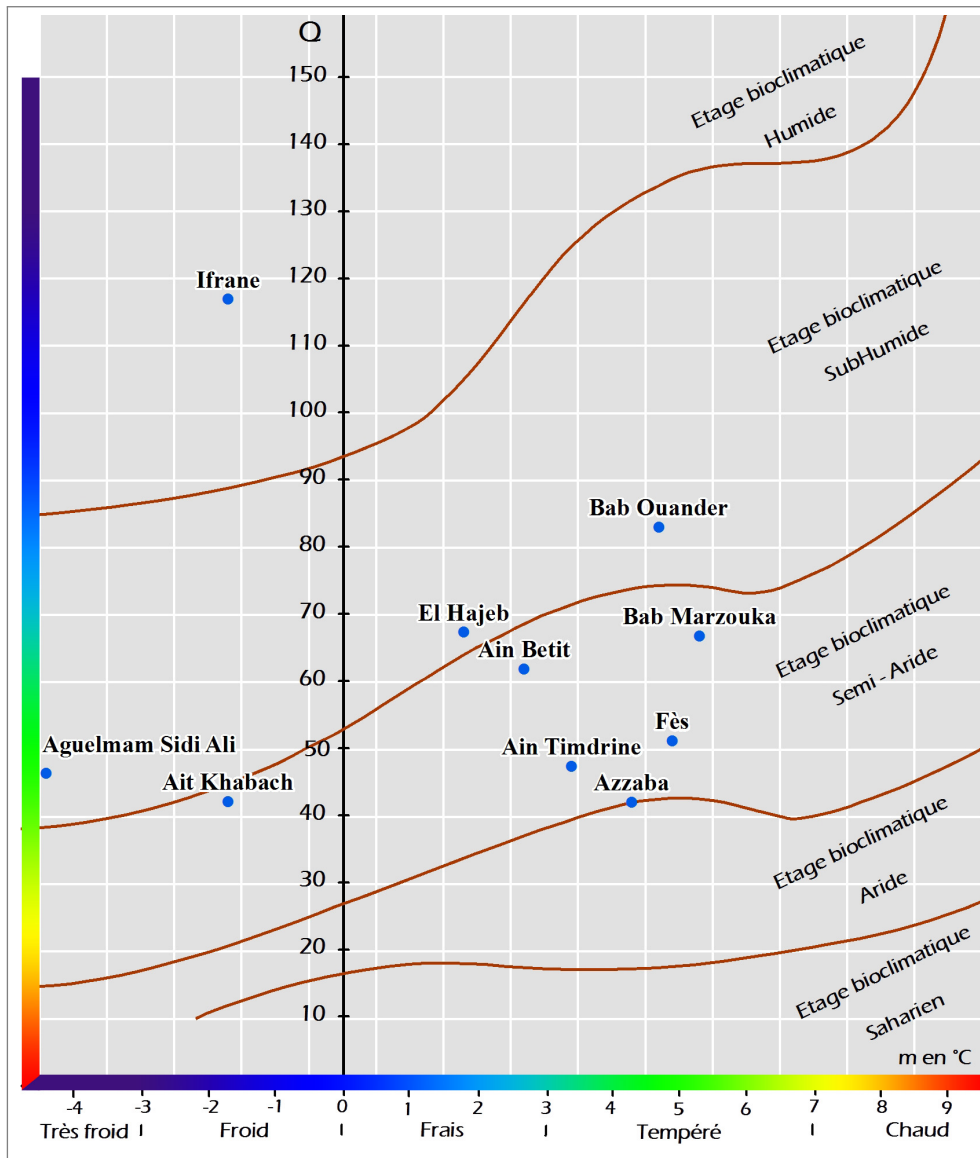


FIGURE 2.22. Situation de la zone d'étude dans le climagramme d'Emberger

cultures sur les dépressions des Moyen Atlas tabulaire. En effet, les dépressions situées dans l'étage bioclimatique semi-aride se caractérisent par la dominance des cultures maraîchères (pomme de terre, carotte, ...), on outre, les étages bioclimatique subhumide et humide se distingue par une prédominance des vergers de rosacées (pommier, pêchier, ...).

3.4. les ressources en eau

Le Moyen Atlas tabulaire est considéré parmi les zones les plus arrosées du Maroc. Il reçoit une quantité très importante de précipitations (pluie et neige) qui alimentent les réservoirs souterrains. Par sa situation géographique dans le Moyen Atlas tabulaire, la zone d'étude est caractérisée par la richesse des ressources en eaux superficielles et souterraines. Son émergence est liée à deux facteurs principaux : le facteur climatique et le facteur hydrogéologique.

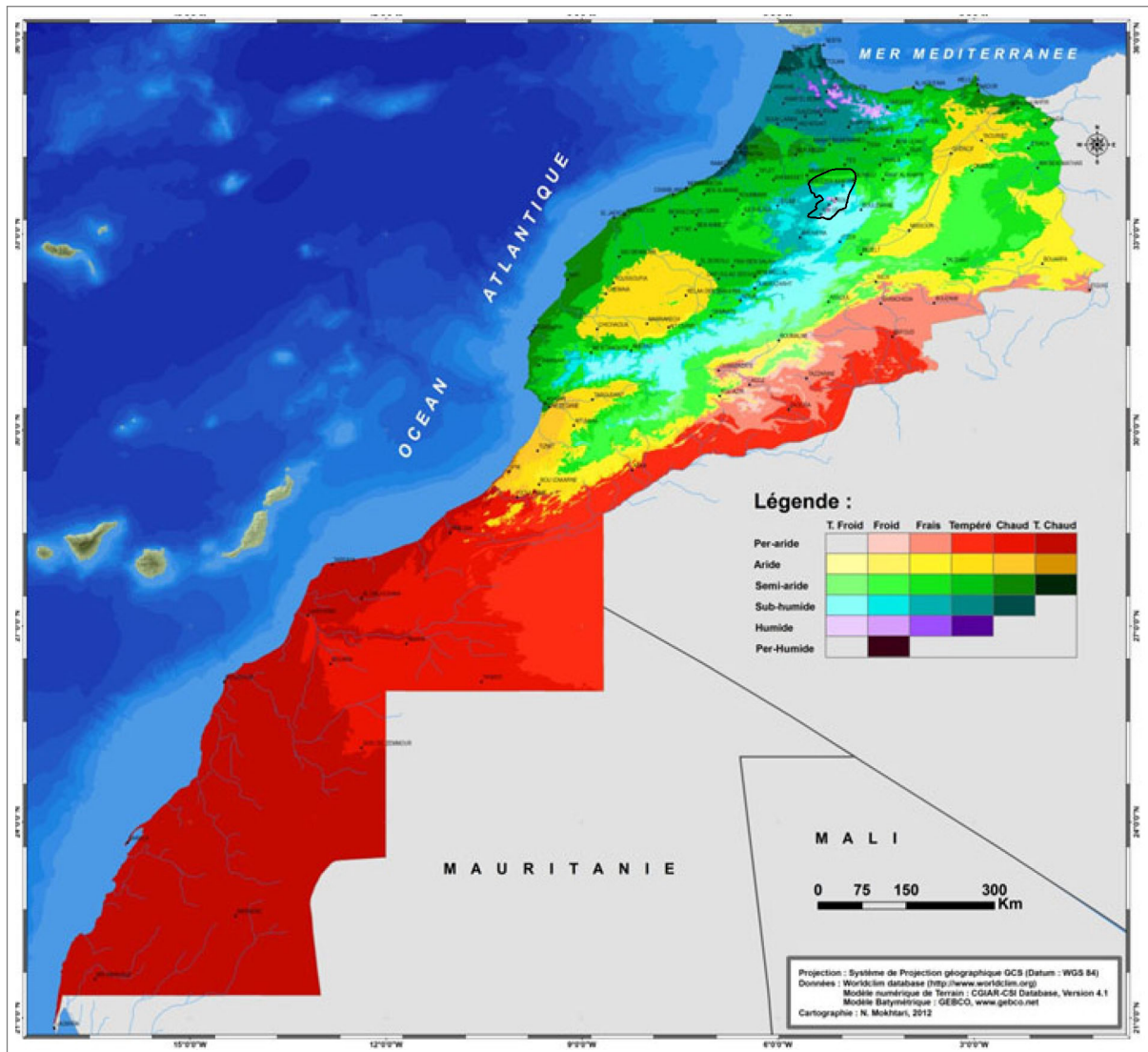


FIGURE 2.23. Carte des bioclimats selon la classification d'Emberger (Mokhtari et al., 2013)

3.4.1. Les nappes d'eau souterraines

La zone d'étude est caractérisée par la dominance des formations géologiques du Lias à haut coefficient de perméabilité et d'emménagement. Ainsi la structure faillée permet une meilleure perméabilité des eaux vers les réservoirs d'eau souterraines. Les cartes des figures 2.1 et 2.24 mettent en évidence des formations géologiques calcaires et quatre nappes phréatiques considérées parmi les plus importantes dans le bassin versant de Sebou. Il s'agit des nappes des causses moyens atlasiques, du Moyen Atlas plissé, du couloir Fès-Taza et de la nappe libre de Fès-Meknès.

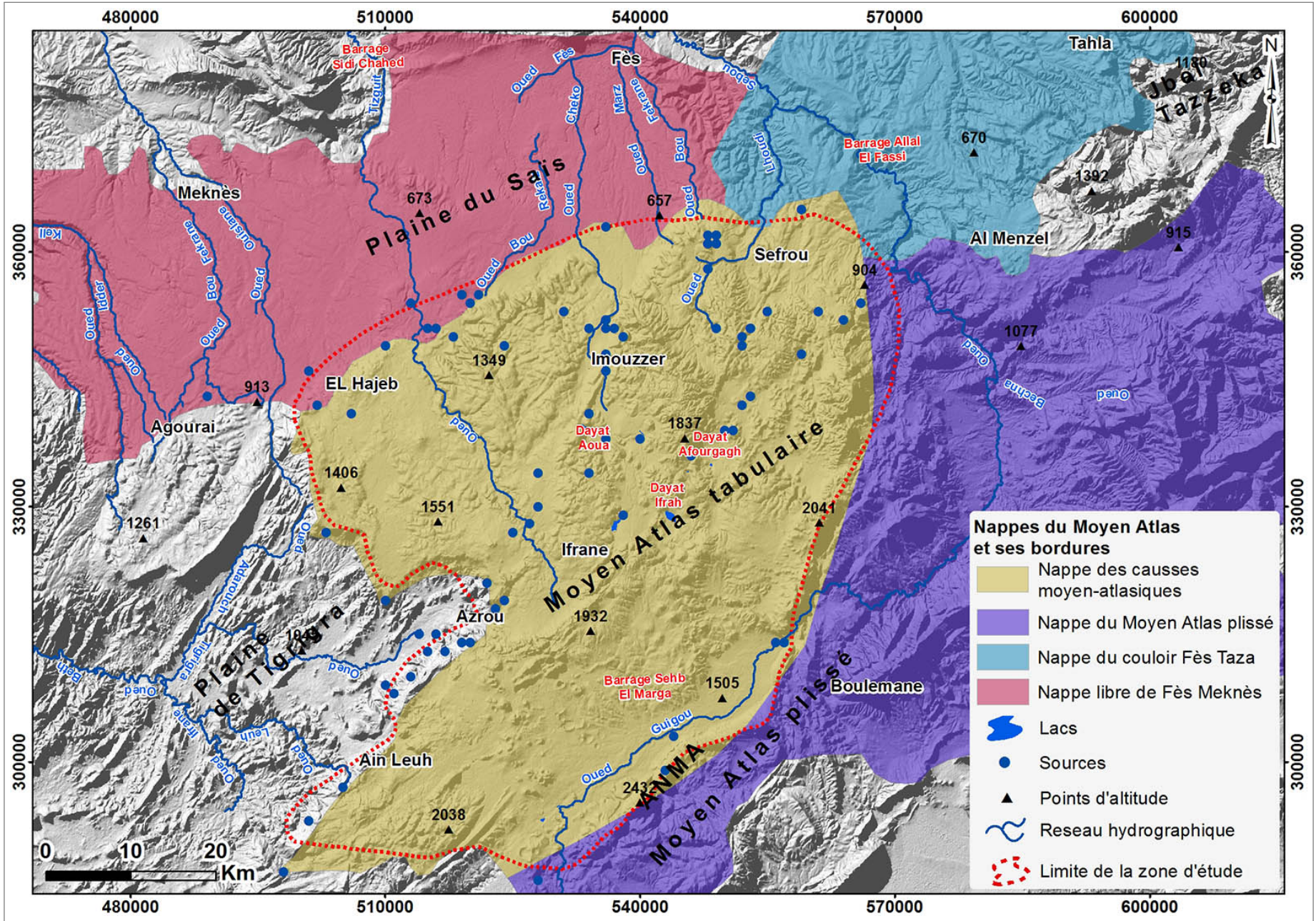


FIGURE 2.24. Répartition des nappes dans la zone d'étude (ABHS)

Plus de 95 % de la zone d'étude se situe sur la nappe des causses moyens atlasiques qui est encadrée entre le Moyen Atlas plissé au Sud et le bassin de Fès Meknès au nord. Cette nappe est caractérisée par la présence de deux types d'aquifères : L'aquifère calcaro-dolomitiques du Lias et L'aquifère basaltique du Quaternaire subdivisé (ABHS).

Ces caractéristiques physiques se traduisent par une variété des ressources en eau (sources, lacs et oueds) qui jouent un rôle majeur dans le développement des activités agricoles basées sur l'irrigation dans les dépressions intra-montagnardes du Moyen Atlas.

3.4.2. Les sources et les oueds

Dans le Moyen Atlas tabulaire, les écoulements de surfaces sont très faibles à l'exception de quelques oueds liés à des émergences dans le karst (Akdim et al., 2011) et dans le basalte. L'observation de la carte (fig. 2.24) montre l'organisation spatiale du réseau hydrographique qui se caractérise par une faible densité dans les formations perméables du Lias et relativement dense dans les bordures vers le Nord et vers l'Ouest (plaine de Sais et plaine de Tigrigra). L'hétérogénéité de l'organisation spatiale des écoulements dans la zone d'étude est liée à la combinaison complexe des facteurs topographiques et hydrogéologiques.



Photo 2.4 : Ain Bittit, exemple des sources situées dans les formations du Lias



Photo 2.5 : Ain Tit Zil, exemple des sources situées dans les formations basaltiques du quaternaire

FIGURE 2.25. Les sources dans la zone d'étude

Dans ce travail, la répartition des sources se base sur une étude réalisée par l'agence du bassin hydraulique du Sebou (ABHS) en 2005. D'après la carte (fig. 2.24) nous observons une concentration notable des sources sur les formations calcaires du Lias, sur les formations basaltiques du quaternaires et dans les zones de contact avec d'autres formations (zone de transition entre

le Moyen Atlas tabulaire et la plaine de Sais et la plaine de Tigrigra). Ces sources se caractérisent par un débit variable qui oscille entre moins de 1 l/s pour plusieurs sources à plus de 1300 l/s pour la source de Bittit (tableau 2.5).

Source	X	Y	Q l/s	Source	X	Y	Q l/s
Sources du Lias				Si Lmir	520001	354001	16
Bittit	519001	355000	1324	Ghazi	548001	358001	15
Tizdelt	498001	287001	318	Ajaabou	505000	297000	14
Regrag	561001	353001	302	Aghbalou Tajana	559000	348001	12
Sebaa	521001	355000	300	Kerma	549000	351000	12
Sidi Mimoune	540001	338001	252	Akheta Aghebalou	551001	339001	11
Aioun Sidi Rached	523001	318000	212	Oued Tafrant Aval	536001	352000	11
Ribaa amont	515001	351000	196	Tafrante	538001	350001	11
Akkous	513000	354001	195	Aboua I	536001	352000	10
El Ghars	534001	341001	178	Attrous	516000	351000	10
Ras El Ma	524000	319001	169	Boudouba	506000	341001	10
Soltane	536001	348001	164	El Caid	548001	362000	9
Soltane	536000	347000	150	Tit Lahcen	516001	315000	7.5
Zerrouka	527001	328000	146	Sihand	502000	341001	6
Aghebal	501000	346001	115	Abbes	548001	358001	5
Guigou	557000	314001	115	Aboua II	536001	352000	5
Aguemguem	518001	350000	100	Tiline	537001	351001	5
Agla	534001	351000	97	Soltane	536001	346001	5
Berouagha	536000	363001	86	Mghara	555001	353001	4
Tizguit	525001	327001	83	Fraj	549000	362001	3
Boujaoui	489001	343001	79	Abbes	548001	358001	3
Guemgam	538001	329001	69	Aghbalou Takaltount	546001	336001	2.5
Mterba	559000	365000	55	Abouda	553000	351001	2
Aghbal Oujdate	552001	342001	50	Jorf	550001	339001	2
Aioun O. Afferane	502001	342000	50	Lakbira	566001	354001	2
Berri I	536000	351001	50	Zouaoua	549001	362001	2
Si Bouali Ouarfa	536000	338000	50	Ain Annaka	510000	349001	1.5
Jerrah	536001	346001	47	Laanina	548001	361001	1.5
Ben Smim	522000	321001	38	Aghbalou Ouketta	510000	309000	1
Chifa	534000	334000	38	Chreb Ou Hreb	552001	350001	1
Ribaa Aval	515000	351000	36	Hlal	553000	351000	1
Ayoun Sname	553001	343000	33	Louanat Chreb	549001	362000	1
Sidi Bouali	564000	352001	33	Kahf El Hammam	548000	361001	1
Dhiba	502001	342001	32	Berrar	548000	361001	0.8
Kebir Tagourmat	551001	339001	30	Sources des basaltes quaternaires			
Mersa	528000	334001	30	Titzil	544001	303001	311
Aicha Hmad	501001	293001	26	Ighboula Laachour	528001	286001	24
Azila	503000	327000	25	Schoui	543001	299000	19
ighfou Oughbalou	563000	349001	25	Guigou	530001	293001	9
Ikhlouya	504000	344000	25	Aghbal	514000	315001	279
Karma	553000	351001	22	Aioun Amghas	592001	310000	211
Berri Sghira	536000	352000	20	Aquadous	507001	301000	29
Bou Said	531001	353000	20	Kherzouza JS	515000	313000	0.9
Oued Mouali	528000	330000	20	Aicha Mbarek	513000	310000	0.2
Rechoua	510000	319000	20				

TABLEAU 2.5. Débits des sources mesurés en 2005 par l'ABHS

3.4.3. Les Lacs

Bien que le secteur d'étude présente une lithologie très largement filtrante, il peut y avoir la formation de lacs dans des dépressions colmatées par des argiles. La zone d'étude comprend 6 lacs (Aoua, Ifrah, Afourgagh, Iffer, Hachelaf et Sidi Mimoun) (photos 2.6 à 2.11 *in* fig. 2.27 et tableau 2.6), tous situés à une altitude supérieure à 1350 m. Leur superficie est comprise entre 5 ha pour le lac Iffer et plus de 190 ha pour le lac Ifrah. Les lacs se situent sur des formations lithologiques perméables (calcaires du Lias et dolomies du quaternaire) et se localisent dans des étages bioclimatiques humides et sub-humides.

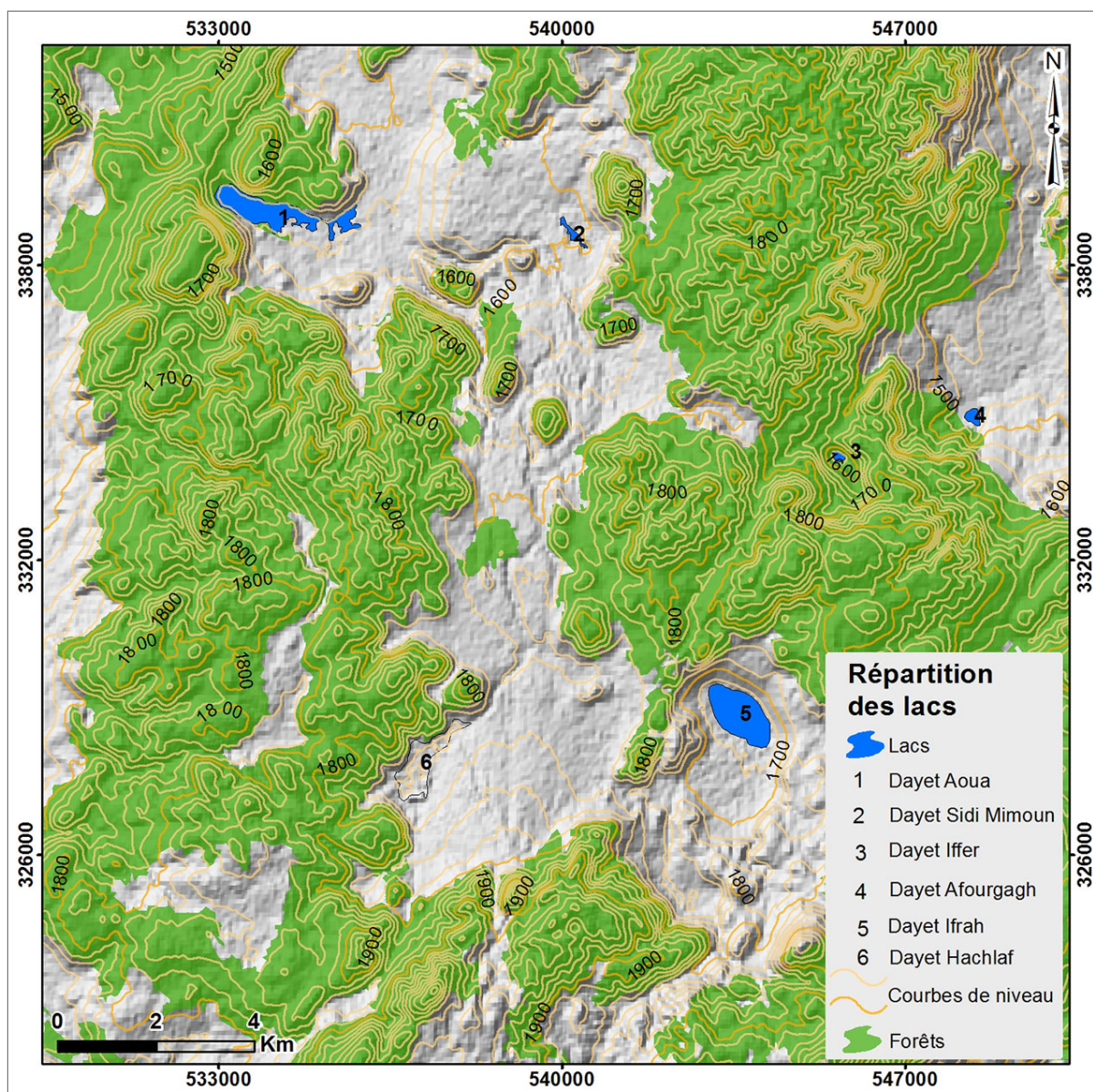


FIGURE 2.26. Répartition des principaux lacs dans la zone d'étude

Lac	Altitude	P Moyen mm	Type	Etage bioclima- tique	Substrat	Genèse et origine
Aoua	1460	750	Permanent avec des épisodes d'assèchement	Humide et sub-humide à hiver froid	Dolomies et calcaires lités	Karstification et fracturation intense du substrat; facteur tectonique prépondérant
Ifrah	1610	650	Permanent	Subhumide à hiver froid	Dolomies recouvert localement de calcaires lités du Lias	Principalement tectonique
Iffer	1520	650	Permanent	Subhumide à hiver froid	Dolomies recouvert localement de calcaires lités du Lias	Tectonique avec la karstification comme phénomène secondaire
Hachlaf	1660	750	Sèche avec des épisodes de remplissage	Humide et sub-humide à hiver froid	Dolomies et calcaires lités	Karstification et fracturation intense du substrat; facteur tectonique prépondérant
Afourgagh	1380	500	Permanent	Subhumide à hiver froid	Dolomies recouvert localement de calcaires lités du Lias	Tectonique avec la karstification comme phénomène secondaire

TABLEAU 2.6. Caractéristiques des lacs dans la zone d'étude

(ABHS, 2010)



Photo 2.6. Dayet Aoua



Photo 2.7. Dayet Ifrah



Photo 2.8. Dayet Afourgagh



Photo 2.9. Dayet Sidi Mimoun



Photo 2.10. Dayet Hachelaf

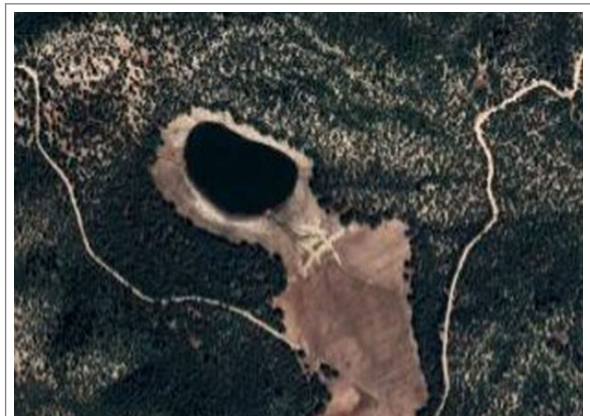


Photo 2.11. Dayet Iffer

FIGURE 2.27. Les principaux lacs dans la zone d'étude

Les lacs du Moyen Atlas constituent des zones humides à haute valeur écologique, mais durant ces dernières années ils ont subi de grandes perturbations en raison de l'intensification des activités anthropiques et de la succession des années sèches. Les différents aspects de leur dégradation se traduisent localement par une régression de leur superficie (dayet Afourgagh, dayet Iffer et dayet Ifrah) et l'assèchement total de plusieurs d'entre eux (dayet Aoua et dayet Hachelaf). Le suivi de la variation de niveau des lacs est abordé en détail dans la troisième partie.

Conclusion

L'étude du contexte géologique met en évidence une forte prédominance des formations à fort coefficient de perméabilité et d'emménagement de l'eau sur des altitudes supérieures à 1000 mètres et des pentes généralement très faibles à faibles.

L'étude des caractéristiques climatiques dans le Moyen Atlas tabulaire et ses bordures montre qu'elles se caractérisent par un fort contraste spatial, annuel, mensuel et saisonnier. L'abondance relative des précipitations en hiver sur la zone d'étude favorise le remplissage des réservoirs karstiques et donne naissance à des oueds (Sebou, Oum Errabia, Moulouya) sources (Ain Bittit, Ain Ribaa, Ain Titt Zill), lacs (dayet Aoua, dayet Ifrah, dayet Afourgagh) et puits. La variété des ressources en eau a conduit à une dynamique récente très flagrante des surfaces agricoles irriguées notamment dans les zones des dépressions intra-montagnardes (Imouzzer, Guigou, Afourgagh).

CHAPITRE 3

Chapitre 3 : Le contexte socio-economiques de développement des surfaces agricoles

Introduction

Au cours des dernières décennies, l'agriculture marocaine a enregistré de grands progrès en termes de modernisation, de diversification et d'extension ([MAPMDREF, 2018](#)). Au Maroc, l'activité agricole constitue l'un des piliers économiques du pays. Elle offre en effet des milliers d'emplois et contribue pour une large part (13 % environ) au produit intérieur brut (PIB). L'évolution de l'agriculture au Maroc va de pair avec des modifications profondes des modes d'occupation et d'utilisation des sols ce qui conduit à des transformations paysagères remarquables. Un rappel sur cette évolution est abordé avant d'analyser la situation actuelle de l'occupation des sols dans le Moyen Atlas tabulaire et les facteurs intervenant dans les grandes transformations actuelles des paysages agricoles.

1. Aperçu sur l'histoire de l'agriculture au Maroc

Une étude réalisée dans le cadre d'un programme de recherches pluridisciplinaires entre l'Institut national des sciences de l'archéologie et du patrimoine (Rabat) et la mission Préhistorique Française au Maroc ([Marinval, 2001](#)) atteste que l'agriculture au Maroc remonte au Mésolithique et au Néolithique ancien. Plusieurs autres études renseignent sur les situations évolutives de l'agriculture au Maroc, les types de cultures et les techniques agricoles utilisées ([Le-Chatelier, 1902](#) ; [Mouliéras, 1899](#)). Au cours du temps et avec l'apparition de facteurs catalyseurs pour la mise en place des périmètres agricoles, l'agriculture est devenue l'un des piliers économiques du Maroc.

La succession des programmes agricoles menés par l'État ainsi que la prise de conscience des

populations pour mieux exploiter les ressources ont abouti à des mutations socio-spatiales profondes à l'origine d'une pression très forte sur l'environnement en général et les ressources en sol et eau en particulier. Ci-après, une présentation des phases de l'évolution de l'agriculture au Maroc.

1.1. Une faible extension des surfaces agricoles durant la période précoloniale

Le Maroc précolonial est caractérisé par une organisation tribale et un système de production mixte agro-pastoral (Denoix, 1999 ; Vatin, 1982) avec une économie rurale fragile : « *la structure sociale de base était la famille nucléaire ou élargie selon les conditions démographiques et l'inscription dans l'espace de la population se faisait dans les douars, groupements de lignages* » (Denoix, 1999).

Durant cette période, l'économie du Maroc était une économie de substances qui renvoie à des pratiques traditionnelles d'occupation et d'utilisation des terres. La superficie des cultures irriguées et pluviales était très faible. Avant la colonisation, des transformations décisives ont cependant été enregistrées dans la campagne marocaine sous l'impact conjugué des crises de subsistance et de l'endettement de la paysannerie (Ennaji, 1992). Cela a induit de profondes modifications dans le monde rural au cours de la deuxième moitié du XIX^e siècle qui sont, toujours selon Ennaji (1992), la concentration et la privatisation des terres, et « *la formation d'une classe de grands propriétaires fonciers d'origine citadine ou rurale recouvrant des statuts différents : zaouias, chorfas, bourgeoisie urbaine, hauts dignitaires, caïds, notables* ».

D'autres études menées sur le Maroc précolonial s'intéressent aux différentes entités géographiques ; plaines, oasis, montagnes, ... et montrent les différentes formes d'organisation spatiale et d'occupation des terres. Une étude de Ftaita (2006) sur les oasis des Oulad Jerrar a mis en évidence la relation entre l'homme et son existence dans les oasis qui se base sur l'abondance des ressources en eau pour assurer l'irrigation des jardins à l'abri des palmiers. Aussi, selon Jennan (1986) le Moyen Atlas précolonial est caractérisé par une organisation tribale basée sur le semi-nomadisme et la transhumance : « *Un déplacement permanent des populations et des bêtes s'ensuivait et, de ce fait, une organisation rigoureuse obéissant à des règles de voisinage fut mise en place par les tribus et régie par "l'orf", droit coutumier, auquel se réfèrent les Jmaâ*

dans la gestion de leurs affaires économiques, politiques ou sociales ». Dans le Moyen Atlas et ses bordures, les mouvements des populations et des troupeaux étaient calqués sur les saisons ; le jbel en été et l'azarhar en hiver.

Au final, l'agriculture dans le Maroc précolonial occupait très peu de terre et a été caractérisée par une faible intervention de l'État.

1.2. L'augmentation des surfaces agricoles durant la période coloniale

Jusqu'à 1925, l'intervention administrative dans le domaine agricole est principalement une aide sous forme de primes efficientes pour beaucoup d'agriculteurs (Carle, 1925). L'agriculture, pratiquée sur les grandes surfaces, était basée sur les précipitations (culture en bour). Durant cette période, la colonisation française occupe les grandes plaines ce qui sape les fondements du système pastoral et provoque la perturbation des axes des parcours (Celerier, 1927 ; Jennan, 1986). La réduction des mouvements de troupeaux entre la plaine et la montagne a favorisé l'apparition de noyaux de sédentarisation dans les piémonts et les vallées intra-montagnardes et a conduit à la dynamique des surfaces agricoles notamment dans les grandes plaines (Gharb, Sebou, Chaouïa, Abda, Doukkala), ainsi qu'à la mise en place des premiers périmètres agricoles alimentés par les oueds de l'Atlas (oued Sebou, oued Oum Er-Rbia, oued Moulouya, oued Beht) qui « *roule des eaux tout le long de l'année* » (Marcel, 1933).

Marcel (1933) a également montré que les colons ont cherché les types de cultures les plus adaptées aux conditions marocaines (climat, sol, voies de communication ...). Les premiers essais pour planter du coton, du chanvre, du lin ou de la betterave ont échoué. « *Par contre, la production des primeurs et des fruits donne beaucoup d'espoirs, et leur développement rapide marque une orientation nouvelle de l'agriculture* ». Les nouvelles cultures (légumes frais, primeurs, cultures fruitières) occupent peu à peu les terres des grandes plaines humides et fertiles. Dans la région de Doukkala, l'augmentation de la population européenne influence la nature de la production agricole et l'organisation des systèmes de production, qui s'accompagne d'une diminution de la superficie non agricole (Sghir, 2002). En parallèle, la crise de la transhumance s'accroît notamment après la délimitation des chemins de parcours des troupeaux, la délimitation des terres collectives et la mise en défens des forêts domaniales (Jennan, 1986).

1.3. Le développement de l'agriculture après l'indépendance

Au cours des premières années de l'indépendance, l'agriculture a été placée au cœur de la politique de développement économique du Maroc (Jouve, 2002). En effet, l'État a opté pour la mise en valeur des potentialités dont dispose le pays sur la base des actions engagées par les colons. En poursuivant le développement des périmètres et en modernisant l'agriculture (Khrouz, 1992), le secteur agricole est ainsi hissé au niveau des grandes priorités des plans de développement économique et social que le pays met en œuvre (El-Khyari et Amin, 1987).

Durant la première décennie de l'indépendance (1956-1965), cette modernisation bénéficie de la création de l'office national d'irrigation (ONI) en 1960 pour la mise en valeur des périmètres irrigués, puis de l'office national de modernisation rurale (ONMR) en 1962 pour la mise en valeur des terres bour. En 1965 l'ONI est remplacé par l'Office de Mise en Valeur Agricole (OMVA) puis par les offices régionaux de mise en valeur agricole (ORMVA) (Akesbi, 2005). En raison de problèmes socio-économiques que connaît le Maroc, trois plans sont successivement mis en œuvre, le Plan quinquennal (1960-1964), le Plan triennal (1965-1967) et le Plan quinquennal (1968-1972). À ce stade, l'intervention de l'État dans le domaine de l'agriculture a été sélective et les mesures d'investissement agricole favorisent essentiellement les grandes régions hydrauliques (Akesbi, 2005 ; Le-Coz, 1968).

Si les interventions successives de l'État dans le domaine de l'agriculture ont favorisé l'augmentation des surfaces des terres cultivées, celles-ci restent très vulnérables aux aléas climatiques. C'est la raison pour laquelle la nouvelle politique menée par le Roi Hassan II est celle de la grande hydraulique (1966-1985), qui constitue le fleuron de la stratégie agricole marocaine. A ce propos Jouve (2002) écrit : « Cette politique dite du million d'hectares irrigués qui a joué le rôle de mythe mobilisateur se proposait de relever deux défis majeurs » :

- > Assurer la sécurité alimentaire d'une population en croissance très rapide,
- > Intensifier l'agriculture, secteur prioritaire dans tous les plans de développement, en levant la contrainte primordiale de la pluviométrie, trop faible et trop irrégulière.

En parallèle avec cette ambitieuse « politique des barrages », des moyens financiers, techniques,

institutionnels et organisationnels ont été mis en place pour le développement des cultures irriguées notamment dans les grandes plaines. Grâce à cette politique le nombre des barrages enregistre une augmentation très importante entre 1950 et 2015 (fig. 3.1). Les 140 grandes barrages dont dispose le Maroc jusqu'à 2015 mobilisent une capacité globale de plus de 17,6 Milliards de m³ (El-Ghomari, 2016).

Le tableau 3.1 montre les superficies irrigables et équipées (ha) dans les régions pilotes du Maroc. En quelques décennies l'agriculture marocaine connaît une augmentation remarquable des superficies irrigables (880200 ha) et d'équipements utilisés dans la mise en place et le développement des périmètres irrigués (671700 ha).

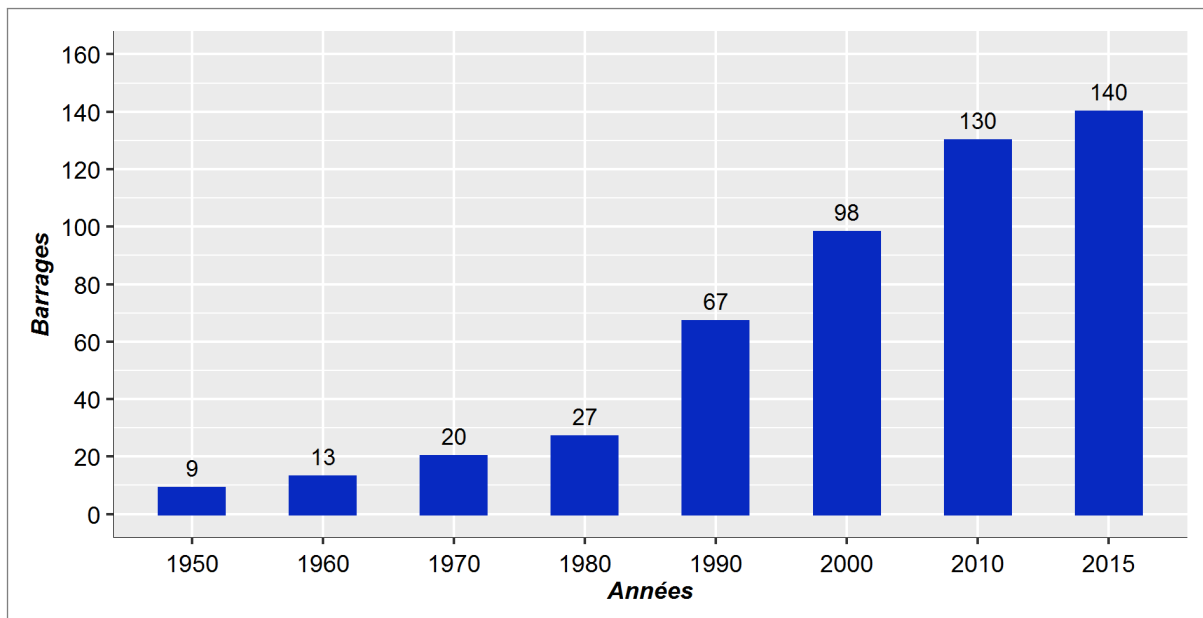


FIGURE 3.1. Évolution du nombre de barrages au Maroc entre 1950 et 2015

(El-Ghomari, 2016)

Si les interventions étatiques dans le domaine de l'agriculture depuis l'indépendance jusqu'aux années 80 ont modernisé l'agriculture dans les grands périmètres irrigués (Doukkala, Gharb, Haouz, Loukkos, ...), les milieux montagnards sont restés isolés de ces développements, ce qui a amplifié la problématique de l'exode rural vers les grandes villes. Les premières interventions de l'Etat dans le domaine de l'agriculture au Maroc ont donc été sélectives et ont contribué aux déséquilibres sociaux et économiques entre les régions, mais en 2008, l'Etat lance le PMV (Plan Maroc Vert) (MAPMDREF; ADA) qui propose une nouvelle stratégie de développement agricole intégrant la grande hydraulique, les zones périphériques et les campagnes.

ORMVA	Superficies irrigables (ha)	Superficies équipées (ha)
Doukkala	133 600	104 600
Gharb	222 500	106 400
Haouz	189 900	142 600
Loukkos	33 700	26 400
Moulouya	77 300	77 300
Ouarzazate	37 600	37 600
Souss-Massa	39 900	39 900
Tadla	117 800	109 000
Tafilalet	27 900	27 900
Total	880 200	671 700

TABLEAU 3.1. Superficies irrigables et équipées dans la zone d'action des Offices de mise en valeur agricole marocains en 2000

Administration du génie rural in [Jouve \(2002\)](#)

Globalement, les interventions du Plan Maroc Vert dans le domaine de l'agriculture moderne visent (PMV. 2008) :

> « *Le développement accéléré de l'agriculture à forte valeur ajoutée et à forte productivité. Cela passe par la création volontariste de pôles de développement agricoles et agroalimentaires à forte valeur ajoutée, répondant pleinement aux exigences du marché* ».

> « *Le déclenchement d'une nouvelle vague d'investissement massif autour de nouveaux acteurs à forte capacité managériale, rationalisation des structures de l'industrie et mutualisation des moyens autour de groupement d'intérêt économique (GIE) privés et de groupements interprofessionnels* ».

> « *Le développement d'une agriculture performante, adaptée aux règles du marché, grâce à une nouvelle vague d'investissements privés, organisés autour de nouveaux modèles d'agrégation équi-*

tables ».

Dans les zones périphériques et les campagnes, les objectifs des interventions dans le cadre du Plan Maroc Vert sont :

> Le développement d'une approche orientée vers la lutte contre la pauvreté, en augmentant de manière significative le revenu agricole des exploitants les plus fragiles, notamment dans les zones périphériques.

> La mise à niveau et l'augmentation du revenu agricole comme moteur de lutte contre la pauvreté rurale et la mise en œuvre d'importants moyens financiers.

> Une lutte contre la pauvreté plus efficace et à plus grande échelle dans les campagnes, et dans les zones périurbaines défavorisées.

Globalement, les subventions engagées par le Plan Maroc Vert ont permis le développement des secteurs piliers de l'agriculture marocaine (Doukkala, Gharb, Haouz, Loukkos, ...). Ainsi, l'intervention du PMV dans les milieux montagnards a largement contribué au développement de l'agriculture dans les dépressions intra-montagnardes.

1.4. L'extension des cultures dans le Moyen Atlas

Le Moyen Atlas a fait l'objet de plusieurs projets de développement (Bekkari, 2009 ; Bekkari et al., 2008). À partir des années 50, certaines zones du Moyen Atlas ont bénéficié d'un aménagement de moyenne hydraulique pour répondre aux répercussions de la famine de 1945. Selon Jennan (1986) et Tag et Loew (2000), la cuvette de Skoura était parmi les premiers périmètres aménagés dans le cadre d'aménagement hydro-agricole. Ce projet a commencé à partir de 1950 et s'étend jusqu'à 1974 (tableau 3.2). Cependant, ces mêmes auteurs soulignent l'échec de cet aménagement lié aux litiges entre les tribus et au refus de cet aménagement par les populations locales. Il s'en suit l'abandon du réseau de canaux et des sols nus exposés à l'érosion (photos 3.1 et 3.2 in fig. 3.2). Après cette période, le Moyen Atlas connaît des interventions sous forme de projets pour répondre aux problématiques sociales et environnementales.

Les premiers projets qui s'intéressent partiellement au Moyen Atlas (projet de Sebou, projet de

Période	Superficie aménagée (ha)	Superficie irrigable (ha)	Société responsable de l'aménagement	Débit prévu (l/ha)
1950 - 1959	622	600	SOGETIM	0.6
1960 - 1969	655	665	SOCORES	0.75
1969 - 1972	578	560	SICORES	0.74
1974 - 1974	190	190	D.P.A/D.R.S	0.75
Total	2055	2015		

TABLEAU 3.2. Les phases d'aménagement hydro-agricole du périmètre de Skoura

(Tag et Loew, 2000)



Photo 3.1 : Équipements hydrauliques abandonnés

Photo 3.2 : Équipements hydrauliques abandonnés

FIGURE 3.2. Équipements hydrauliques abandonnés dans la cuvette de Skoura

(Qadem, 2015)

DERRO) ont pour objectifs principaux la lutte contre l'érosion et la protection de la plaine de Gharb contre les inondations (El-Jihad, 2016). À partir des années 80, le lancement du Projet du Moyen Atlas Central (PMAC) constitue un programme ambitieux et le premier du genre à cibler une partie de cette région (Bekkari, 2009). « Le projet a été formulé en 1979 durant une période pendant laquelle la part de l'agriculture dans l'économie marocaine était en déclin et sa contribution au PIB était de l'ordre de 13 %, par rapport aux 20 % qu'elle représentait au début des années 70 » (Banque-Mondiale, 1992). Les questions qui y sont abordées sont focalisées sur le développement de la production agricole, des parcours, des forêts et la remise en état de 2000 ha de périmètres de petite irrigation traditionnelle. En effet, durant les années 1980, le Maroc

a subi une sécheresse climatique très sévère (Barakat et Handoufe, 1997 ; Labouesse, 1986 ; Stour et Agoumi, 2008), entraînant une perturbation des systèmes agricoles basés sur les précipitations (diminution de rendement des terres, dégradation des terres de pâturages...) et un déficit hydrologique marqué (tarissement des sources, assèchement des lacs).

L'augmentation des effets négatifs de la sécheresse sur l'agriculture traditionnelle à partir des années 1980 constitue un élément catalyseur de l'intégration des populations rurales dans les projets de développement. L'ensemble des interventions étatiques dans le cadre des PDR (Programme de Développement Régional) a participé partiellement à l'extension des cultures irriguées dans les dépressions du Moyen Atlas. Ainsi, les interventions dans le cadre du PMV provoquent une extension remarquable des cultures irriguées dans le Moyen Atlas et ses bordures. La nouvelle orientation vers les cultures irriguées dans les montagnes permet d'améliorer les rendements agricoles (pomme de terre, carotte, oignon, rosacées) en contournant partiellement le déficit pluviométrique conjoncturel.

2. L'occupation des sols dans le Moyen Atlas tabulaire

Dans ce travail, l'étude de l'occupation des sols dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire occupe une place très importante puisqu'elles sont à la fois l'expression du développement agricole de cette région naturelle longtemps délaissée et des facteurs de pression sur la ressource en eau. Dans ce chapitre nous présentons la situation d'occupation des sols dans la zone d'étude en 2018. La cartographie de l'occupation des sols à l'échelle de la zone d'étude est réalisée à partir des images satellites Landsat 8 (fig. 3.3). La méthodologie suivie pour l'extraction de l'information s'appuie sur le travail de terrain et l'application de la méthode qui se base sur l'apprentissage automatique (machine learning). Quatre grandes classes thématiques qui composent les paysages de cette région sont distinguées : cultures irriguées, cultures pluviales, forêts et terrains incultes.

2.1. Cultures irriguées

Les cultures irriguées occupent une superficie d'environ 5 % de la zone d'étude (fig. 3.5). L'observation de la carte (fig. 3.3) montre que ce type de cultures s'étend essentiellement dans les dépressions intra-montagnardes (dépression de Guigou, dépression d'Imouzzar, dépression de

3.3 à 3.10 in fig. 3.4 et fig. 3.6) illustrent les différents types de cultures irriguées présentes dans la zone d'étude.



Photo 3.3. Pomme de terre dans la plaine de Guigou



Photo 3.4. Carotte à Timahdite



Photo 3.5. Oignon dans la plaine de Guigou



Photo 3.6. Luzerne dans la plaine de Guigou

FIGURE 3.4. Cultures maraîchères et fourragères irriguées dans la zone d'étude (août 2018)

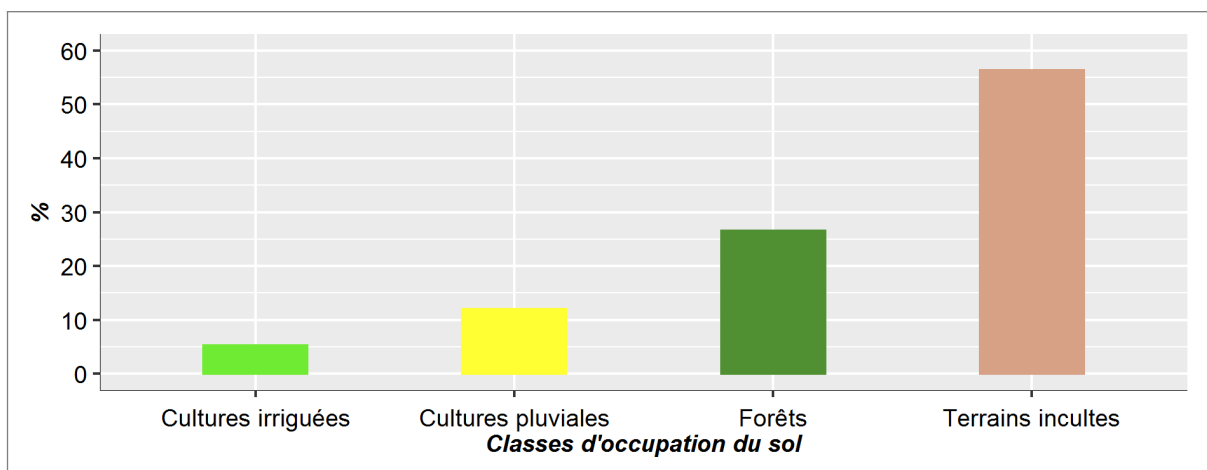


FIGURE 3.5. Pourcentage d'occupation des sols dans la zone d'étude en 2018



Photo 3.7. Pommier dans la dépression d'Imouzzzer



Photo 3.8. Pêchier dans la dépression d'Imouzzzer



Photo 3.9. Nectarinier dans la dépression d'Imouzzzer



Photo 3.10. Poirier dans la dépression d'Imouzzzer

FIGURE 3.6. Vergers de rosacées dans la dépressions d'Imouzzzer

2.2. Cultures pluviales

Les cultures pluviales représentent une superficie d'environ 12 % de la zone d'étude (fig. 3.5). Généralement, ce type de cultures occupe une superficie limitée dans les dépressions. La carte (fig. 3.3) montre que la majorité des cultures sèches se localisent essentiellement sur les bordures de la zone d'études vers le Nord (plaine de Sais). Le type de cultures pluviales (photos 3.11 et 3.12 *in* fig. 3.7) varie également d'une zone à l'autre (blé, orge, avoine).

2.3. Forêts

La richesse des écosystèmes forestiers du Moyen Atlas a été abordée par plusieurs auteurs (Benabid, 1988, 2000 ; Labhar et Lebaut, 2012 ; Lecompte, 1986). La diversité des essences forestières du Moyen Atlas (photos 3.13, 3.14 et 3.15 *in* fig. 3.8) varie en fonction des conditions climatiques. La carte phytogéographique réalisée par Emberger (1939) indique que le Moyen



Photo 3.11. Orge dans la dépression de Guigou



Photo 3.12. Avoine dans la dépression de Guigou

FIGURE 3.7. Cultures pluviales dans la dépression de Guigou, août 2018

Atlas central appartient presque entièrement aux climats du Chêne vert et du Cèdre (Lecompte, 1986), ce que confirme la carte de la figure 3.9 sur la zone d'étude.



Photo 3.13. Cèdre



Photo 3.14. Pins



Photo 3.15. Chêne vert

FIGURE 3.8. Les essences forestières dans la zone d'étude

Les forêts du chêne vert et du cèdre constituent respectivement plus de 73 % et environ 23 % de l'ensemble des surfaces forestières présentes dans la zone d'étude. Le reste des essences, chêne zeen, pins et chêne-liège, couvre une superficie limitée d'environ 3 %.

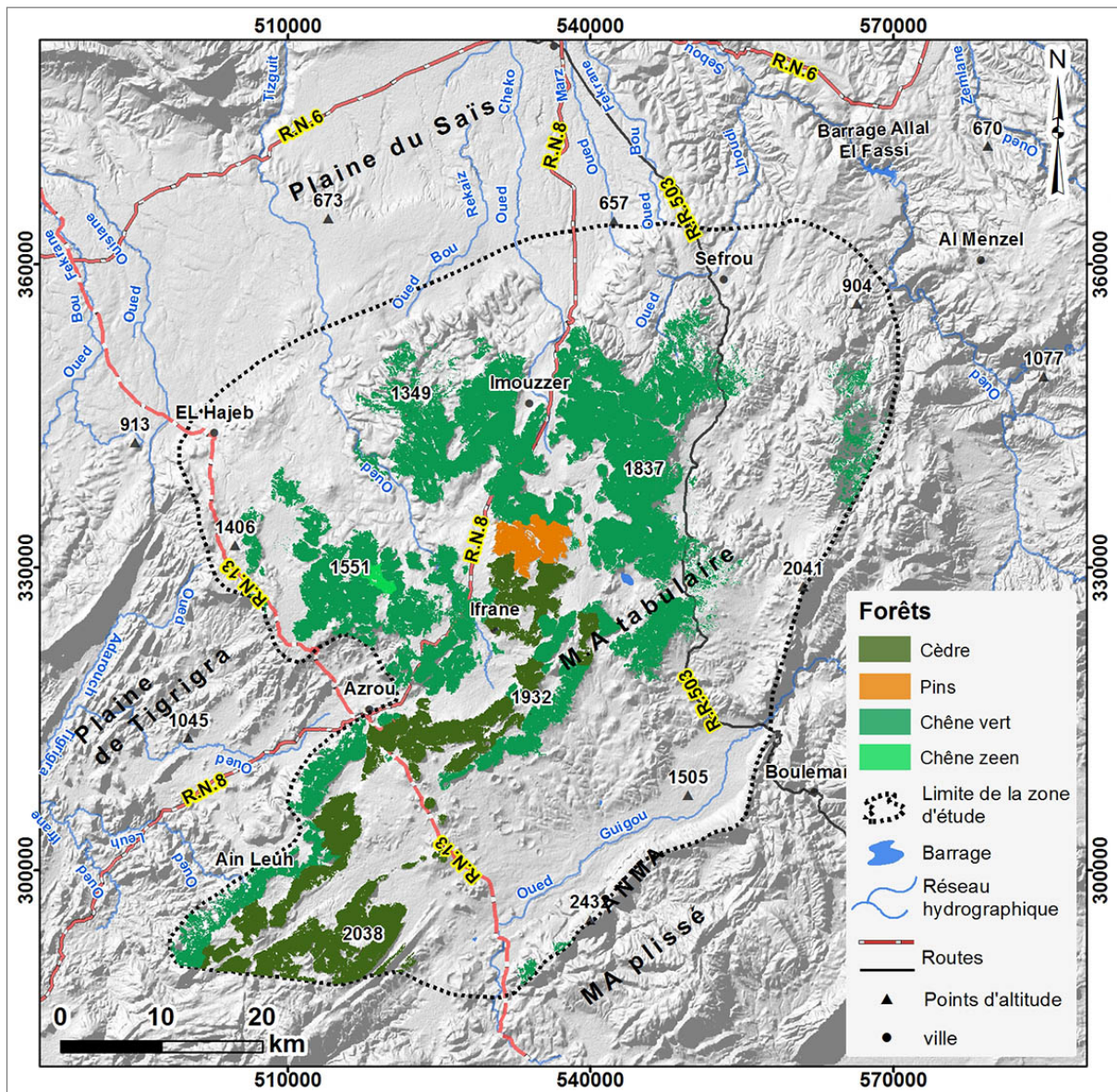


FIGURE 3.9. Principales essences forestières dans la zone d'étude

[Images satellites Landsat 8 et carte du MAPMDREF]

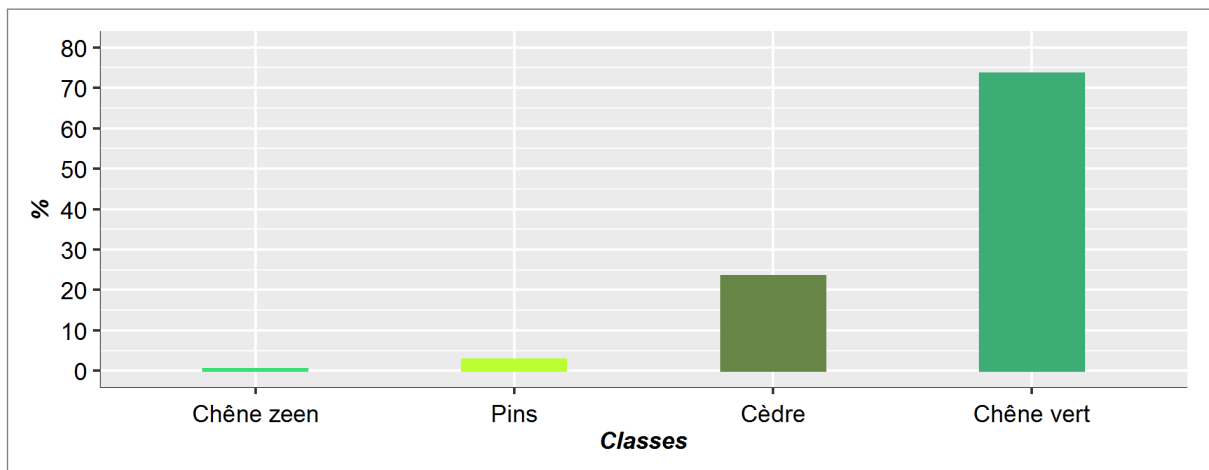


FIGURE 3.10. Pourcentage des principales essences forestières dans la zone d'étude en 2018

2.4. Terrains incultes

Dans ce secteur du Moyen Atlas, les terrains incultes englobent toutes les terres non occupées par les cultures (photos 3.16 et 3.17 *in* fig. 3.11) et destinées principalement au pâturage qui constitue un élément important dans l'économie des populations des montagnes. En effet, bien que le Moyen Atlas ait enregistré une régression de la société pastorale et l'extension de nouvelles pratiques d'occupation et d'utilisation des terres au détriment des terrains incultes (terrains basaltiques nus, terrains calcaires nus, terrains de pâturages), ces derniers occupent encore plus de la moitié (56 %) de la zone d'étude (figs. 3.3 et 3.5).



Photo 3.16. Terrains basaltiques dans la dépression de Guigou



Photo 3.17. Terrains calcaires dans la dépression d'Afourgagh

FIGURE 3.11. Les terrains incultes dans la zone d'étude

« Selon [Qadem \(2015\)](#) les parcours / terrains de pâturages font l'objet de temps en temps des conflits entre tribus, parfois dramatiques. On cite l'exemple de conflit déclenché le 14 août 2014 entre les

Ait Telt et les Ait Hassan dans la région de Guigou, l'événement qui a causé la blessure de neuf personnes ».

3. Les caractéristiques démographiques

L'étude du facteur anthropique et des caractéristiques démographiques est une phase déterminante pour comprendre la dynamique passée et actuelle et la pression exercée sur les ressources naturelles. Avant de se pencher sur les principales caractéristiques démographiques du secteur d'étude, un aperçu sur l'histoire du peuplement dans le Moyen Atlas est nécessaire.

3.1. Aperçu historique sur le peuplement dans le Moyen Atlas

Il est extrêmement difficile de dire de quelle manière s'est constitué le peuplement du Moyen Atlas (Detriche, 2007 ; Jennan, 1986, 2004) en raison de la rareté des documents historiques. Selon Jennan (2004) « les premières sources connues remontent au XI^{ème} siècle où, avant l'avènement des Almohades. Les Sanhaja, rameaux berbères originaires du Sud, semblent représenter une seconde vague de peuplement venue s'installer dans le Haut Atlas oriental et central, le Moyen Atlas et le Rif les Maçmouda ayant envahi avant eux l'ouest du pays ». En parallèle, avec la succession des dynasties (Maçmouda, Almoravides, Sanhaja, Mérinides, Wattassides, saâdienne, Alaouites) au cours de l'histoire du Maroc, le Moyen Atlas a enregistré également une dynamique importante des populations. Jusqu'au milieu du XIX^e siècle, toutes les tribus du Moyen Atlas central occupent les lieux dans lesquels on les retrouve actuellement. Ainsi, avant la période de colonisation, la répartition humaine au sein du Moyen Atlas a été très hétérogène et très inégale (Jennan, 2004). Puis la perturbation des axes de parcours a participé largement à la parution des premiers noyaux de sédentarisation notamment autour des ressources en eau, permettant le développement de petits espaces irrigués associés aux activités pastorales. En parallèle, les espaces pastoraux ont régressé progressivement au profit des vallées et des plaines plus riches (Celerier, 1927).

3.2. La croissance démographique

Jusqu'aux années 1980, le Moyen Atlas était l'exemple des espaces faiblement peuplés et sujet à un exode rural important. Les surfaces agricoles y sont très limitées à l'exception de quelques surfaces irriguées (Jennan, 1986). Durant les dernières décennies, le Moyen Atlas en général a

connu une augmentation des populations rurales et une expansion rapide des centres urbains (Guigou, Timahdite, ...).

Le traitement des données des recensements généraux des populations et d'habitats (1982, 1994, 2004 et 2014) sur 29 communes du Moyen Atlas montre une augmentation notable de la population (fig. 3.12) qui passe de 277191 habitants en 1982 à 468941 habitants en 2014 avec une densité moyenne de 25 hab./km² (1982) à 38 hab./km²(2014). Sur cette période, seules quelques communes enregistrent un taux d'accroissement négatif (Aghbalou Aqorar et Ahl Sidi Lahcen) (fig. 3.13).

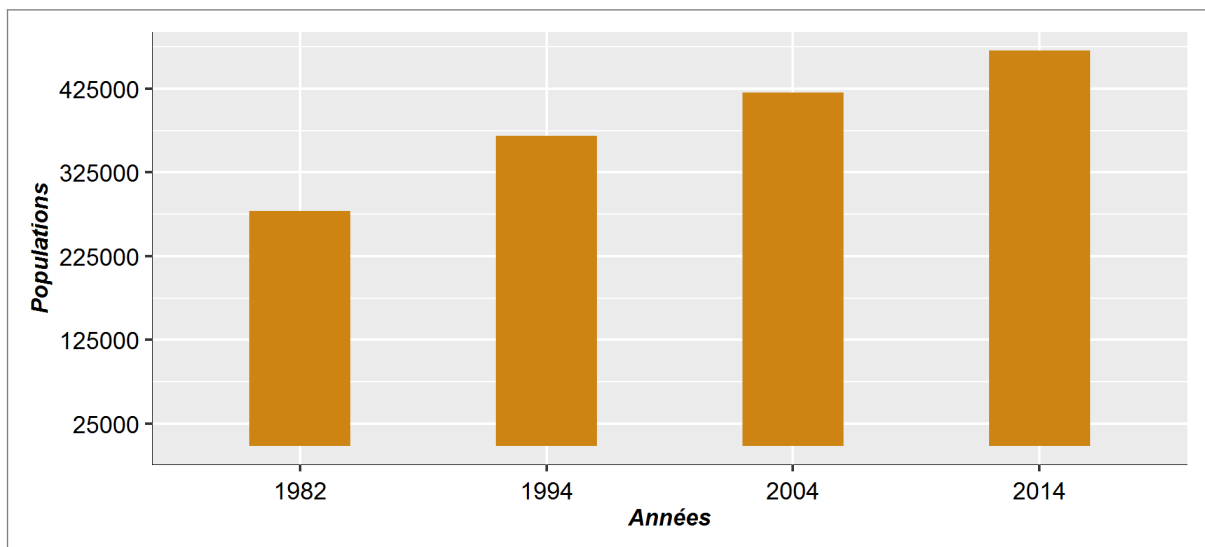


FIGURE 3.12. Évolution de la population des 54 communes étudiées entre 1982 et 2014

[Haut Commissariat au Plan 1982, 1994, 2004 et 2014]

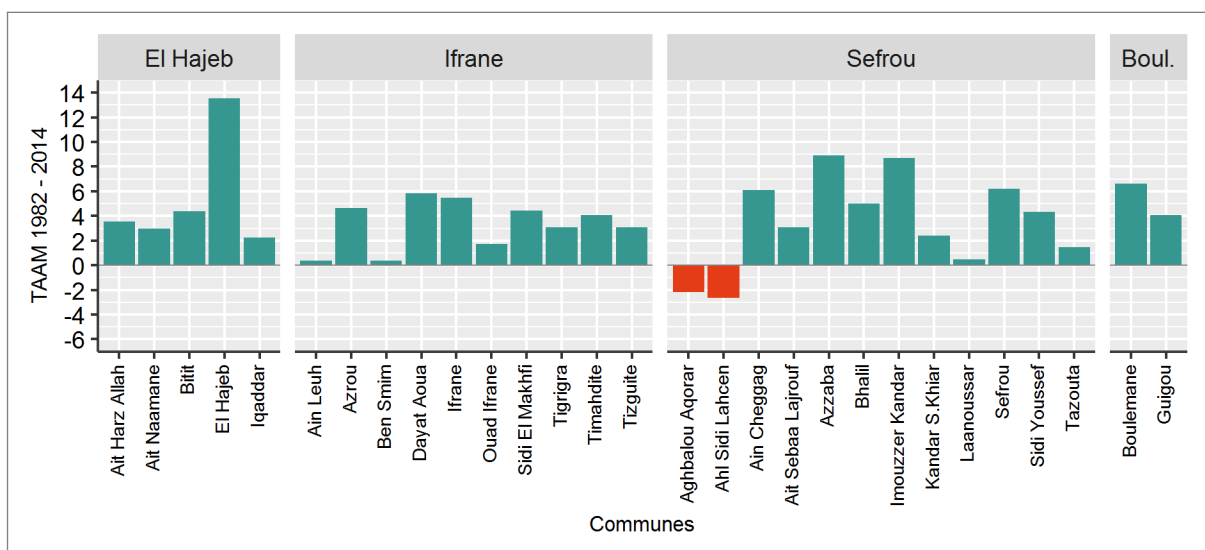


FIGURE 3.13. Taux d'accroissement annuel moyen de la population, 1982 et 2014

Les figures 3.14 à 3.17 montrent que le taux d'accroissement moyen annuel dans la zone d'étude se caractérise par une hétérogénéité remarquable d'une commune à l'autre et d'une période à l'autre. Entre 1982 et 1994, le taux d'accroissement enregistré oscille entre +9,7 pour la commune d'El Hajeb et -0,3 pour la commune d'Ahl Sidi Lahcen. Par contre, durant les périodes 1994-2004 et 2004-2014, le taux d'accroissement enregistre des valeurs négatives dans plusieurs communes, à l'exception de la commune d'Azzaba avec la valeur la plus élevée, +8,2.

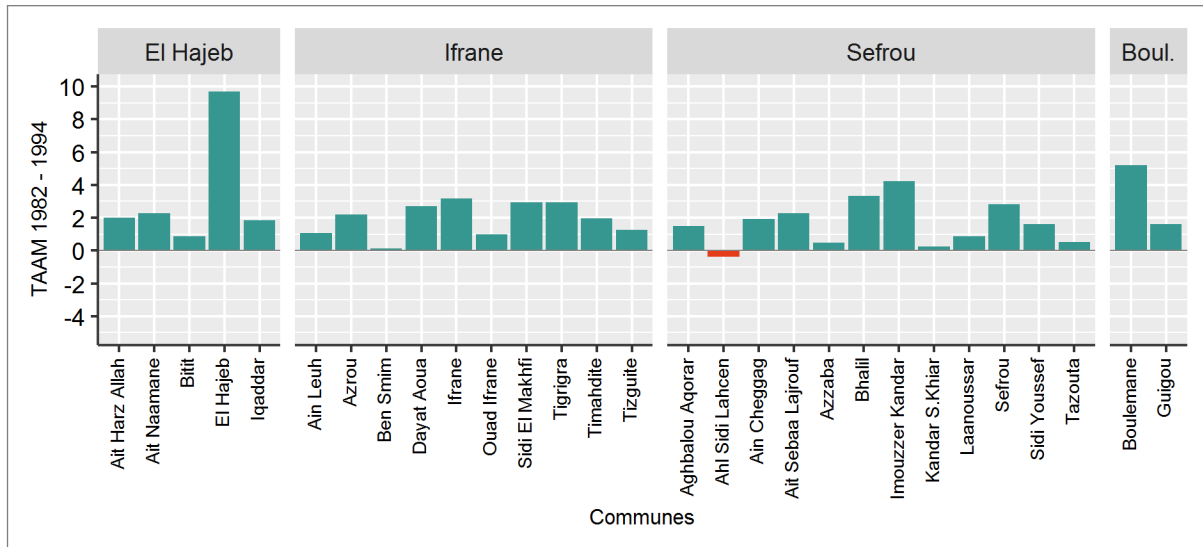


FIGURE 3.14. Taux d'accroissement annuel moyen de la population, 1982 et 1994

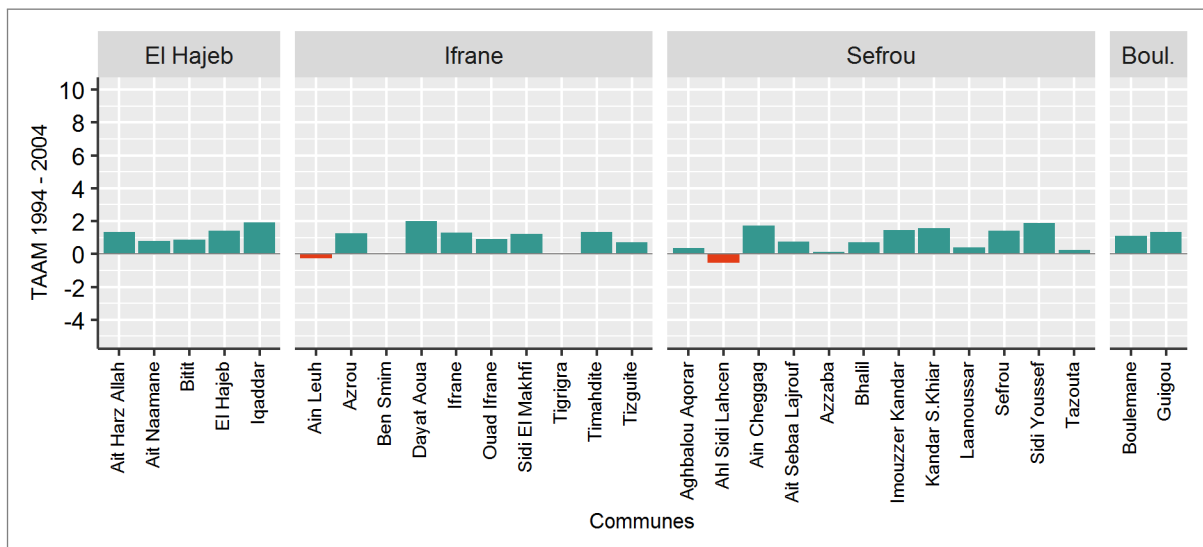


FIGURE 3.15. Taux d'accroissement annuel moyen de la population, 1994 et 2004

La densité des populations dans la zone d'étude a enregistré une augmentation importante entre 1982 et 2014. Les communes situées dans la zone du contact avec Sais (vers le nord) se caractérisent par une densité très élevée par rapport aux communes situées au cœur du Moyen Atlas tabulaire. La figure 3.18 illustre la répartition spatiale de la densité des populations sur

l'ensemble des communes concernées dans cette étude.

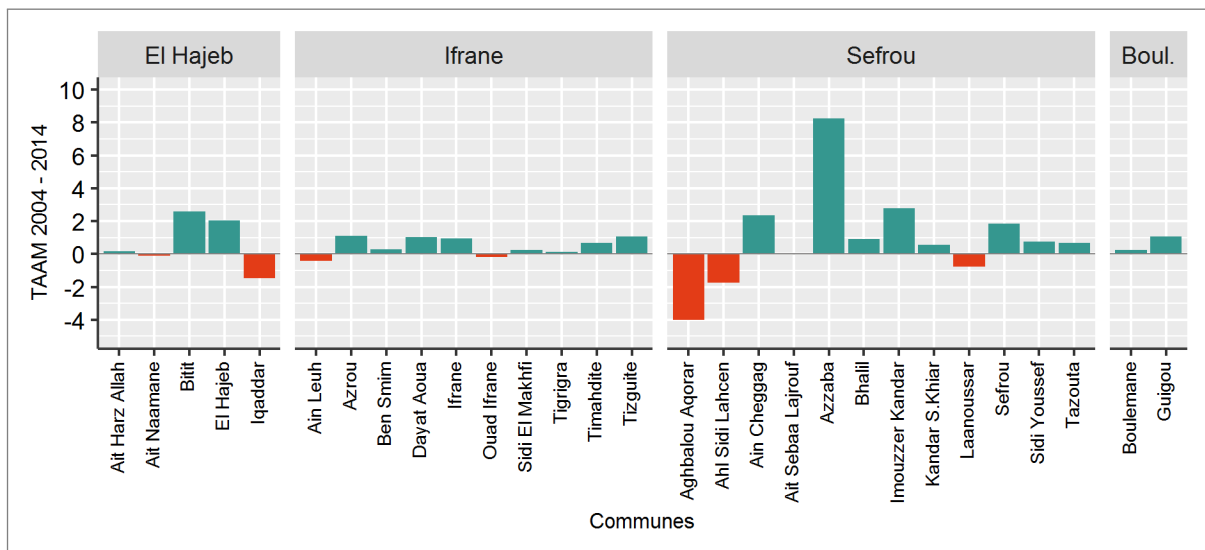


FIGURE 3.16. Taux d'accroissement annuel moyen de la population, 2004 et 2014

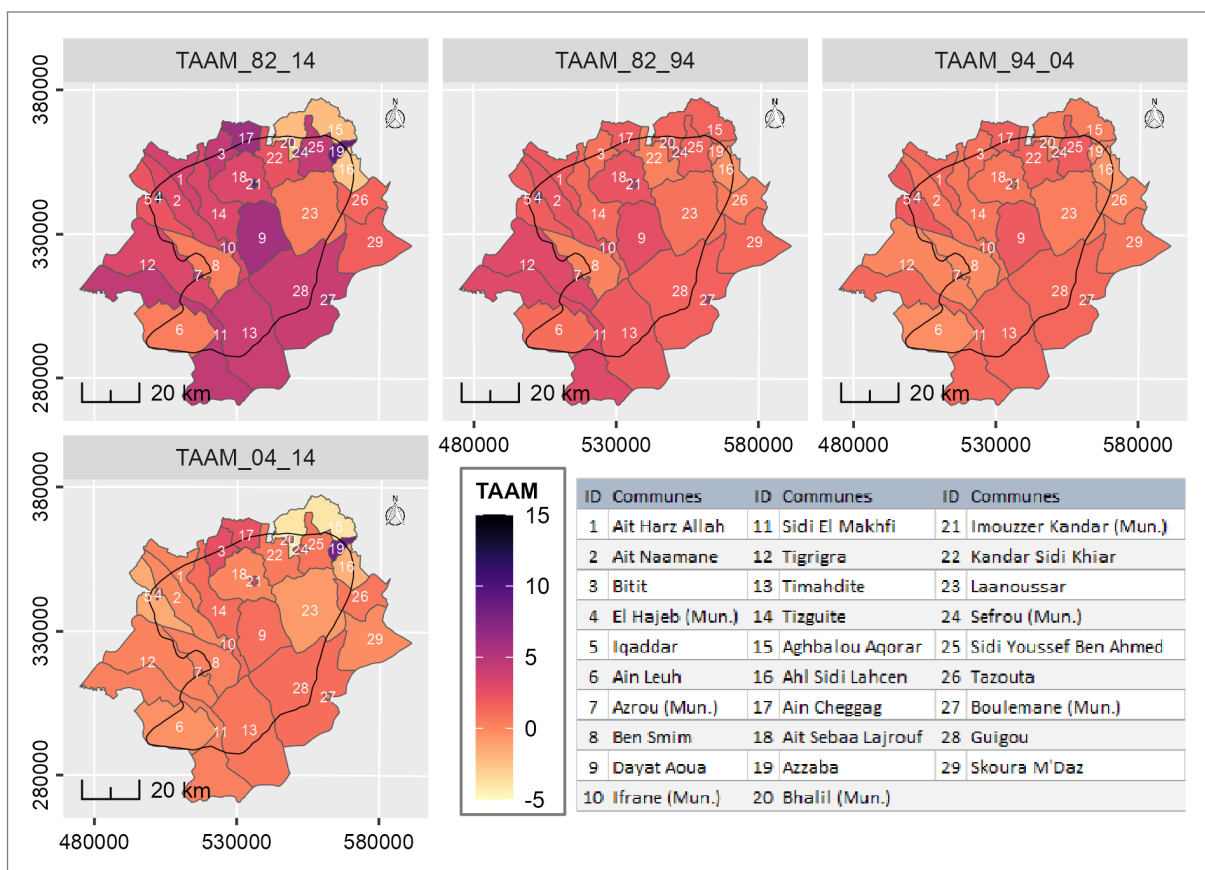


FIGURE 3.17. Répartition du taux d'accroissement annuel moyen de la population, 1982 et 2014

La croissance et l'augmentation remarquable de la densité des populations dans les communes du Moyen Atlas ont provoqué une forte pression sur les ressources naturelles.

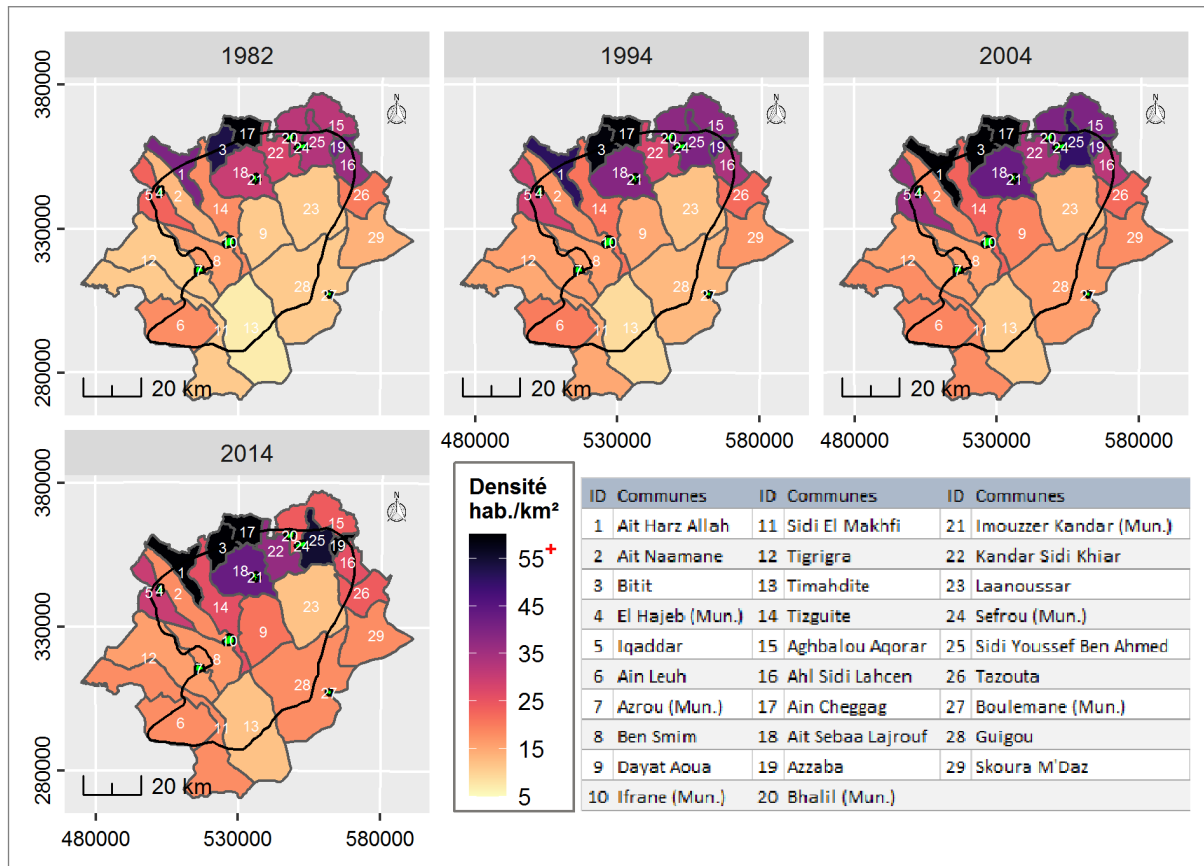


FIGURE 3.18. Répartition de la densité des populations entre 1982 et 2014

Conclusion

Le suivi de la trajectoire de l'agriculture au Maroc sur plus d'un siècle montre qu'elle enregistre une évolution remarquable au niveau de types des cultures, des techniques utilisées et de la superficie occupée par les cultures (irriguées et pluviales). Comme le reste du pays, le Moyen Atlas s'inscrit dans le même contexte d'évolution et de modernisation de l'agriculture. Cela est lié à la combinaison des interventions étatiques et à l'augmentation de la densité des populations.

Conclusion de la première partie

La réalisation d'une étude bibliographique sur l'ensemble du Moyen Atlas a constitué un élément de base pour affiner la problématique de recherche. Dans la zone d'étude, l'interaction des composantes naturelles (ressources en eau, climat, formations lithologiques, etc.) et anthropiques (croissance démographique, interventions étatiques ...) constitue un élément catalyseur pour le développement des surfaces agricoles notamment dans les dépressions intra-

montagnardes (Guigou, Imouzzet et dayet Aoua, Afourgagh).

L'étude des grandes phases de l'évolution d'occupation des sols en général et de l'agriculture en particulier sur l'ensemble du Maroc et du Moyen Atlas montre l'extension remarquable des surfaces agricoles dans les grandes plaines (Gharb, Chaouïa, Abda, Doukkala, etc.) et actuellement dans les milieux montagnards.

DEUXIEME PARTIE

**ETUDE DIACHRONIQUE DE LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DU
SOL À L'ÉCHELLE DES DÉPRESSIONS DU MOYEN ATLAS**

TABULAIRE

DONNEES ET METHODOLOGIE SUIVIE POUR ETUDIER LA DYNAMIQUE D'OCCUPATION DES SOLS DANS LES DEPRESSIONS DU MOYEN ATLAS

CHAPITRE 4 : LA DYNAMIQUE DES VERGERS DE ROSACÉES DANS LES DÉPRESSIONS D'IMOUZZER ET DE DAYET AOUA

CHAPITRE 5 : LA DYNAMIQUE DES CULTURES MARAÎCHÈRES DANS LA DÉPRESSION DE GUIGOU

CHAPITRE 6 : LA DYNAMIQUE DES CULTURES MIXTE DANS LES DEPRESSIONS D'AFOURGAGH ET DE LAANOUCER

Introduction de la deuxième partie

« *Le paysage est un système qui chevauche le naturel et le social* » (Bertrand, 1978), « *les changements d'occupation et d'utilisation du sol résultent d'interactions complexes entre systèmes sociaux et systèmes environnementaux qui évoluent dans le temps* » (Hubert-Moy, 2004 ; Vannier, 2011). « *Ils constituent un ensemble complexe de variables socio-économiques, politiques démographiques, technologiques, culturelles, et biophysiques* » (Corgne, 2004). Le paysage résulte donc de l'interaction entre les actions anthropiques et les composants du milieu. Durant les dernières décennies l'étude de la dynamique paysagère / d'occupation des sols a connu une évolution accrue grâce à l'accès libre à de nombreuses archives satellitaires (Copernicus, NASA, ESA etc.). Ainsi, les outils géomatiques et l'analyse de données satellitaires sont progressivement mis en œuvre dans les études de paysages (Alhaskeer, 2012).

Les SIG et la télédétection sont apparus comme un moyen pertinent pour mettre en relation les données multi-sources (images satellites et travail de terrain par exemple). L'évolution des systèmes d'information géographique et de la télédétection a largement contribué à la multiplication du nombre de publications dans le domaine de la cartographie d'occupation des sols d'une part, et facilite la reconstitution des caractéristiques des anciens paysages et la quantification des transformations d'autre part. L'exploitation de cet important volume de données archivées repose sur le développement de nombreuses méthodes de traitement et d'extraction d'information : SVM, RF, ML ... (SVM : Support Vector Machine, RF : Random Forest, ML : Maximum Likelihood etc.) à partir desquelles sont produites des cartographies d'occupations des sols (Belgiu et Csillik, 2018 ; Chen et al., 2018 ; Kumar-Sharma et al., 2018 ; Pelletier et al., 2016 ; Robert et al., 2017 ; Rodriguez-Galiano et al., 2012). Ces algorithmes se basent sur le principe de l'apprentissage automatique «*Machine Learning*». L'intégration des données d'apprentissage dans un système d'information géographique (SIG) permet la réalisation des cartes d'occupation des sols.

Cette partie se focalise sur la cartographie et la quantification de la dynamique d'occupation du sol à l'échelle des dépressions du Moyen Atlas tabulaire dans l'objectif de faire ressortir l'évolution des grandes classes d'occupation des sols et des surfaces agricoles sur le demi-siècle passé. Pour cela, les images Landsat 5 et 8 ont fait l'objet de classifications supervisées

de type «*Machine Learning*». Le développement de la méthodologie adoptée fait l'objet du chapitre 4. Les chapitres 5, 6 et 7 présentent les résultats sur les trois secteurs étudiés : celui des rosacées dans les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua, celui des cultures maraîchères dans la dépression de Guigou, et celui présentant une dynamique mixte de cultures irriguées et pluviales dans les dépressions d'Afougagh et de Laanoucer.

CHAPITRE 4

Chapitre 4 : Données et methodologie suivie pour étudier la dynamique d'occupation des sols dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire

Introduction

Le présent chapitre expose la méthodologie suivie pour la réalisation des cartes d'occupation des sols à l'échelle de trois secteurs dans le Moyen Atlas tabulaire : la dépression de Guigou, les dépressions d'Imouzzet et de dayet Aoua et les dépressions d'Afougagh et de Laanoucer. À l'échelle des dépressions du Moyen Atlas tabulaire, l'étude diachronique sur la période 1972 - 2018 a été menée à l'aide d'une couverture d'images CORONA (1972), d'images satellites Landsat TM et OLI (1985, 1998, 2010, 2018) et le travail de terrain (2018, 2019, 2020).

La démarche méthodologique adoptée pour cette étude diachronique d'occupation des sols est principalement basée sur le travail de terrain et sur l'application des méthodes de classification supervisée et/ou apprentissage supervisé. « *L'objectif d'un apprentissage supervisé est d'apprendre automatiquement des règles pour prédire les étiquettes (les classes) de nouveaux échantillons. L'ensemble des règles est appris à partir d'exemples fournis par une donnée de référence* » (Pelletier, 2017). La combinaison des données multi-sources et multi-dates (satellites et travail de terrain) dans un SIG permet de construire un modèle capable de prédire les classes (étiquettes) d'occupation des sols à partir des pixels de l'image satellite.

1. Démarche d'extraction de l'information à partir des images satellites

Les méthodes de classification sont très utilisées dans le domaine de la télédétection afin de cartographier les composantes de la surface terrestre (Blaschke, 2010 ; Churches et al., 2014 ; Mao et al., 2020 ; Xu et al., 2018). L'extraction des informations à partir des images se fait

généralement par l'application des méthodes de classification supervisée et non supervisée (Clustering). Les méthodes de la classification supervisée sont basées sur le principe de l'apprentissage automatique (*Machine Learning*) qui cherche à répartir un jeu de données en un ensemble de classes connues (Gressin, 2014). Dans le domaine de la télédétection, les algorithmes de classification supervisée peuvent être regroupés en deux grandes catégories, les méthodes paramétriques (ML : maximum de vraisemblance) et les méthodes non-paramétriques (SVM : Support Vector Machine ; RF : Random Forest) (Gressin, 2014 ; Idbraim, 2009).

Dans le présent travail, nous avons utilisé la classification supervisée pour extraire les classes d'occupation des sols à partir des images satellites multispectrales Landsat TM et OLI de 1985 à 2018. La classification est réalisée à partir de la combinaison des données de terrain et celles issues des images satellites. La figure 3.1 montre les étapes de classification, de l'échantillonnage des classes d'occupation des sols jusqu'à la validation des résultats.

La méthodologie suivie pour l'extraction des classes d'occupation des sols commence par le travail de terrain et passe par plusieurs étapes pour arriver à la phase finale, c'est la phase de validation. La validation des résultats de la classification a été soumise à un test statistique basé sur le coefficient de Kappa (K). Ce dernier permet de mesurer l'accord entre deux ou plusieurs observateurs (Cohen, 1960).

En effet, la valeur de ce coefficient varie entre 0 (classification très mauvaise) et 1 (classification excellente) (Landis et Koch, 1977). Les résultats obtenus d'après la classification supervisée montrent une très bonne concordance entre les données d'apprentissage et la classification avec un indice de kappa supérieur à 0,8. La validation statistique des résultats de la classification est suivie par la vectorisation et la correction des erreurs de classification (de chaque classe) à partir des données de terrain et photo-interprétation.

2. Données satellitaires utilisées

L'étude diachronique d'occupation des sols à l'échelle des dépressions du Moyen Atlas tabulaire est réalisée à l'aide d'images satellites multi-sources et multi-dates. Elles comprennent des séries d'images satellites CORONA et d'images Landsat multispectrales TM et OLI.

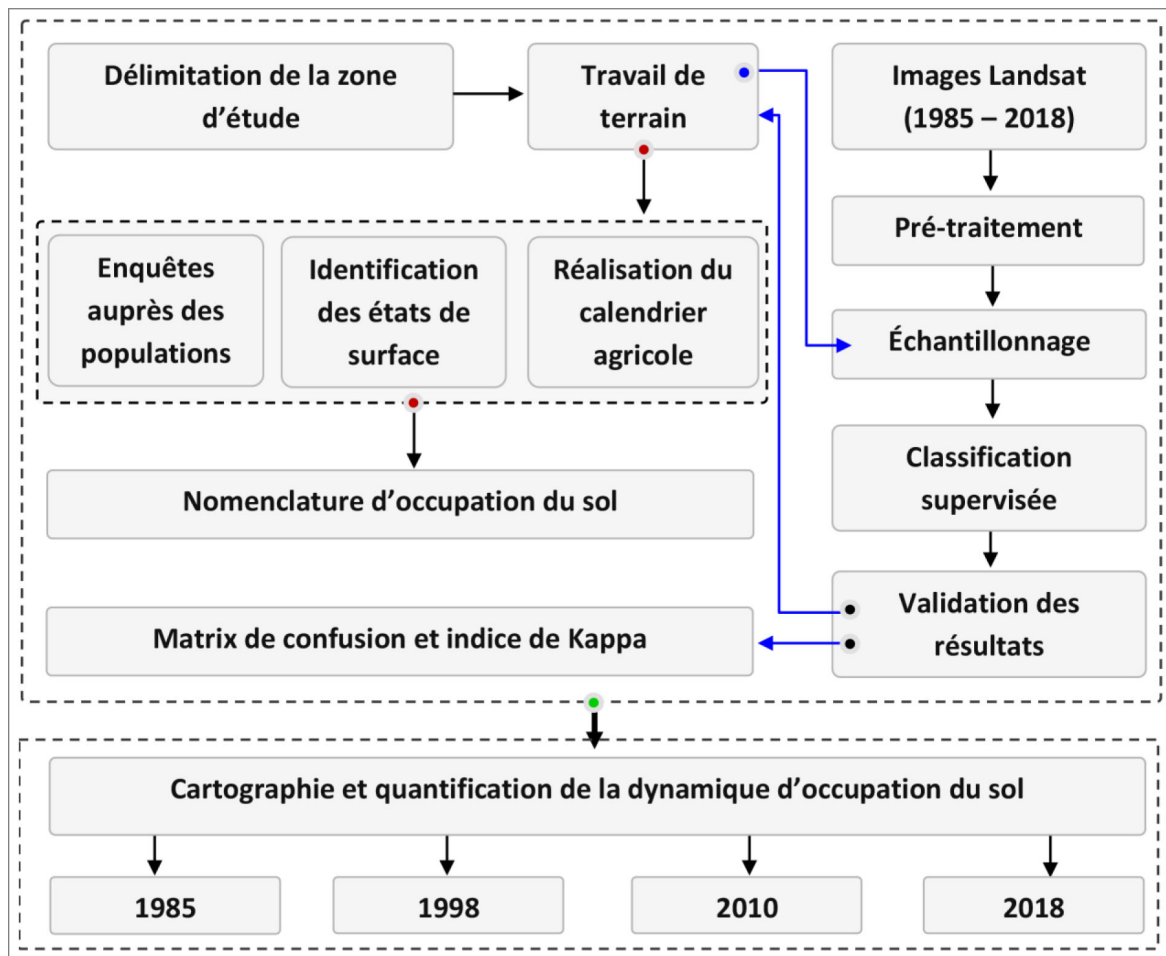


FIGURE 4.1. Démarche méthodologique d'extraction des cartes d'occupation des sols dans la zone d'étude

2.1. Images satellites Corona

« Les premières images de la Terre ont été prises en toute discrétion par les satellites américains dès 1959, puis par des satellites soviétiques à partir de la fin de 1960. Le programme américain Corona répond à des préoccupations stratégiques prioritaires dans le contexte de l'époque et formulées dès 1947. Il s'agit d'acquérir des images de l'Union Soviétique, identifier ses capacités et disposer des outils d'une cartographie indispensable à des plans de ciblage d'objectifs » (Dubois et al., 2014). Durant les deux dernières décennies, l'utilisation des images Corona a fait l'objet de plusieurs études dans le cadre de la cartographie d'occupation des sols, des études archéologiques, écologiques et géomorphologiques (Altmaier et Kany, 2002 ; Andersen, 2006 ; Goossens et al., 2006 ; Grosse et al., 2005 ; Mihai et al., 2016 ; Rendenieks et al., 2020 ; Saleem et al., 2018 ; Song et al., 2015). Dans le présent travail, nous avons utilisé les images Corona KH-4B du 26 mai 1972 (tableau 4.1) comme référence de la situation d'occupation des sols dans la zone

d'étude.

Date	Série	Source	Résolution spatiale
26 mai 1972	DS1101-2138DA018-b	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA018-c	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA018-d	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA019-b	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA019-c	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA019-d	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA020-b	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA020-c	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA020-d	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA021-b	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA021-c	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA022-b	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA022-c	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA023-b	USGS	1.8m
26 mai 1972	DS1101-2138DA023-c	USGS	1.8m

TABLEAU 4.1. Images satellites Corona utilisées

Paradoxalement, ces images les plus anciennes, datant de près d'un demi-siècle, sont les images présentant la meilleure résolution spatiale. Bien qu'acquises en mode panchromatique, leurs pixels inférieurs à 2 m² nous ont permis de dresser une situation initiale de grande précision. Ces images ont été acquises via la plateforme de l'USGS dans le cadre du projet « sources, ressources et mutations récentes des paysages du Moyen Atlas, Maroc ».

2.2. Images satellites Landsat

Depuis 1972, la série conjointe de satellites d'observation de la terre de la NASA (National Aeronautics et Space Administration) et de l'USGS (United States Geological Survey) a acquis continuellement les images pour étudier la surface terrestre et suivre son évolution spatiotemporelle (NASA). Successivement, des satellites Landsat ont été mis en orbite pour l'observation de la terre et pour surveiller l'environnement, ce qui participe largement à l'enrichissement des archives de données en télédétection. La disponibilité et l'accès gratuit aux images satellites Landsat multispectrales (MSS, TM, ETM+ et OLI) ont contribué à la multiplication du nombre d'études dans le domaine de la cartographie et du suivi des changements d'occupation des sols (Bhandari et al., 2012 ; Bian et al., 2020 ; Dutrieux et al., 2016 ; El-Jazouli et al., 2019 ; Goussot et al., 2014 ; Ouzemou et al., 2018 ; Soro et al., 2014 ; Vicente-Serrano et al., 2008). Le tableau 4.2 montre la série temporelle d'images Landsat TM et OLI que nous avons utilisée pour la réalisation de l'étude diachronique de l'occupation des sols dans la zone d'étude.

Date	Path	Raw	Source	Résolution spatiale
Landsat TM				
17 mai 1985	201	037	USGS	30m
14 août 1985	200	037	USGS	30m
12 avril 1998	200	037	USGS	30m
02 août 1998	200	037	USGS	30m
15 mai 2010	200	037	USGS	30m
03 août 2010	200	037	USGS	30m
Landsat OLI				
19 avril 2018	200	037	USGS	30m
09 août 2018	200	037	USGS	30m

TABLEAU 4.2. Images satellites Landsat TM et OLI utilisées pour l'étude diachronique d'occupation des sols à l'échelle des dépressions moyen atlasique

Les tableaux 4.3 et 4.4 présentent les caractéristiques de l'instrument utilisé par Landsat TM (Thematic Mapper) et OLI (Operational Land Imager) pour l'acquisition des images.

Le capteur TM est composé de 7 bandes, dont six bandes spectrales (bandes 1 à 5 et 7) avec une résolution spatiale de 30 mètres et une bande thermique (bande 6) avec une résolution de 120 mètres. Tandis que, les images Landsat 8 OLI (Operational Land Imager) et TIRS (Thermal Infrared Sensor) se composent de neuf bandes spectrales (1 à 7 et 9) avec une résolution spatiale de 30 mètres. La résolution de la bande panchromatique (bande 8) est de 15 mètres, cette bande est utile pour améliorer la résolution des bandes spectrales de 30 à 15 mètres. Les bandes thermiques (10 et 11) à résolution spatiale de 100 mètres sont utiles pour étudier la température de surface.

Capteur	Bande	Longueur d'onde (µm)	Résolution (m)
TM	1 Visible Bleu	0.45 – 0.52	30
TM	2 Visible Vert	0.52 – 0.60	30
TM	3 Visible Rouge	0.63 – 0.69	30
TM	4 PIR	0.76 – 0.90	30
TM	5 MIR 1	1.55 – 1.75	30
TM	6 Thermique	10.40 – 12.50	120
TM	7 MIR 2	2.08 – 2.35	30

TABLEAU 4.3. Caractéristiques de l'instrument TM embarqué sur le satellite Landsat 5 [USGS]

2.3. Images satellites Sentinel 2

Les deux satellites Sentinel-2A et Sentinel-2B de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) ont été mis en orbite dans le cadre du projet européen Copernicus. Le premier a été lancé en juin 2015 et le deuxième en mars 2017. Les satellites Sentinel 2 assurent la disponibilité des images à haute résolution spatiale (10 mètres) et temporelle (5 jours). L'accès libre aux archives Sentinel 2 joue un rôle catalyseur dans l'augmentation de nombre des publications qui se base sur le

Capteur		Bande	Longueur d'onde (μm)	Résolution (m)
OLI	1	Aérosol	0.43 – 0.45	30
OLI	2	Visible Bleu	0.45 – 0.51	30
OLI	3	Visible Vert	0.53 – 0.59	30
OLI	4	Visible Rouge	0.63 – 0.67	30
OLI	5	PIR	0.85 – 0.88	30
OLI	6	MIR 1	1.57 – 1.65	120
OLI	7	MIR 2	2.11 – 2.29	30
OLI	8	Panchromatique	0.50 – 0.68	15
OLI	9	Cirrus	1.36 – 1.38	30
OLI	10	TIRS 1	10.60 – 11.19	100
OLI	11	TIRS 2	11.50 – 12.51	100

TABLEAU 4.4. Caractéristiques de l'instrument OLI et de l'instrument TIRS embarqués sur le satellite Landsat 8

[USGS]

traitement de ce type d'images (Belgiu et Csillik, 2018 ; Bhatnagar et al., 2020 ; Hemmerling et al., 2021 ; Kollert et al., 2021 ; Li et Niu, 2022 ; Nzuza et al., 2021 ; Soriano-Gonzalez et al., 2022 ; Wang et al., 2016 ; Zhang et al., 2021). Dans ce travail nous avons utilisé les images Sentinel 2 notamment les bandes spectrales de 10 m (visible et le proche infrarouge) de résolution spatiale (tableau 4.5) pour la réalisation des travaux de terrains (localisation des classes d'occupation des sols).

Le capteur MSI embarqué sur les deux satellites Sentinel 2 (2A et 2B) comprend 13 canaux spectraux avec une résolution spatiale variable entre 10 et 60 mètres dans les différentes zones spectrales (tableau 4.6).

Date	Path	Raw	Source (m)
13 juillet 2018	T30	SUB	ESA
13 juillet 2018	T30	SUC	ESA
13 juillet 2018	T30	STC	ESA
13 juillet 2018	T30	STB	ESA

TABLEAU 4.5. Les images satellites Sentinel 2 utilisées

2.4. Prétraitement des images satellites

Les données de télédétection fournies par les agences spatiales requièrent un prétraitement pour faciliter la classification automatique et/ou l'interprétation visuelle. Dans ce cadre, les images satellites CORONA et Landsat 5 et 8 sont soumis à un prétraitement.

> Le prétraitement des images CORONA

Après la sélection des images CORONA disponibles, ces dernières sont géo-référencées et mosaïquées afin d'extraire la zone d'étude et d'interpréter visuellement l'organisation générale d'occupation du sol.

> Le prétraitement des images Landsat

En préalable à leur utilisation, les images satellites Landsat fournies par la NASA en niveau 1 (Level-1) nécessitent des pré-traitements radiométriques, atmosphériques et géométriques.

La correction radiométrique des images satellites (fig. 4.2) permet de convertir les valeurs brutes des pixels (CN/DN) en réflectance (fig. 4.3). « Pour une étude avec un jeu d'images acquises au-dessus d'une même zone à des dates différentes, il est préférable de convertir les valeurs de pixel en réflectance pour comparer les données entre elles » (Baghdadi et Zribi, 2017). La conversion des valeurs des pixels en réflectance est faite conformément aux indications préconisées par la NASA (USGS, 2021). L'algorithme combine les bandes multispectrales et le fichier MTL joint à l'image satellite.

En parallèle avec la correction radiométrique, nous avons effectué la correction atmosphérique

		Sentinel 2A		Sentinel 2B	
Capteur	Bande	Centre de longueur d'onde (μm)	Centre de longueur d'onde (μm)	Résolution (m)	
MSI	1	Aérosol	443.9	442.3	60
MSI	2	Visible Bleu	496.6	492.1	10
MSI	3	Visible Vert	560.0	559	10
MSI	4	Visible Rouge	664.5	665	10
MSI	5	Red-edge 1	703.9	703.8	20
MSI	6	Red-edge 2	740.2	739.1	20
MSI	7	Red-edge 3	782.5	779.7	20
MSI	8	PIR 1	835.1	833	10
MSI	9	PIR 2	864.8	864	20
MSI	10	Vapeur d'eau	945.0	943.2	60
MSI	11	Cirrus	1373.5	1376.9	60
MSI	12	MIR 1	1613.7	1610.4	20
MSI	13	MIR 2	2202.4	2185.7	20

TABLEAU 4.6. Caractéristiques de l'instrument MSI embarqué sur les deux satellites Sentinel 2A et Sentinel 2B

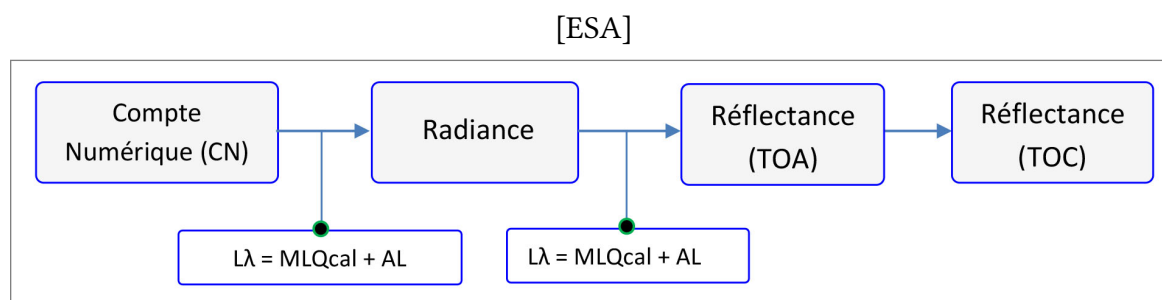


FIGURE 4.2. Les étapes de la correction radiométrique des images satellites du CN au TOC pour supprimer les effets de l'atmosphère en se basant sur le modèle DOS 1 (Dark Object Subtract 1) qui est un modèle atmosphérique basé sur les propriétés de l'image. La figure 4.4

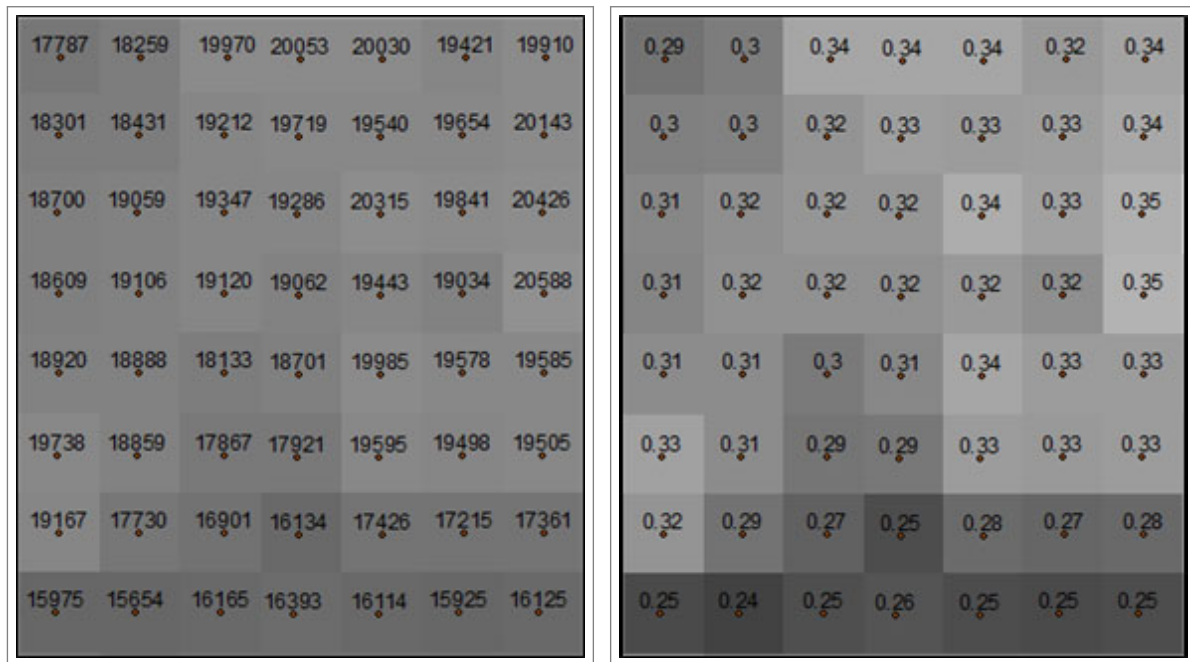


FIGURE 4.3. Correction radiométrique des images satellites

illustre la différence entre une image satellite corrigée et une image satellite non corrigée.

La réalisation des corrections radiométriques et atmosphériques se base sur l'utilisation de l'extension semi-automatique classification (SCP) développée par Congedo L et inclut dans le logiciel QGIS. En effet, le plugin SCP permet d'effectuer plusieurs fonctions comme le téléchargement, le prétraitement et le traitement des images satellites optiques. Ce package puissant pour QGIS (Correia et al., 2018) est largement utilisé dans le domaine de la télédétection (Abdul-Azeez et al., 2022 ; Baghdadi et al., 2018 ; Belenok et al., 2021 ; Congedo, 2021 ; Obodai et al., 2019 ; Prieto-Amparan et al., 2018 ; Smyth et al., 2022).

La correction géométrique des images repose tout d'abord sur une conversion du système de coordonnées WGS 84 au système Nord Maroc degré ensuite chaque image a été ajustée à une image de référence. Ainsi toutes les images sont parfaitement superposables, ce qui facilite le suivi spatiotemporel d'occupation des sols et de la variation de différentes étapes de surface dans un espace donné.

3. Travail de terrain et inventaire des états de surfaces

Le terrain est le « *champ de travail* » pour le géographe. Il fournit des données plus précises et sert de validation des résultats obtenus dans les laboratoires. Durant les dernières décennies,

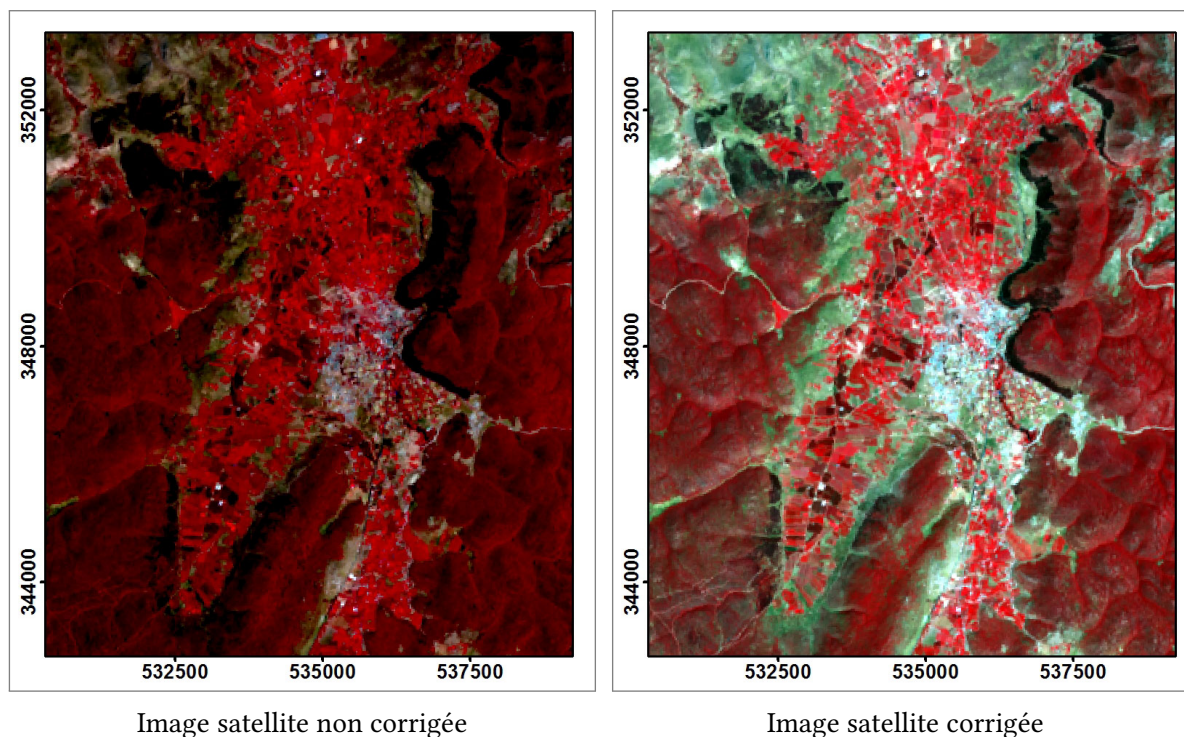


FIGURE 4.4. Correction atmosphérique des images satellites

le travail de terrain témoigne d'un intérêt croissant (Verne, 2012), car il garantit l'authenticité des données (Claval, 2013). Les sorties consécutives à la zone d'étude (2018, 2019, 2020) nous ont permis de connaître la richesse et les potentialités qu'elle abrite. Les observations terrain mettent également en évidence la variété des cultures irriguées et les techniques utilisées pour l'irrigation et pour l'acheminement de l'eau.

Sur une carte à grand format (A0) et à haute résolution spatiale de 10 mètres (photos 4.1 et 4.2 in fig. 4.5) nous avons localisé les différentes classes d'occupation du sol dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire. À pied, nous avons parcouru plus de 12 kilomètres par jour pour découvrir la zone d'étude (août 2018). En effet, le travail de terrain dans cette étude constitue la base de tous les traitements des images satellites ; de l'échantillonnage des classes d'occupation des sols pour le suivi de la réflectance spectrale et la classification jusqu'à la validation des résultats.

4. Les types des cultures

À l'échelle des trois dépressions étudiées, nous avons distingué plusieurs types de cultures irriguées et pluviales. Les surfaces agricoles varient en fonction des conditions locales des milieux. La dépression de Guigou est caractérisée par l'existence des cultures maraîchères

irriguées et les cultures pluviales. En revanche, les dépressions d'Imouzzet et de dayet Aoua se caractérisent par la prédominance de vergers de pommers, pêchiers, nectariniers. Tandis que les cultures mixtes (maraîchères et vergers) connaissent un déploiement important dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer.



Photo 4.1. Travail de terrain à Timahdite le 5 août 2018



Photo 4.2. Travail de terrain à Guigou le 4 août 2018

FIGURE 4.5. Illustration du travail de terrain dans la zone d'étude

5. Réalisation des calendriers agricoles

À partir des données collectées sur le terrain, des calendriers agricoles ont été élaborés tableaux 4.7 à 4.9 afin de déterminer les différents types de cultures existantes dans la zone d'étude et son évolution durant les mois de l'année. Ces calendriers ont été utilisés afin de sélectionner les dates des images satellites favorables à l'identification des cultures irriguées et des cultures pluviales. Ils servent également à la détermination de la nomenclature des cartes d'occupation du sol.

Les calendriers agricoles réalisés dans la zone d'étude illustrent la diversité des types des cultures (irriguées, pluviales, vergers des rosacées) et sa variation saisonnière. En effet, le stade phénologique des cultures et des végétations varie d'une saison à l'autre. À titre d'exemple, le stade phénologique du blé commence en mi-octobre (semi) jusqu'à mi-mai (stade de matura-

tion/récolte), pour les pommes de terre la période phénologique commence à la mi-avril (semi) et s'étend jusqu'à la fin d'août (stade de maturation/récolte).

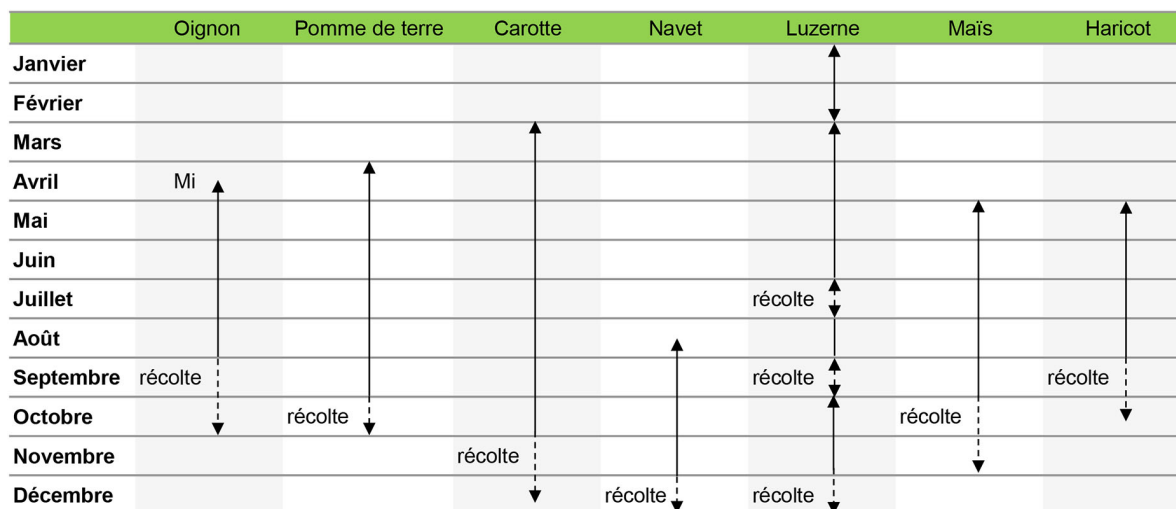


TABLEAU 4.7. Calendrier agricole des cultures maraîchères irriguées

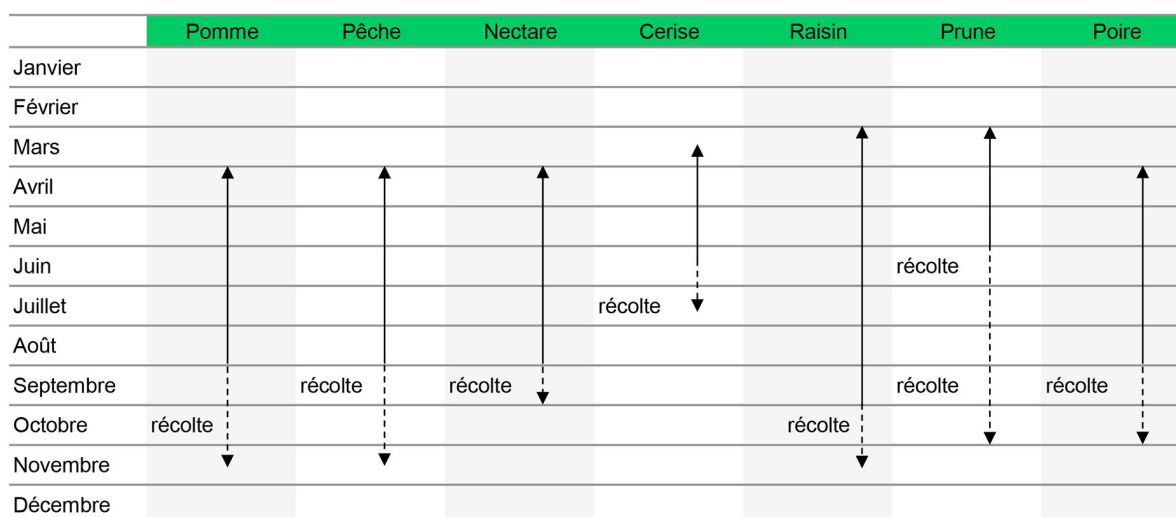


TABLEAU 4.8. Calendrier agricole des rosacées

6. Échantillonnage des classes d'occupation des sols et l'élaboration de la légende

L'échantillonnage des classes d'occupation des sols constitue l'étape du croisement entre les données issues des travaux du terrain et celles des images satellites. La prise des échantillons a été faite directement sur terrain (figs. 4.6 et 4.7). La combinaison de différentes sources de données (terrain/images satellites) a conduit à la réalisation d'une typologie d'occupation des sols sur l'ensemble de la zone d'étude, et par voie de conséquence à l'élaboration de la légende d'occupation des sols.

	Orge	Blé	Avoine	Seigle
Janvier				
Février				
Mars				
Avril				
Mai				
Juin	récolte	récolte	récolte	récolte
Juillet				
Août				
Septembre				
Octobre				
Novembre				
Décembre				

TABLEAU 4.9. Calendrier agricole des cultures pluviales

6.1. Échantillonnage des classes d'occupation des sols

La détermination des échantillons/classes d'occupation des sols a été faite en août 2018. À ce moment de l'année, en raison de l'activité chlorophyllienne des cultures irriguées et de la sénescence ou récolte des cultures pluviales, il existe une bonne séparabilité entre les signatures spectrales de ces différentes composantes. L'ensemble des cultures irriguées présente des réponses spécifiques et homogènes, reflétant la couverture d'une végétation active. Les terres basaltiques et calcaires incultes et réservées aux parcours pastoraux, les forêts et habitats se détachent également nettement et complètent la nomenclature finale, adoptée pour les classifications des images.

Dans cette étude, le choix des classes d'occupation des sols s'appuie sur les caractéristiques des images satellites utilisées (la résolution spatiale et la séparabilité de la réflectance spectrale) et la réalité du terrain (dominance des parcelles de petite taille).

Dans les trois secteurs, le choix des classes d'occupation des sols se base sur plusieurs critères :

» Le morcellement des parcelles agricoles qui rendre la classification très difficile de chaque type de cultures (pomme de terre, carotte, pommier, pêchier, blé ...),

» Le problème de séparabilité de la réflectance spectrale entre les types des cultures (pommier, pêchier, pomme de terre, carotte ...). En effet, la comparaison de la réflectance spectrale des

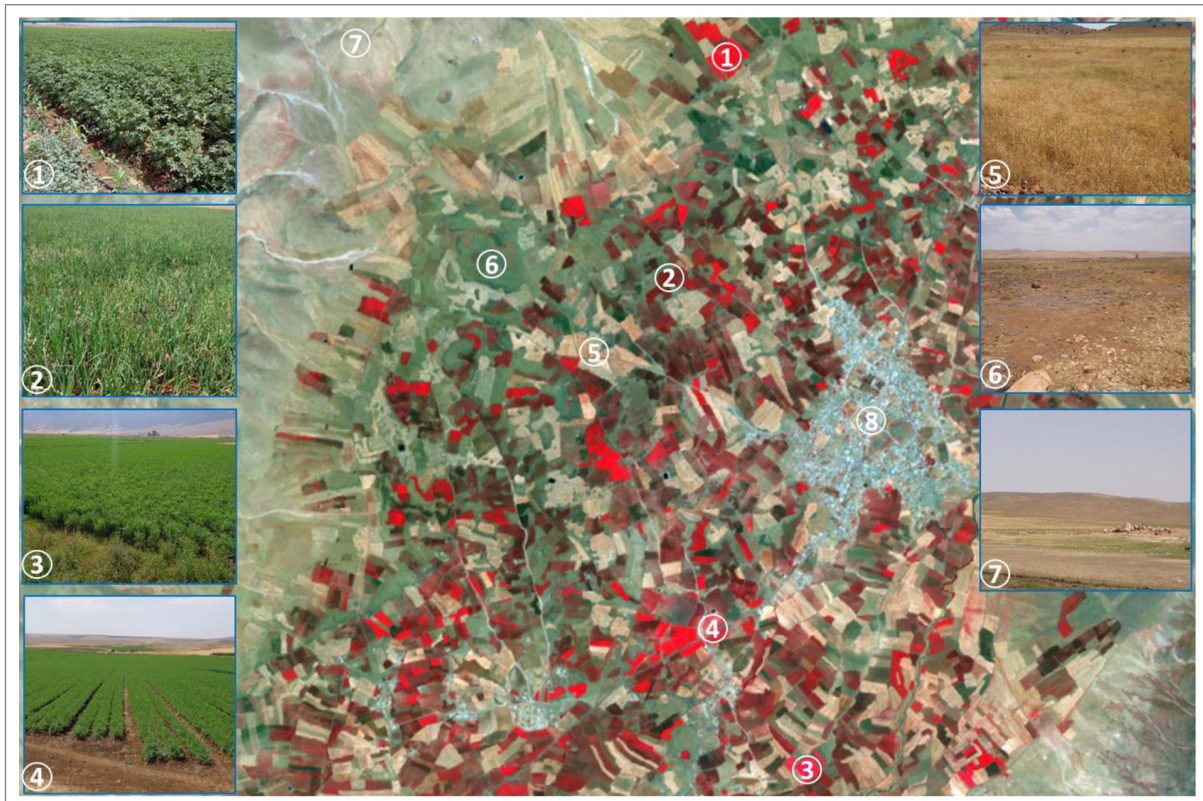


FIGURE 4.6. Échantillonnage des classes d'occupation des sols

[1, 2, 3 et 4 : cultures irriguées; 5 : cultures pluviales; 6 : terrains calcaires, 7 : terrains basaltiques; 8 : habitats]

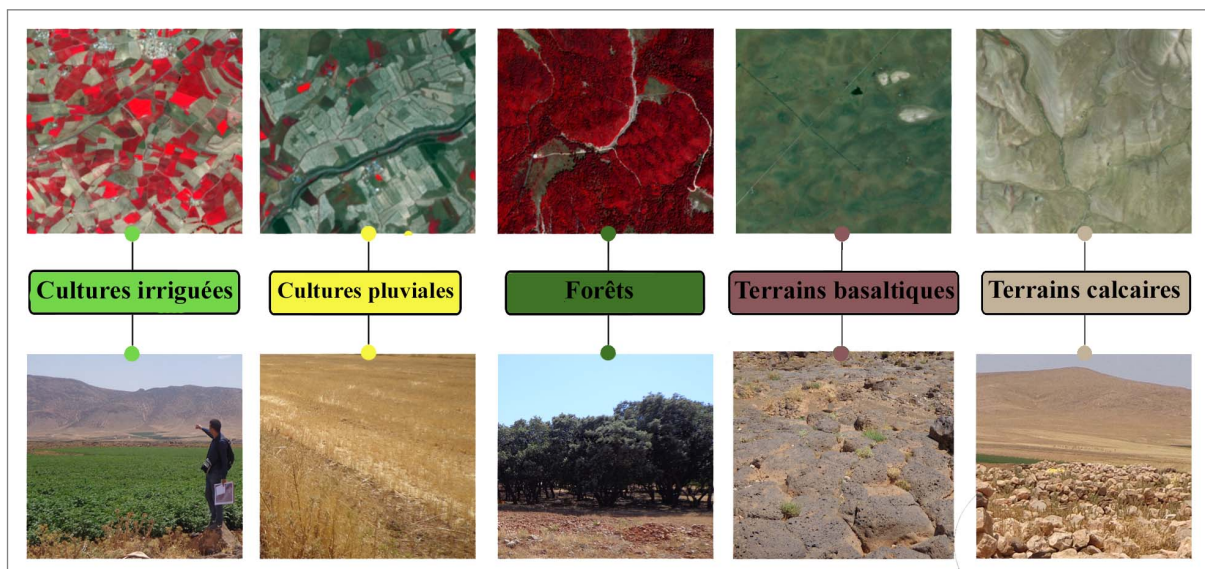


FIGURE 4.7. Échantillonnage des classes d'occupation des sols

[Comparaison entre les classes d'occupation sur terrain et sur l'image satellite Sentinel 2]

cultures montre un fort rapprochement de ces valeurs (exemple de la pomme de terre et du carotte) ce qui engendre le problème de la séparabilité et de la précision de la classification.

Pour pallier ces problèmes, nous avons choisi de travailler sur les grandes classes d'occupation de sol (cultures irriguées, cultures pluviales, forêts, etc.) dans les secteurs étudiés.

6.2. L'élaboration de la légende d'occupation des sols

Dans les travaux relatifs à la cartographie des surfaces terrestres, la réalisation de la légende doit s'appuyer sur les critères de la zone d'étude. Sur la base des données observées sur le terrain (identification des états de surface, calendriers agricoles ...), nous proposons pour les cartes d'occupation des sols des trois zones étudiées une légende homogène comportant 4 classes principales (fig. 4.8) : cultures irriguées, cultures pluviales, terrains incultes et forêt.

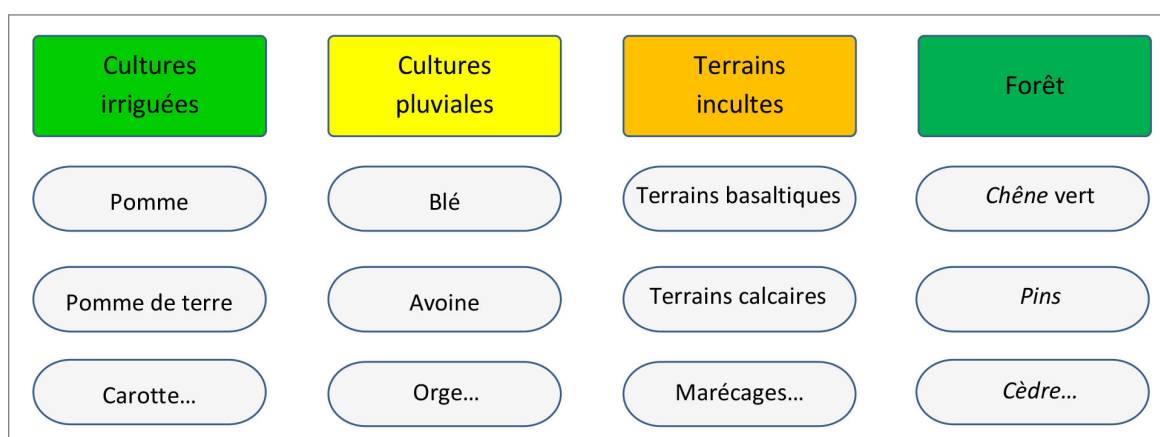


FIGURE 4.8. Grandes classes d'occupation des sols dans la zone d'étude

7. Suivie de la réflectance spectrale

Le suivi de la réflectance spectrale a fait l'objet de plusieurs travaux qui s'intéressent à l'étude de l'évolution spatiotemporelle des cultures et des zones humides (Amani et al., 2018 ; El-Hendawy et al., 2019 ; López-Serrano et al., 2016 ; Ouzemou et al., 2018 ; Prieto-Ampan et al., 2018). Dans la zone d'étude, le suivi de la réflectance spectrale se base sur l'intégration des données de terrain et les données fournies par la télédétection spatiale pour déterminer les mois les plus favorables à l'étude de différents types de cultures et pour caractériser les espaces agricoles. Ainsi l'analyse de la réflectance spectrale nous a permis de sélectionner les bandes spectrales les plus utiles pour distinguer les classes d'occupation des sols à partir d'images satellites (Landsat TM et OLI).

Les résultats obtenus à partir du traitement et d'extraction des données relatives à la réflectance spectrale (figs. 4.9 à 4.12) montrent que la bande du proche infrarouge (PIR) est la meilleure

pour la détection des changements des cultures au cours de l'année. Dans un premier temps, la variation annuelle de sa valeur permet de faire une distinction entre les cultures irriguées et les cultures pluviales (figs. 4.9 à 4.12). Ci-après, une présentation des grandes classes des cultures dans les dépressions Moyen Atlasique et la date la plus propice pour l'étude de son évolution spatiotemporelle en se basant sur les calendriers agricoles et l'analyse de la réflectance spectrale qui fournit un autre niveau d'observation et de perception dans cette étude.

» **Les cultures irriguées** : d'après les données des calendriers agricoles (tableaux 4.7 et 4.8) et de la réflectance spectrale nous constatons que la période estivale est la plus favorable pour l'étude et le suivi des cultures irriguées dans la zone d'étude. À ce moment de l'année, la plupart des cultures irriguées atteignent le stade de maturation, et la réflectance spectrale témoigne d'une forte augmentation dans le proche infrarouge (PIR). Pour les cultures maraîchères irriguées (pomme de terre, oignon ...) le mois d'août est considéré le meilleur pour le suivi de ce type de cultures (fig. 4.9). En revanche, les vergers de rosacées enregistrent les valeurs les plus élevées dans la courbe de la réflectance spectrale de juin à août (fig. 4.10).

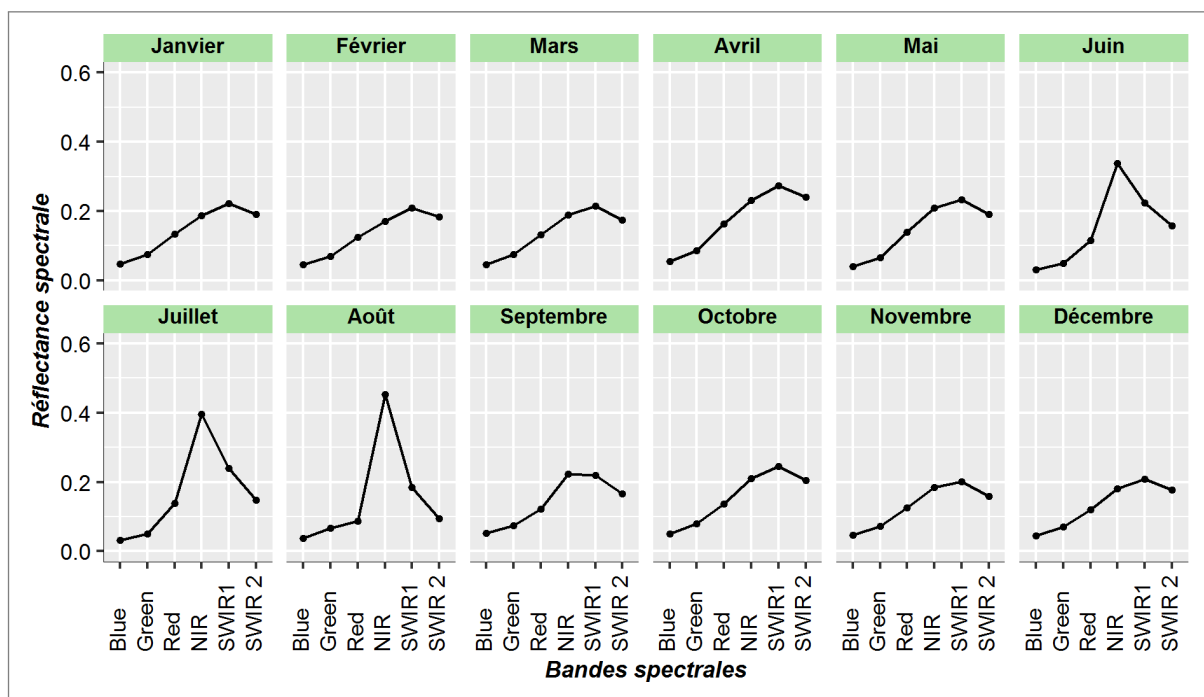


FIGURE 4.9. Variation de la signature spectrale des cultures maraîchères irriguées (pomme de terre) dans la plaine de Guigou en août 2018

[Images satellites Landsat 8]

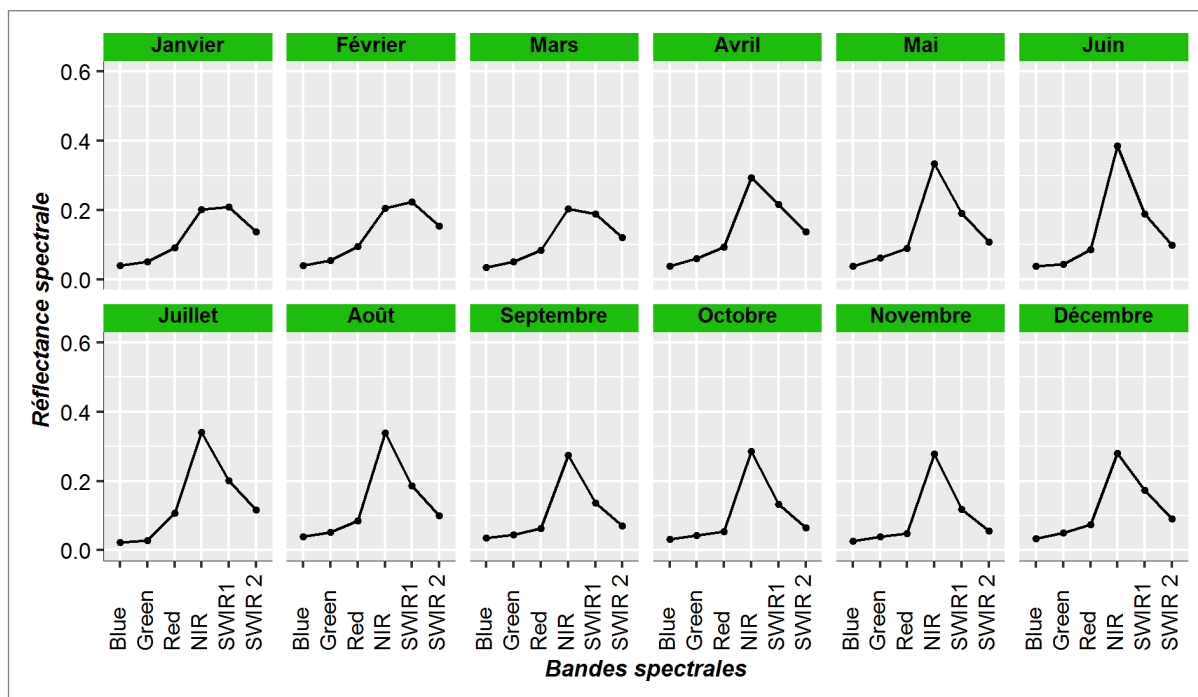


FIGURE 4.10. Variation de la signature spectrale des vergers (pommiers) dans la dépression d'Imouzzer en août 2018

[Images satellites Landsat 8]

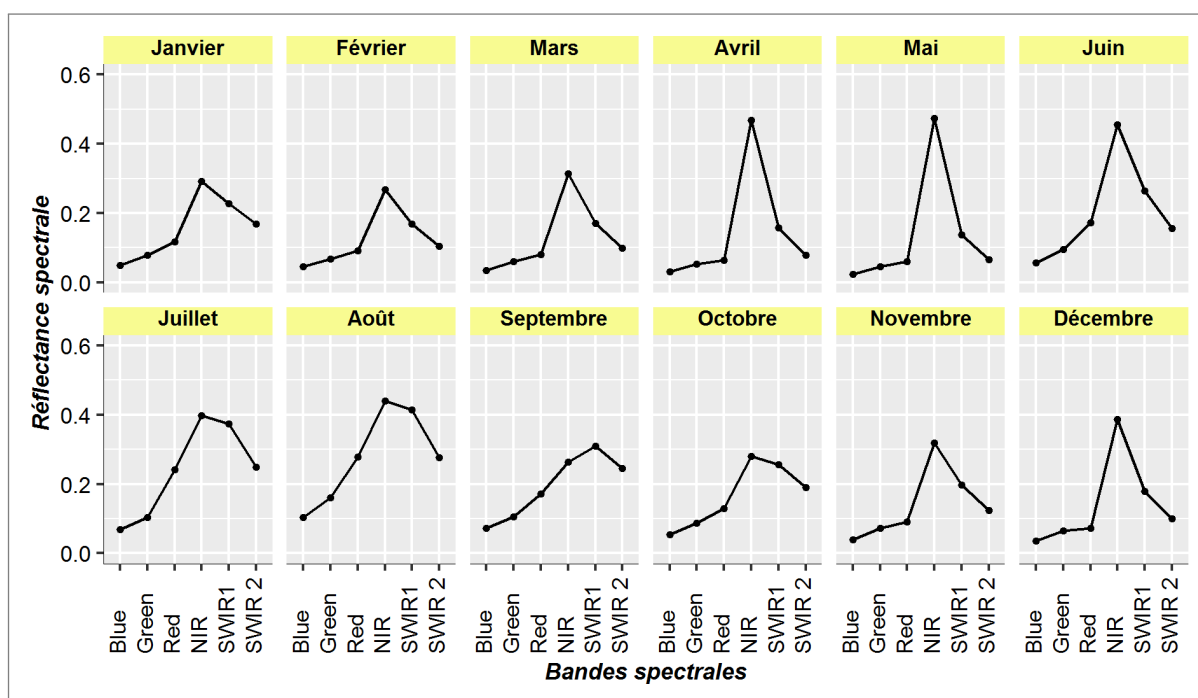


FIGURE 4.11. Variation de la signature spectrale des cultures pluviales (orge) dans la dépression de Guigou en août 2018

[Images satellites Landsat 8]

» **Les cultures pluviales** : la combinaison des données de terrain et celles des images satellites permet de mettre en évidence la variation des cultures pluviales durant l'année. En effet, la période la plus favorable pour l'étude de ce type de cultures est la période hivernale (avril et mai) où la réflectance spectrale atteint les valeurs les plus élevées (fig. 4.11) et le (tableau 4.9).

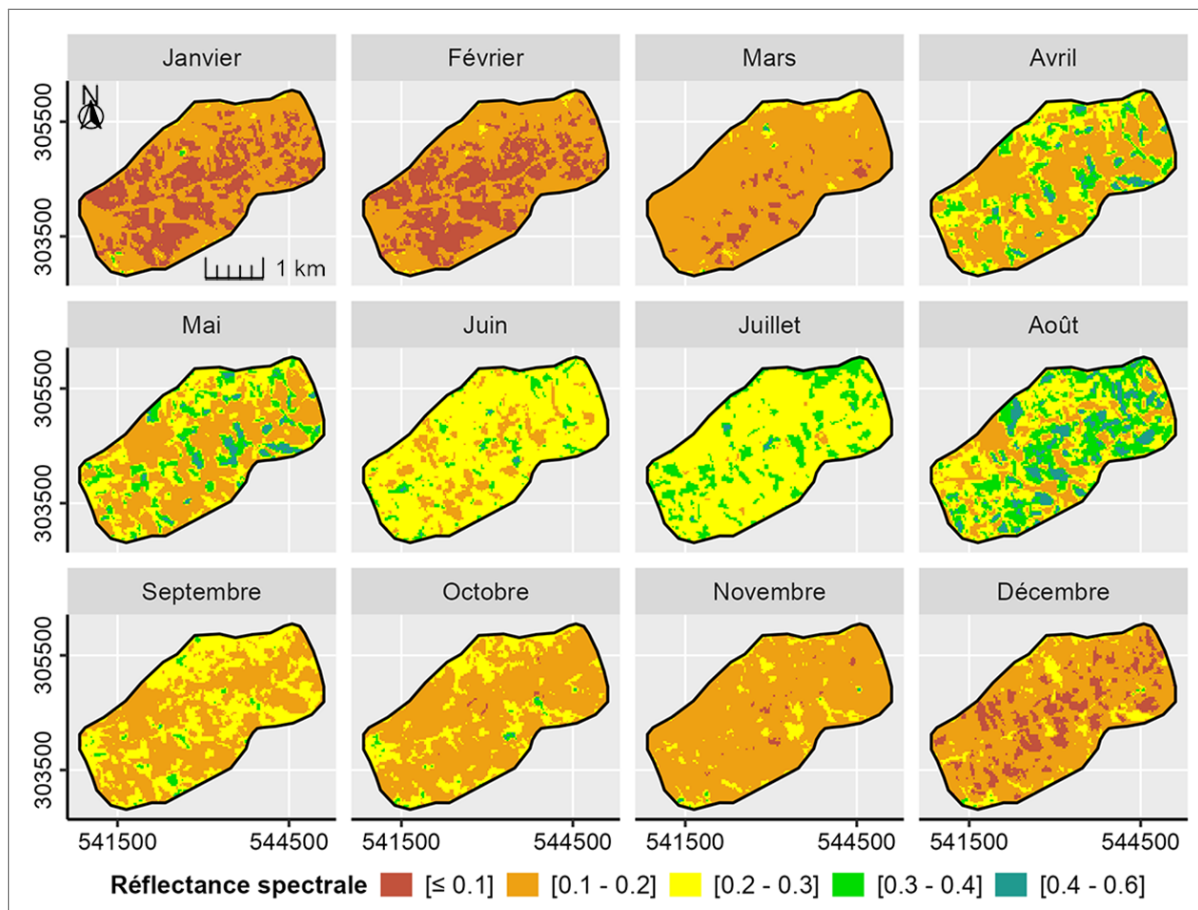


FIGURE 4.12. Variation de la réflectance spectrale dans le PIR de janvier à décembre 2018 dans une partie de la zone d'étude

[Images satellites Landsat 8]

8. Réalisation du plan parcellaire

L'élaboration des cartes des plans parcellaires dans les trois secteurs (dépression de Guigou, dépressions d'Imouzzet et de dayet Aoua et dépressions d'Fourgagh et de Laanoucer) constitue un élément important pour montrer la répartition spatiale des parcelles agricoles et pour mettre en évidence la fragmentation et de morcellement des terres. En effet, les plans parcellaires ont été réalisés à partir des images satellites Google Earth à très haute résolution spatiale (fig. 4.13). Pour la digitalisation des parcelles sur l'ensemble des dépressions, nous avons passé

plusieurs mois. En guise d'exemple, la réalisation de la carte des parcelles (plus de 11500 parcelles) dans la dépression de Guigou a pris plus de trois mois.



FIGURE 4.13. Exemple des images utilisées pour la réalisation des cartes des parcelles dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire

Conclusion

Pour cartographier et quantifier la dynamique d'occupation des sols dans la zone d'étude, nous avons élaboré une méthodologie qui se base sur la combinaison des données satellitaires et le travail de terrain. La méthodologie commence par la délimitation de la zone d'étude et passe par plusieurs étapes (travail de terrain, prétraitement des images satellites, échantillonnage, classification) et fini par la validation des résultats à partir du travail de terrain et le calcul du coefficient de Kappa de Kohen. La méthodologie établie dans ce travail est appliquée sur trois secteurs dans le Moyen Atlas tabulaire : dépression de Guigou, dépressions d'Imouzzet et de dayet Aoua et dépressions d'Fourgagh et de Laanoucer.

CHAPITRE 5

Chapitre 5 : La dynamique des vergers de rosacées dans les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua

Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude des dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua afin de mettre en évidence les changements consécutifs des structures paysagères et de faire ressortir ces changements au niveau des grandes classes d'occupation des sols (cultures irriguées, cultures pluviales, terrains incultes, forêts) par la réalisation d'une étude diachronique entre 1985 et 2018. Ainsi ce chapitre présente l'évolution spatiotemporelle des vergers de rosacées (pommier, pêchier, nectarinier...) dans les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua sur plus de trois décennies.

1. Les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua

Situées dans le Moyen Atlas tabulaire, Les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua (fig. 5.1) s'étalent sur une superficie d'environ 252 km². Administrativement, elles dépendent de la province de Sefrou (Communes : Ait Sebaa Lajrouf, Kandar Sidi Khiar et municipalité d'Imouzzet Kandar) et la province d'Ifrane (Communes : Dayet Aoua et Tizguite). Les altitudes dans ce secteur oscillent entre 870 mètres environ dans les basses dépressions (Sahb Achar) et plus de 1800 mètres dans les montagnes (Jebel Medouar). L'aspect tabulaire est perceptible sur de vastes zones. La géométrie des accidents tectoniques a favorisé la mise en place d'une alternance de dépressions et de monticules plus ou moins vastes. Ces dépressions (Sahb Achar, Dayet Aoua...) du fait de leur richesse en sol et en eau sont aujourd'hui très convoitées pour la pratique de l'agriculture.

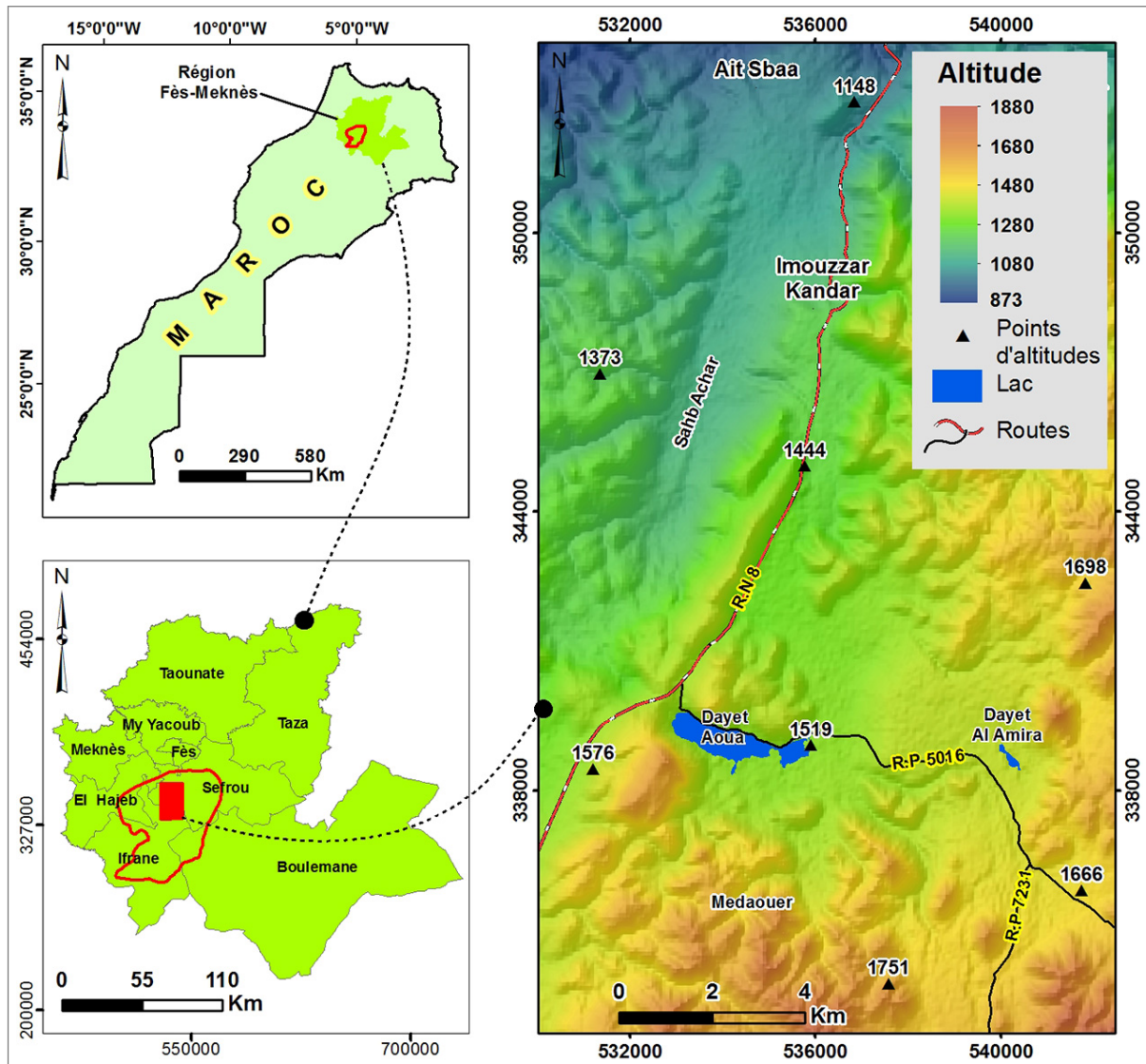


FIGURE 5.1. Situation géographique et administrative des dépressions d'Imouzzar et de Dayet Aoua
 Ce secteur est caractérisé par la dominance des formations lithologiques à fort coefficient de perméabilité et d'emmagasinement (calcaires et dolomies du Lias). Couplés à des précipitations importantes (entre 1935 et 2010, la station d'Ifrane a enregistré 985 mm en moyenne), ces facteurs hydrogéologiques favorisent l'abondance des ressources en eau et participent largement à la dynamique des surfaces irriguées sur les fonds des vallées et les dépressions intramontagnardes.

À l'instar des autres régions montagnardes marocaines, cet espace a enregistré au cours des dernières décennies des modifications paysagères, sociales et environnementales très profondes. L'aspect le plus remarquable et qui attire les chercheurs s'intéressant aux milieux montagnards, est le fort développement et l'extension des cultures irriguées (vergers de rosacés)

au détriment des aires de pâturage et les terres marécageuses.

2. Classes d'occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua

La détermination des classes d'occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua se base essentiellement sur les données collectées sur le terrain. Les missions de terrain que nous avons effectuées nous ont permis d'identifier les 5 grands types d'occupation du sol suivants :

» **Cultures irriguées** : se caractérisent par la diversité et une prédominance remarquable des vergers de rosacés (pommier, pêcher, nectarinier ...). Par contre, la superficie des autres types de cultures (haricot, pomme de terre, ...) est très limitée.

» **Cultures pluviales** : elles s'étalent sur une superficie très limitée dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua.

» **Forêts** : les forêts, composées de pins et chêne vert, occupent une superficie très importante sur les interfluves et les versants qui surplombent les dépressions irriguées.

» **Terrains incultes** : englobent toutes les terres non occupées par les cultures irriguées (terrains de pâturages). Ces terrains sont essentiellement situés sur les marges des vergers des rosacées et à proximité des zones humides.

» **Habitats** : On distingue des habitats groupés (centre urbain d'Imouzzer, villages et centre des communes) et des habitats dispersés (zones rurales et périurbaines).

» **Lacs** : les deux lacs (Dayet Aoua et lac Sidi Mimoun (Dayet Al Amira) situés dans les dépressions de ce secteur occupent une place importante par leurs intérêts écologiques, socio-économiques et environnementaux.

3. Répartition des parcelles agricoles dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua

Il ressort d'après la carte (fig. 5.2) que la répartition des parcelles agricoles se caractérise par une inégalité spatiale. Les parcelles agricoles se localisent essentiellement sur les fonds des

dépressions et à proximité des ressources. La figure 5.3, montre que :

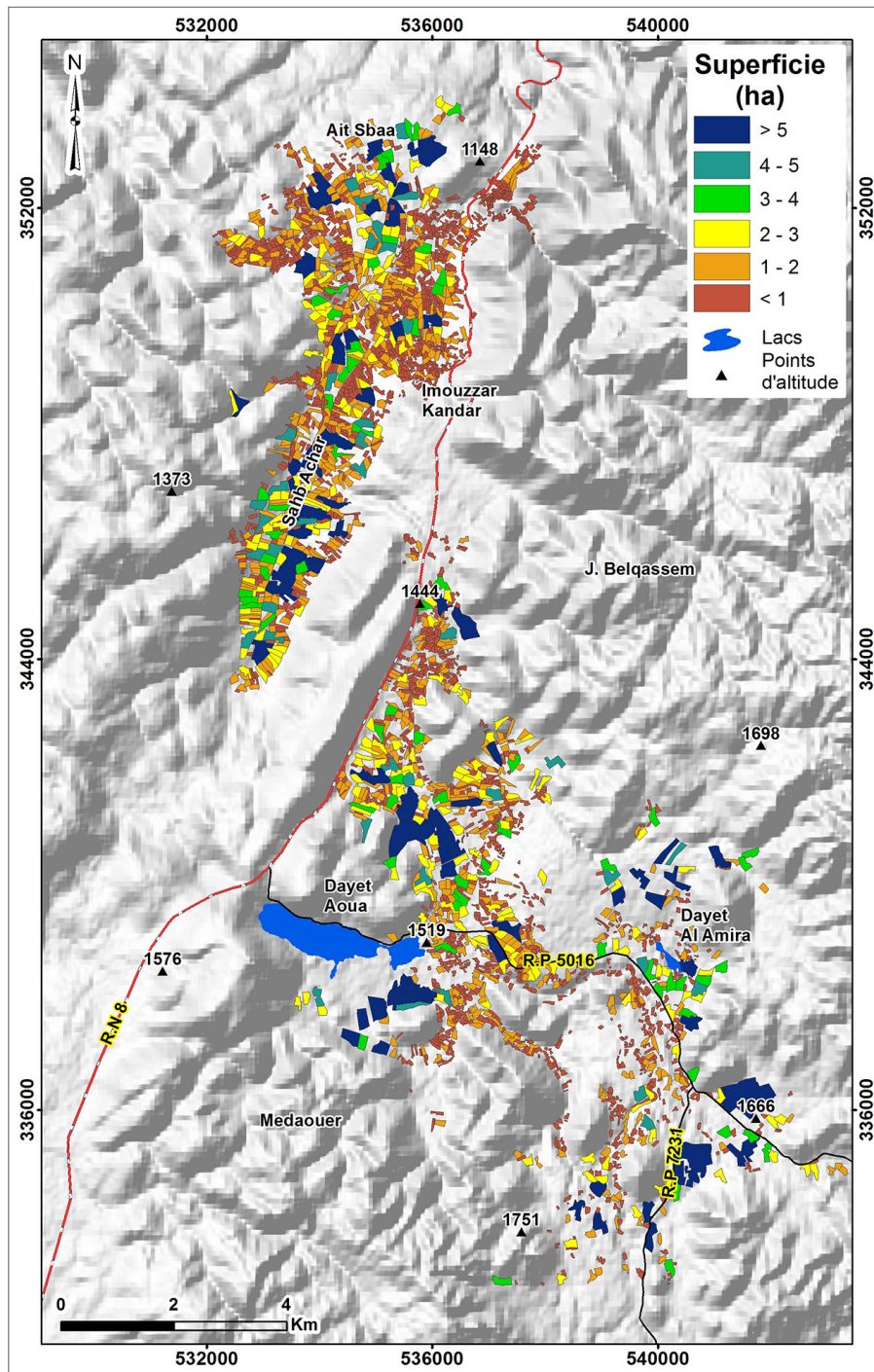


FIGURE 5.2. Répartition des parcelles agricoles dans les dépressions d'Imouzzar et de Dayet Aoua

» Les petites parcelles [< 1 et entre 1 et 2 ha] représentent plus de la moitié de la superficie à l'échelle des dépressions avec un pourcentage d'environ 54 %.

» Les parcelles moyennes [entre 2 et 4 ha] relativement faibles et forment à peine 22 % de la superficie totale.

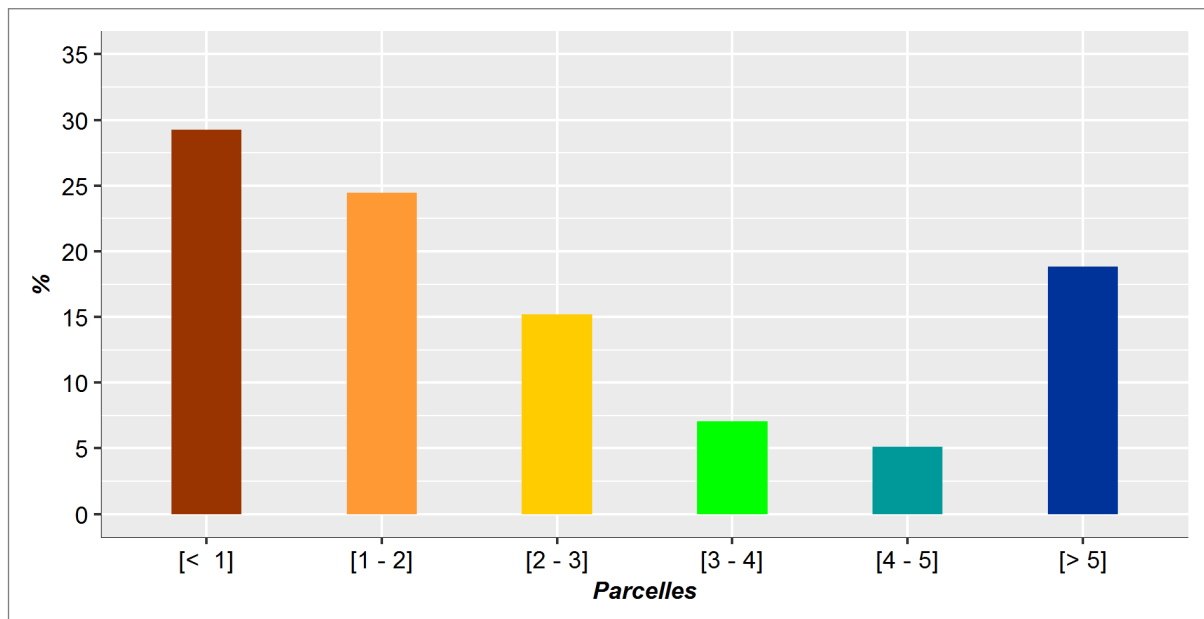


FIGURE 5.3. Répartition des parcelles agricoles en fonction de la surface en % dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua

» Les parcelles supérieures à [> 4 ha] couvrent une superficie d'environ 24 %. La plupart des parcelles de grandes superficies sont des parcelles récemment aménagées par les agriculteurs.

Dans ce secteur, plus de 95 % des parcelles sont occupées par les vergers de rosacées. Grâce au développement récent des vergers de pommiers, de poiriers, de pêchiers, de cerisiers et de pruniers à travers de nombreux terroirs, cette région est devenue l'un des plus importants bassins fruitiers du pays (Badidi, 1995, 1999).

4. Évolution d'occupation des sols entre 1972 et 2018

La structure d'utilisation des terres d'une région donnée est adaptée aux besoins de la société humaine locale (Kertész et al., 2019) et aux conditions naturelles (climat, ressources en eau, ...). Pendant longtemps les montagnes marocaines sont restées loin des transformations et du développement que connaît le pays et leurs populations connaissaient des conditions de vie plus ou moins difficiles. Car, « *l'intérêt en vers cette portion du territoire s'est toujours limité à l'exploitation de ses richesses naturelles (exploitation des forêts, construction des barrages pour mobiliser l'eau et produire de l'électricité consommée ailleurs)* » (Ait-Hamza et Popp, 2005).

Avec la croissance démographique, l'ouverture sur le reste du pays, la volonté d'exploitation des richesses naturelles et les subventions de l'État, ces milieux ont enregistré au cours des

dernières décennies une dynamique rurale remarquable reflétée par d'importantes modifications paysagères. Il s'agit essentiellement de l'extension des cultures irriguées et de l'arboriculture (vergers de rosacés) qui s'est faite au détriment des terrains de pâturage et des terres des cultures « bour ». Les rythmes des changements, les processus mis en action, les acteurs et les intervenants dans cette dynamique n'ont pas été les mêmes pendant toute cette période. Sans prétendre retracer l'historique détaillé des surfaces irriguées, nous pouvons distinguer trois principales phases aux caractéristiques très contrastées. Ainsi, l'interprétation visuelle des figures 5.4 à 5.8 met en lumière l'évolution progressive des cultures irriguées dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua, qui s'est d'abord cantonnée aux noyaux anciens, puis une extension vers les fonds des principales dépressions et enfin un développement dans tous les sens. Tous ceci au détriment des terres de pâturages et des cultures pluviales. La dynamique flagrante des vergers de rosacées dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua a provoqué une forte pression sur les ressources en eau (notamment souterraines). Les principaux aspects négatifs de la pression sur les ressources en eau résident dans le tarissement de nombreuses sources, l'assèchement total du dayet Aoua et la régression des marécages le long des dépressions (El-Bouhali et al., 2021a).

4.1. Cantonnement des premiers périmètres irrigués à l'aval des sources et dans les fonds des vallées

Avant le protectorat, le Moyen Atlas était essentiellement une terre d'élevage où la transhumance se perpétuait par les éleveurs locaux et des régions voisines (Amyay et al., 2000 ; Badidi, 1995 ; El-Jihad, 2016 ; Jennan, 1986 ; Tag, 1996). La pratique de l'agriculture pluviale était limitée. L'irrigation se pratiquait essentiellement sur les terrasses fluviales le long des oueds et en aval des sources en exploitant les eaux de surface à l'aide de techniques de mobilisation traditionnelles basées sur des ouvrages de dérivation et des réseaux de séguis plus ou moins longs.

Avec l'établissement du protectorat et après l'indépendance, la fixation des populations prend plus d'ampleur et a permis l'extension de nombreux noyaux de sédentarisation. En parallèle, la pratique de l'agriculture s'étend sur davantage de terrains, mais sans enregistrer de grands bouleversements de la configuration traditionnelle héritée d'avant le protectorat. Les exploita-

tions dont l'irrigation se faisait par l'exhaure des eaux souterraines restaient peu importantes dans la dépression au nord de Dayet Aoua.

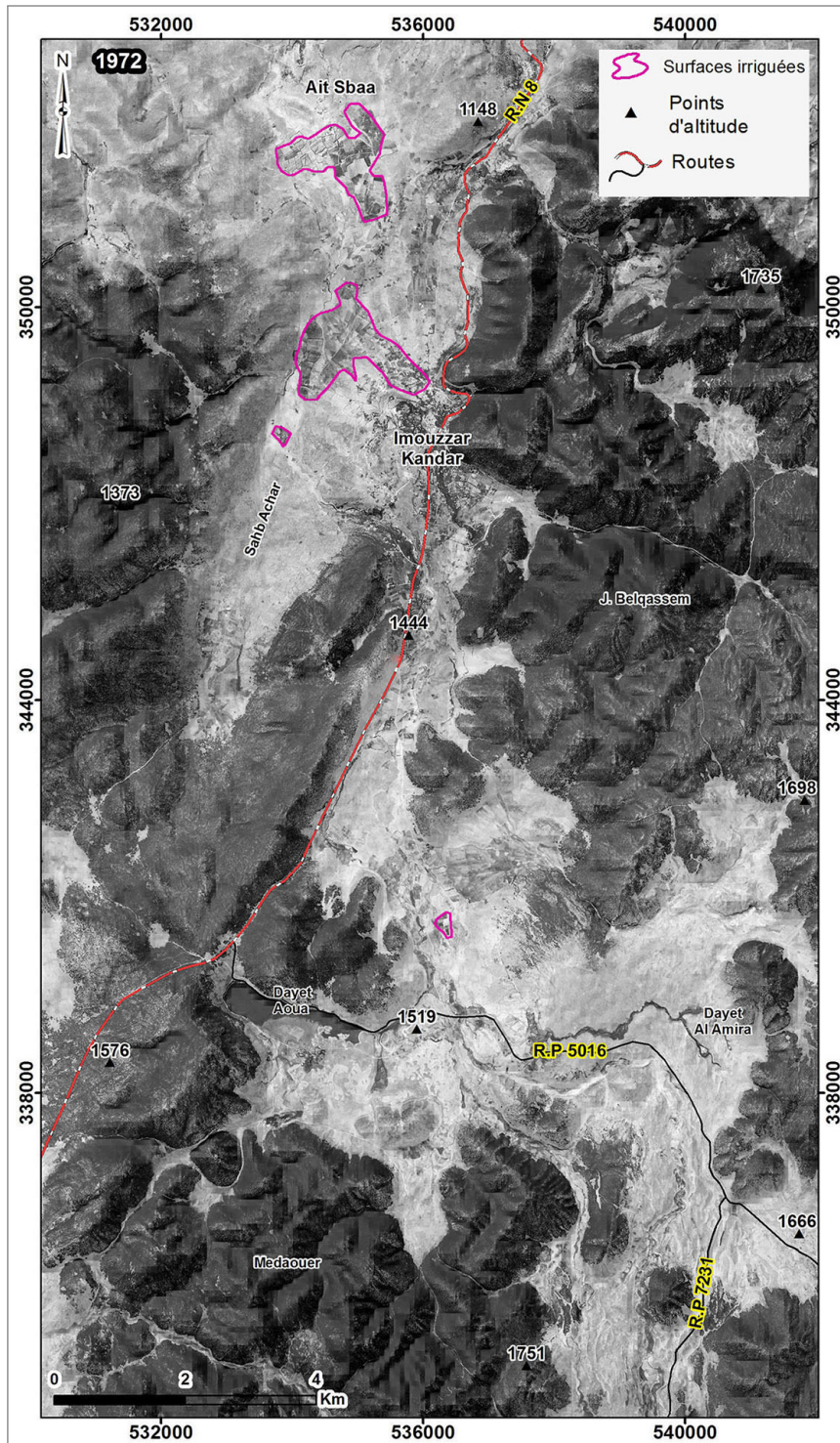


FIGURE 5.4. Situation d'occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzar et de Dayet Aoua en 1972 [images satellites CORONA]

L'observation de la carte (fig. 5.4) permet de mettre en évidence la situation d'occupation des sols dans les dépressions en 1972, généralement elle se caractérise par la dominance des forêts

et terrains de pâturages. Par contre, la superficie des terres irriguées était très limitée.

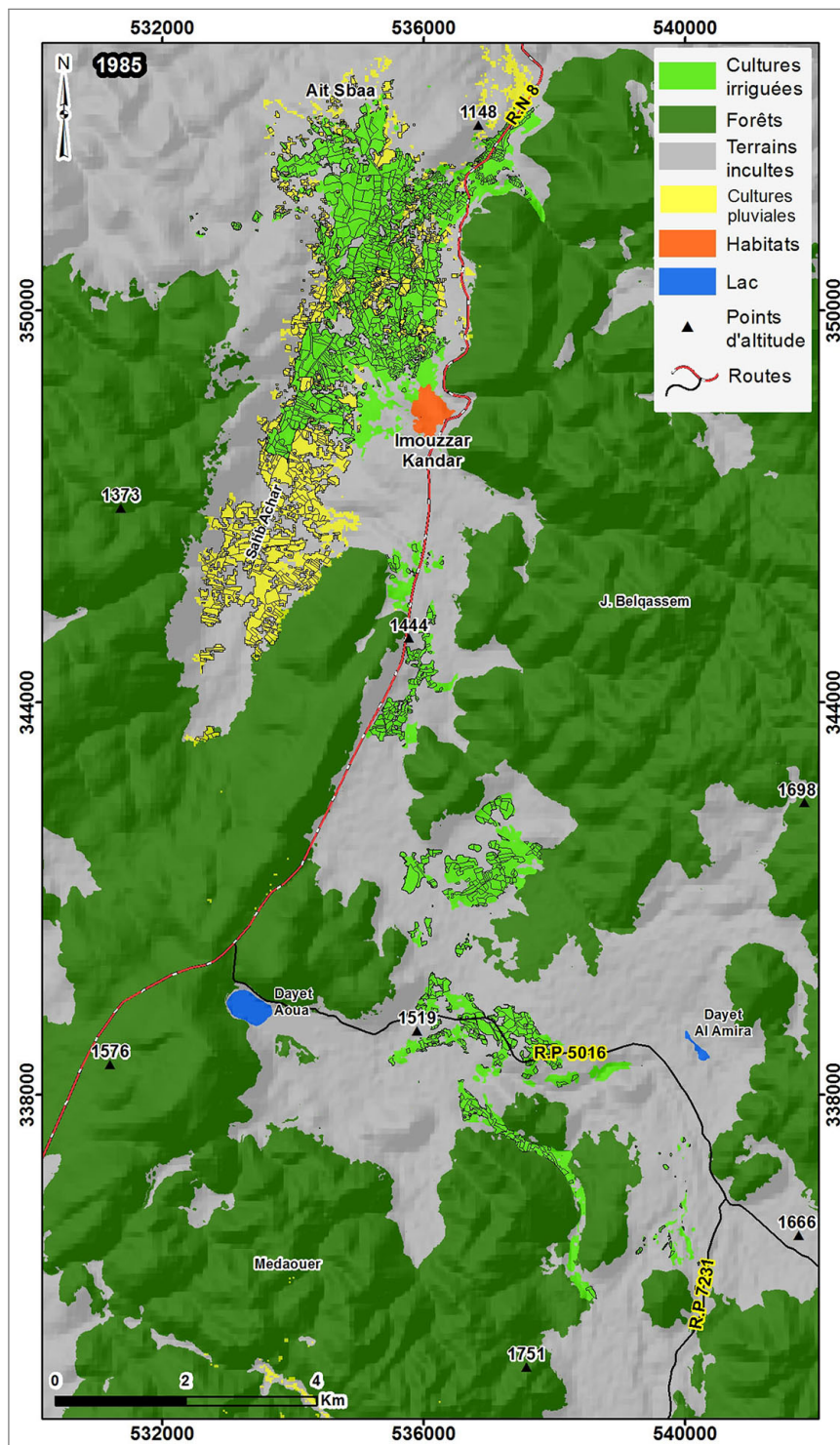


FIGURE 5.5. Occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzar et de Dayet Aoua en 1985

[image satellite Landsat TM, 17 mai et 14 août 1985]

Les premiers noyaux d'irrigation sont apparus aux alentours du centre d'Imouzzar et au niveau de la collectivité territoriale Ait Sbaa. En revanche, il ressort de la carte (fig. 5.5) qu'en 1985 les terres irriguées se sont développées vers les terrains situés à proximité des ressources en

eau ; toutefois leur superficie restait très limitée. Cette extension des cultures irriguées dans les dépressions à partir des années 80 peut être justifiée par l'influence de la succession des années de sécheresses qu'a connu le Maroc durant cette période et par les interventions étatiques (Barakat et Handoufe, 1997 ; El-Khyari et Amin, 1987).

4.2. L'extension de l'irrigation dans les fonds des dépressions

La fréquence des années de sécheresse qu'a connue le Maroc durant les années 1980 ont largement perturbé les systèmes de production des cultures pluviales (*bour*) et ont provoqué la diminution du rendement des terres, la dégradation des pâturages et la baisse des débits des sources. Suite à cette crise, les stratégies de développement rural de l'État, des acteurs locaux et des porteurs de projets d'investissement en agriculture vont se focaliser davantage sur l'irrigation. Ceci a contribué au bouleversement des pratiques agricoles et au recours effréné à l'irrigation. Dans le Moyen Atlas, la mise en valeur agricole va intéresser toutes les zones pourvues de ressources en eau, présentant des facteurs édaphiques favorables et facilement accessibles.

L'extension de l'irrigation dans les grandes dépressions (Sahb Achar, dayet Aoua, ...) est le résultat de disponibilité des terrains favorables à la pratique de l'irrigation, la présence d'une nappe souterraine puissante et la volonté des populations locales de faire le pari sur la modernisation des pratiques agricoles. La forte fluctuation de la disponibilité des eaux de surface et la succession des périodes plus moins longues de sécheresse (exemples : 1980-1985, 1993-1995, 2000-2002, 2018-2022) vont pousser les agriculteurs à l'utilisation intensive des eaux souterraines. Ainsi, la motopompe se généralisera même chez un grand nombre de paysans qui jadis irriguait à partir des eaux de sources et des séguias. Le nombre de puits a enregistré une augmentation conséquente. Cela a favorisé l'extension de l'agriculture sur de larges parties des dépressions. À la fin du vingtième siècle presque, tous les fonds des dépressions de Dayet Aoua et d'Imouzzer étaient irrigués. Les paysages étaient marqués par de vastes exploitations modernes et les pratiques traditionnelles d'occupation et d'utilisation des terres cèdent définitivement la place aux périmètres irrigués modernes.

Les cartes (figs. 5.6 et 5.7) mettent en lumière l'extension des surfaces irriguées dans les dé-

pressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua au tournant des années 2000. Elle correspond à une multiplication rapide des vergers de rosacées au détriment des terrains de pâturages et des anciennes terres des cultures pluviales.

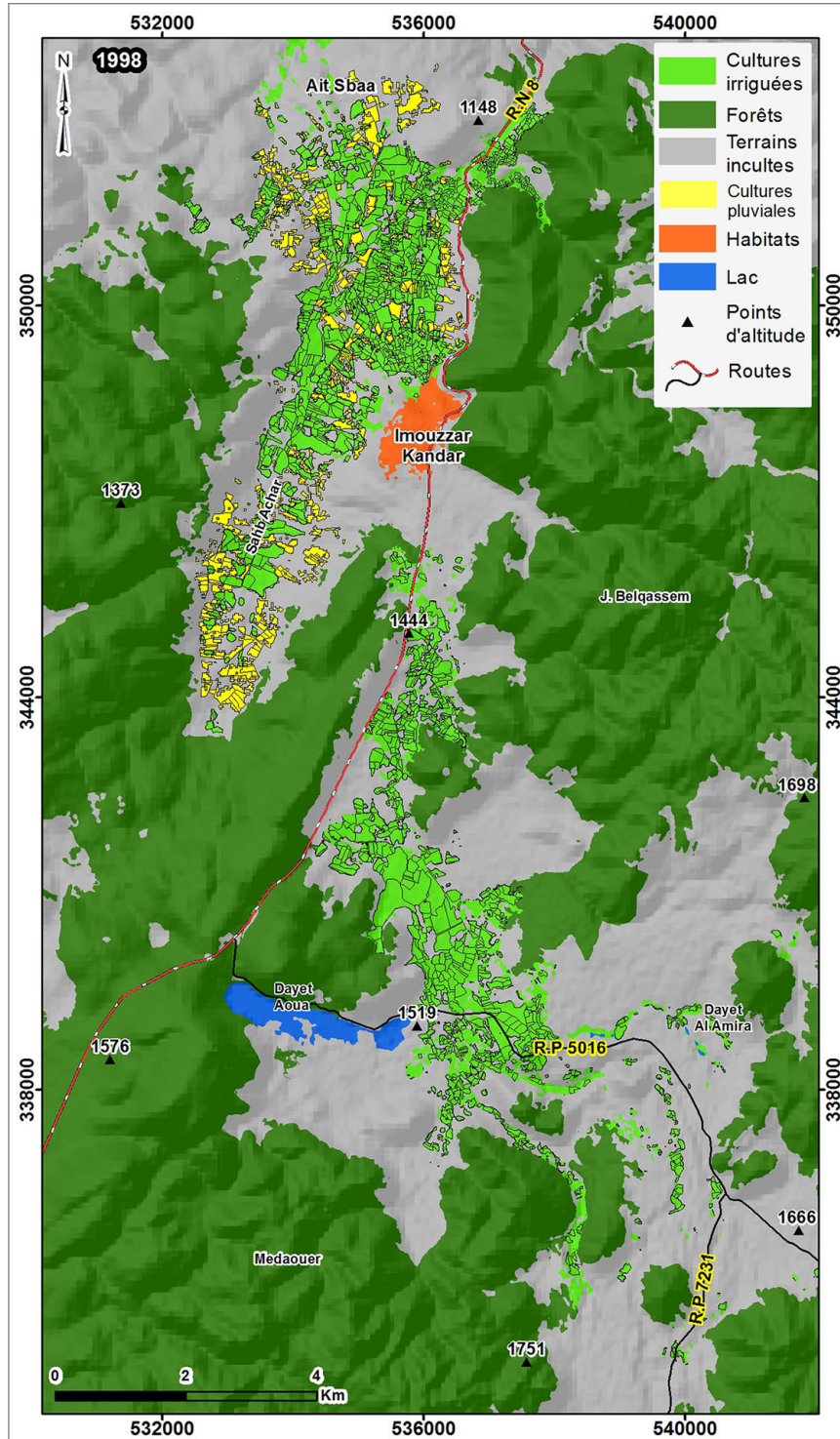


FIGURE 5.6. Occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua en 1998

[image satellite Landsat TM, 12 avril et 2 août 1998]

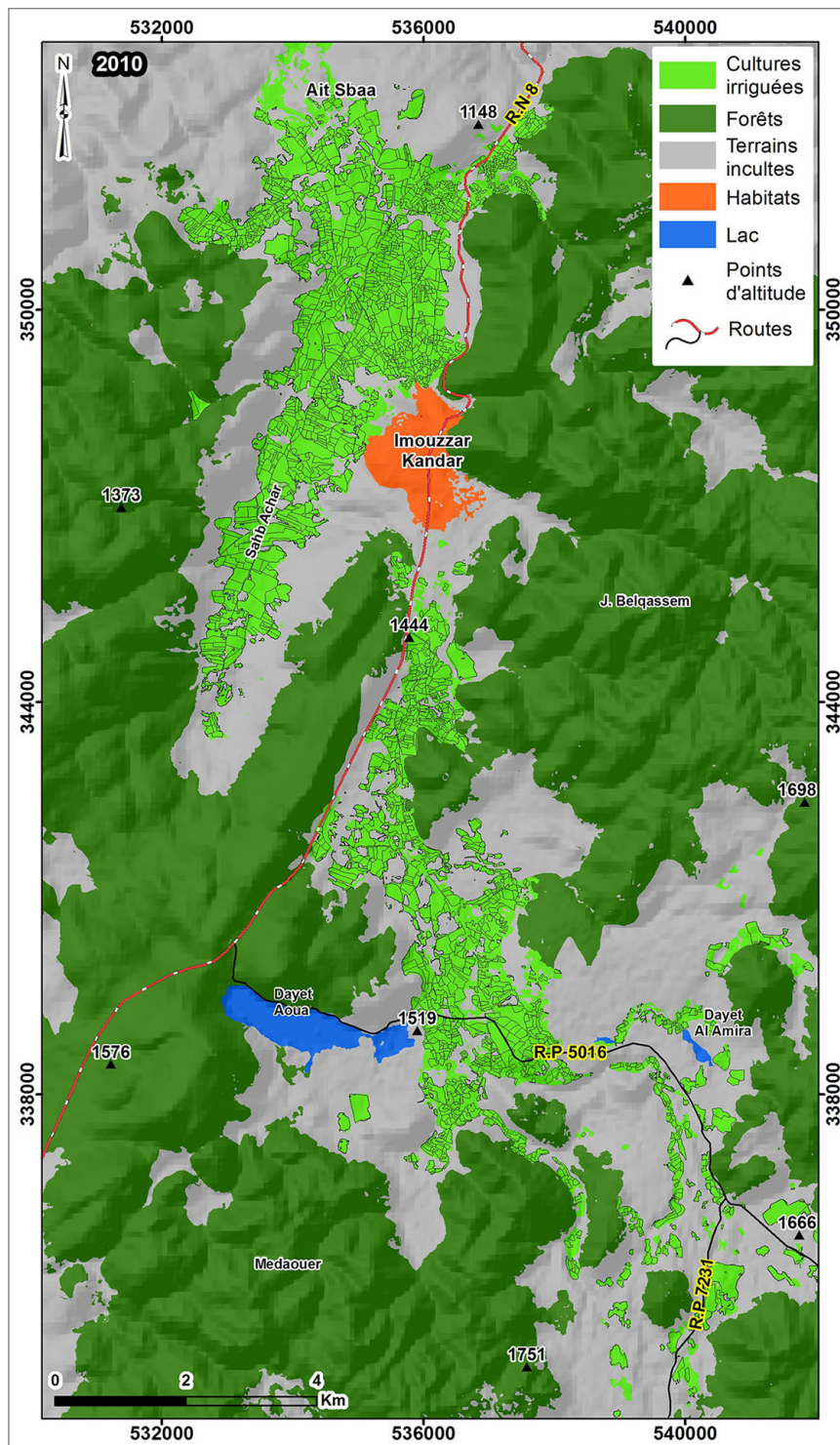


FIGURE 5.7. Occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua en 2010

[image satellite Landsat TM, 15 mai et 3 août 2010]

4.3. L'extension de l'irrigation en dehors des fonds des dépressions

Au cours des deux dernières décennies, l'extension des surfaces irriguées s'est poursuivie. La carte d'occupation des sols établie à partir de l'image Landsat OLI de 2018 (fig. 5.8) montre une nette progression des surfaces irriguées par rapport à l'année 2010 (fig. 5.7). La mise en valeur

et l'aménagement des terrains pour l'irrigation se sont étendus dans toutes les directions.

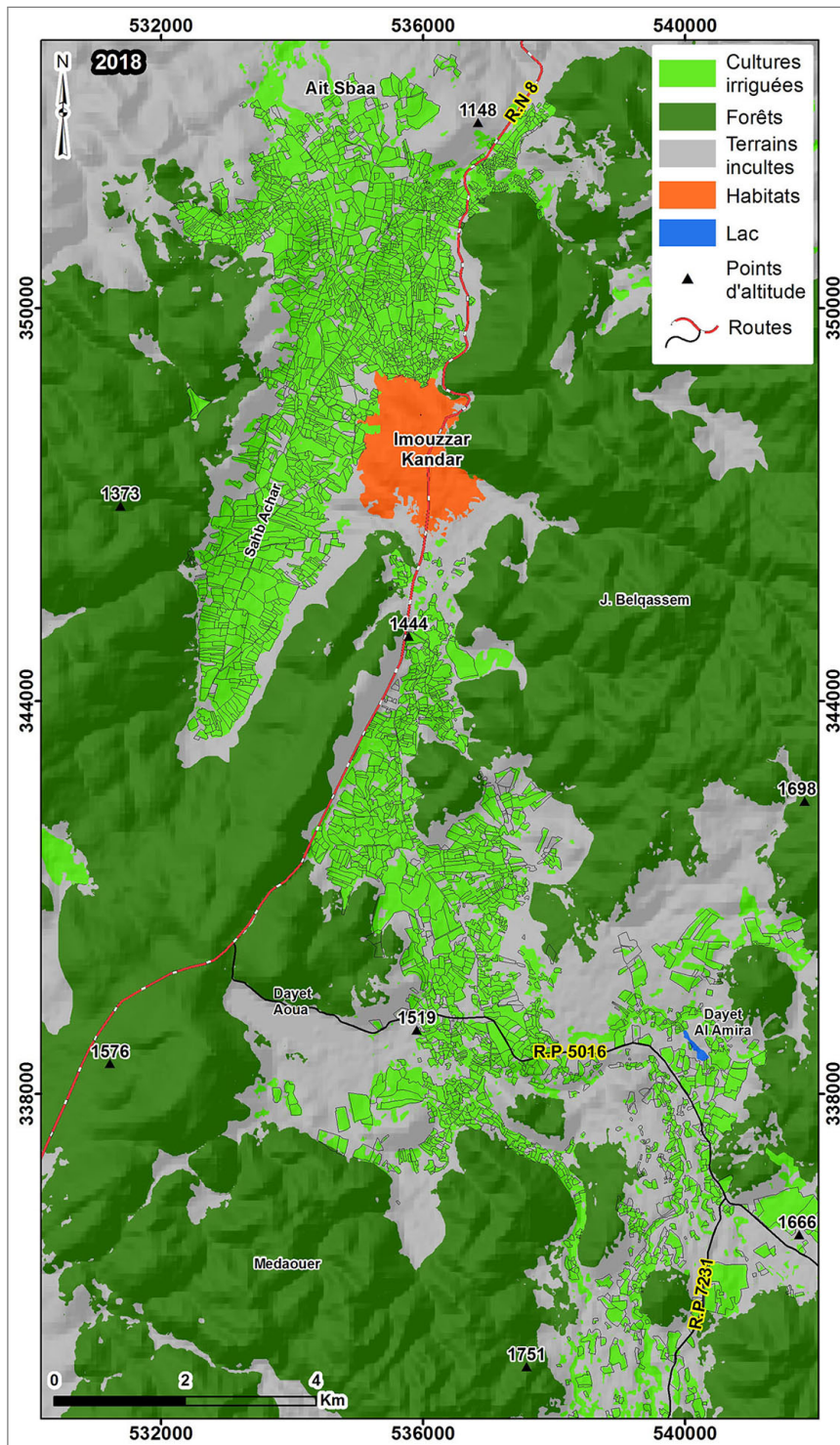


FIGURE 5.8. Occupation des sols dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua en 2018

[image satellite Landsat OLI, 19 avril et 9 août 2018]

On trouve désormais des terres irriguées sur les versants des dépressions, les terres marécageuses, les prairies et jusqu'aux lisières des forêts. Le profit généré par les cultures irriguées, les incitations des pouvoirs publics (aides financières pour les forages et l'épierrage) et l'afflux

des capitaux allochtones à la région sont à l'origine de cette évolution.

L'irrigation de ces nouvelles exploitations est assurée exclusivement par les eaux souterraines. L'exhaure effectuée dans ces zones extrait à la nappe des volumes d'eau considérables. Cette dynamique agricole a accru la pression sur les ressources en eau ce qui a vraisemblablement entraîné un impact sur le déficit pluviométrique.

4.4. La dynamique des rosacées dans les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua

Le suivi de l'évolution de l'occupation du sol dans les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua met en évidence une importante dynamique paysagère caractérisée par une forte extension des surfaces agricoles irriguées (vergers de rosacées) sur la période 1985-2018 (fig. 5.9).

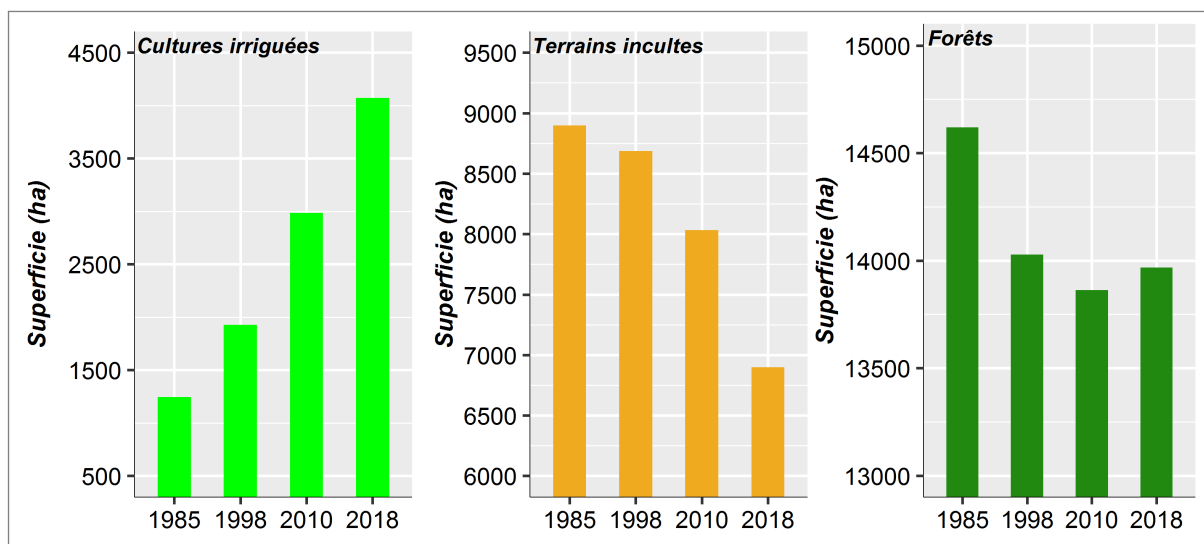


FIGURE 5.9. Évolution de la superficie (ha) d'occupation du sol dans les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua 1985 et 2018

Ainsi, elles passent d'environ 1200 ha en 1985 à plus de 4000 ha environ en 2018; le taux d'évolution annuel moyen est de 85 ha. Cette extension des surfaces irriguées s'est faite essentiellement au détriment des terrains incultes (terrains de pâturages). Cette conversion est manifeste et reflétée dans les figures 5.9 et 5.10 et le tableau 5.1. Ainsi, les forêts passent de plus de 14600 ha en 1985 à environ 13900 ha en 2018 alors que les terrains incultes régressent de 9300 ha en 1985 à 6900 ha en 2018.

En trois décennies, les dépressions d'Imouzzet et de Dayet Aoua ont été sujettes à une dyna-

mique paysagère flagrante marquée essentiellement par une tendance progressive des cultures irriguées (vergers de rosacées) au détriment des terrains incultes (terrains de pâturages). L'orientation des activités des populations vers l'irrigation et l'utilisation des techniques modernes d'exploitation des ressources en eau a eu comme corollaire une régression de la société traditionnelle et une pression très forte sur les ressources en eau notamment souterraines.

Classes	1985 - 1998	1998 - 2010	2010 - 2018	1985 - 2018
Cultures irriguées	681	1058	1085	2824
Forêts	-590	-165	105	-651
Terrains incultes	-232	-1039	-1134	-2405

TABLEAU 5.1. Données de télédétection multi-sources utilisées

Les conséquences des modifications des structures paysagères sur les ressources en eau sont frappantes dans notre zone d'étude. En effet, le système hydrologique est très perturbé par ces transformations. L'intensification de l'irrigation et l'évolution des volumes extrait en aval de dayet Aoua ont largement contribué au bouleversement du régime et du fonctionnement de ce dernier. Ainsi, l'assèchement total du Dayet Aoua pendant de longues durées comme en 2018 reflète la situation critique de niveau de la nappe caractérisée par une forte baisse généralisée.

Bien que cette baisse date du milieu des années 90 son ampleur est devenue inquiétante aujourd'hui. Le premier assèchement total survenu en 1995 coïncidant avec la multiplication des exploitations des rosacées et l'augmentation des volumes d'eau extraits à la nappe n'a duré que quelques mois. Ce premier épisode a été suivi par d'autres, dont la durée va croissante avec le temps. La forte pluviosité des années 2008 n'a pas pu renverser cette tendance. Depuis 2015 le lac est souvent à sec même en hiver. Ainsi, les sources situées en aval de Dayet Aoua (Ain El Rhars, Ain Jerah,...) sont également affectées. Leurs débits ont fortement diminué et enregistrent fréquemment des épisodes de tarissement total.

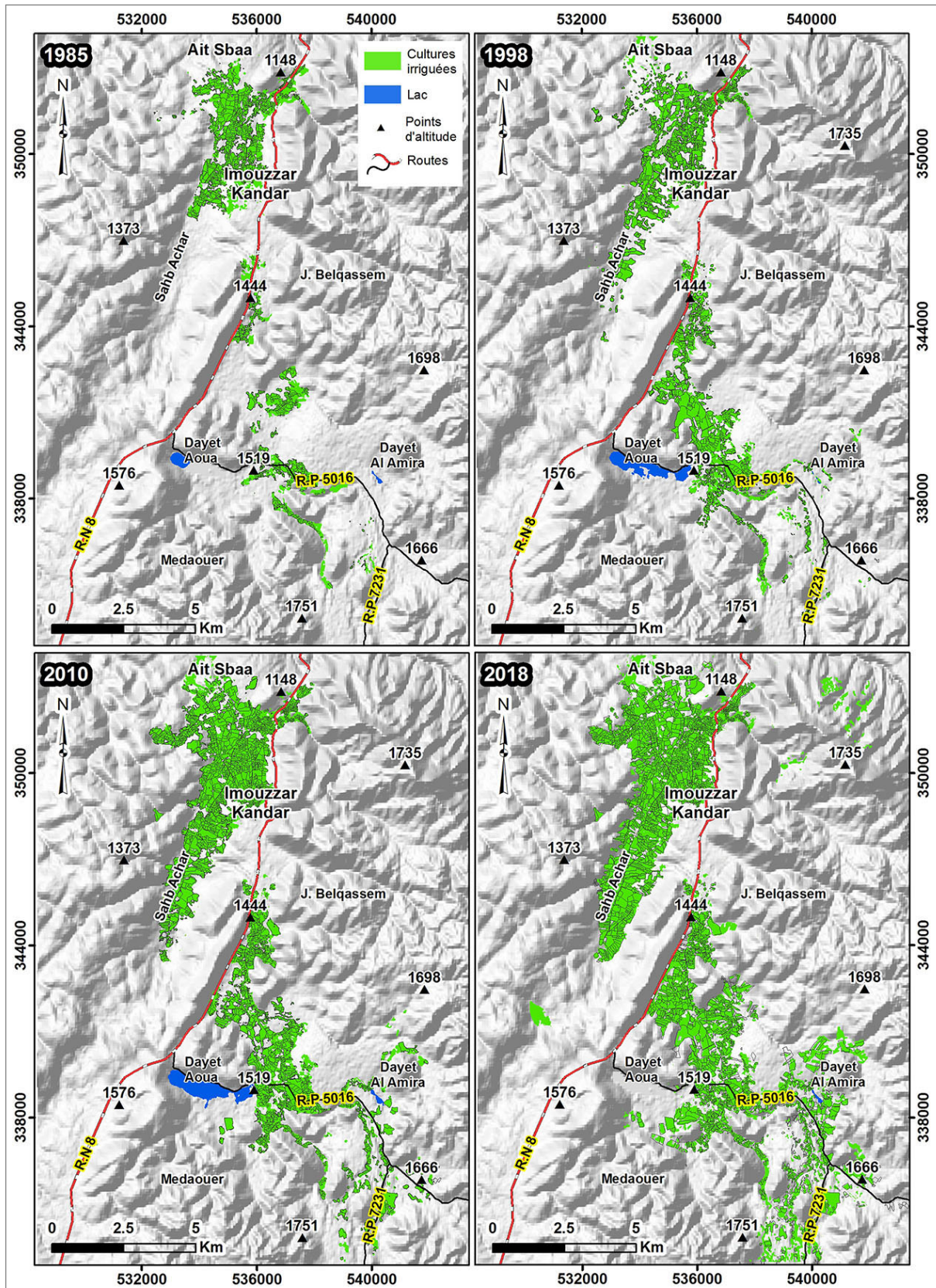


FIGURE 5.10. Evolution des surfaces irriguées dans les dépressions d'Imouzzar et de Dayet Aoua entre 1985 et 2018

[Images satellites Landsat TM et OLI]

Conclusion

Sous la combinaison des effets de facteurs naturels (l'abondance des ressources en eau, la succession des années sèches...) et anthropiques, les pratiques agricoles et les paysages dans les dépressions d'Imouzzer et de Dayet Aoua ont connu d'importants changements.

La cartographie et la quantification d'occupation du sol à partir du traitement des images satellites multispectrales et le travail de terrain permettent de mettre en lumière une dynamique progressive ou/et régressive des différents types d'occupation du sol. La tendance évolutive est marquée par l'extension des cultures irriguées (rosacées) au détriment des terrains incultes et les terrains des cultures pluviales. Ces grandes transformations ont provoqué une forte pression sur les ressources en eau souterraines. La maîtrise de ces tendances constitue un élément indispensable pour une gestion efficiente des ressources territoriales.

CHAPITRE 6

Chapitre 6 : La dynamique des cultures maraîchères dans la dépression de Guigou

Introduction

La cartographie et la quantification de la dynamique des grandes classes d'occupation des sols (cultures maraîchères irriguées, cultures pluviales, terrains basaltiques, terrains calcaires) dans la dépression de Guigou constituent une base pour comprendre la dynamique actuelle des paysages et pour montrer l'évolution spatiotemporelle des cultures maraîchères irriguées (pomme de terre, carotte, oignon) et la régression des terrains incultes / terrains de pâturages. Cela est fait par la réalisation d'une étude diachronique sur une période qui s'étend de 1985 jusqu'à 2018.

1. La dépression de Guigou

La dépression de Guigou est située dans le causse moyen-atlasique (ou Moyen-Atlas tabulaire), elle s'étend au sein du bassin versant du Haut Sebou sur une superficie d'environ 765 km² et dépend des provinces administratives de Boulemane et d'Ifrane (fig. 6.1).

La dépression de Guigou est inscrite dans une structure calcaire tabulaire faillée recouverte par des coulées basaltiques (Martin, 1981 ; Zeryouhi, 1977). Ce contexte hydrogéologique est favorable à l'infiltration des eaux et à l'existence des aquifères souterrains. Les sols se caractérisent par une profondeur variable selon les endroits. Dans le fond de la dépression, les sols issus de l'érosion des versants sont relativement profonds, tandis que sur les marges, sont moins profonds. Les écoulements de surface sont rares et souvent liés à des émergences hydro-karstiques qui alimentent les oueds (Akdim et al., 2011). Les altitudes oscillent entre 1495 mètres dans la dépression de Guigou et 2310 mètres au niveau de l'Accident Nord Moyen

Atlasique (ANMA). Le climat y est de type semi-aride caractérisé par un été chaud et sec et un hiver froid et pluvieux ou neigeux. Entre 1970 et 2017, la station climatique d'Aït Khabach a enregistré près de 357 mm de précipitations moyennes annuelles (ABHS) avec un maximum durant la période du printemps.

La dépression de Guigou est marquée par la présence de surfaces agricoles qui s'étalent sur plus de six kilomètres dans certaines zones, dans un premier temps elles étaient destinées aux cultures pluviales et aux pâturages. Avec la croissance démographique, la succession des interventions étatiques (projets d'aménagement et subvention des agriculteurs) et la succession des années sèches, cette zone a enregistré durant les dernières décennies d'importantes transformations. Elles sont marquées par la régression de la société pastorale/traditionnelle qui cède la place au développement des surfaces irriguées. La dynamique rapide de ces cultures a classé la dépression de Guigou parmi les plus importants périmètres irrigués du Moyen Atlas (El-Bouhali et al., 2023, 2021e).

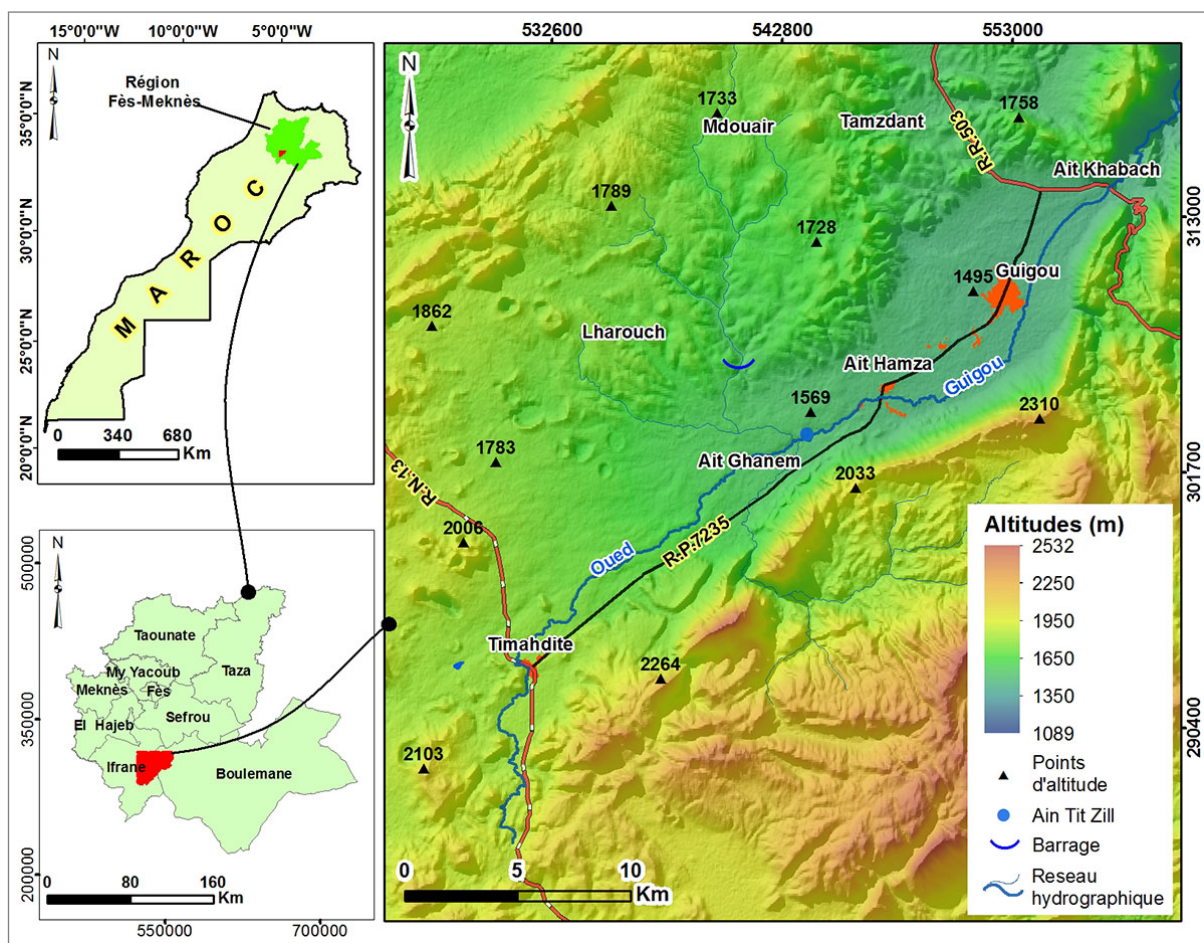


FIGURE 6.1. Situation géographique et administrative de la dépression de Guigou

2. Classes d'occupation des sols dans la dépression de Guigou

Les classes d'occupation des sols dans la dépression de Guigou se caractérisent par la diversité. Les grandes classes d'occupation des sols dans la dépression de Guigou identifiées lors de l'inventaire sur le terrain sont :

» **Cultures irriguées** : se caractérisent par la variété et une dominance remarquable des cultures maraîchères (pomme de terre, oignon, carotte ...), en outre les cultures fourragères irriguées (luzerne) occupent une superficie très limitée.

» **Cultures pluviales** : ce type de cultures est dominé par les cultures fourragères notamment l'orge et l'avoine.

» **Forêts** : les forêts occupent les hauts sommets. Globalement, elles se situent hors zone de la dépression et se composent de différentes essences d'arbres de pins et de chêne vert avec une dominance remarquable du chêne vert.

» **Terrains calcaires et terrains basaltiques** : englobent toutes les terres non occupées par les cultures pluviales et les cultures irriguées (terrains de pâturages). La majorité de ces zones sont situées sur les marges de la dépression et à proximité des zones forestières.

» **Habitats** : dans la dépression de Guigou, on peut distinguer entre les habitats groupés (centre urbain de Guigou, centre de Timahdite) et habitats dispersés (zones rurales).

3. Répartition des parcelles agricoles dans la dépression de Guigou

La spatialisation des parcelles agricoles dans la dépression de Guigou (fig. 6.3) indique qu'elles se localisent essentiellement à proximité des anciens douars et des centres (Ait Khabach, Guigou, Ait Hamza, Ait Ghanem). Ainsi la classification des parcelles agricoles en fonction de la superficie (fig. 6.2) montre une prédominance notable des parcelles de petites tailles.

» Les petites parcelles [< 1 et entre 1 et 2 ha] représentent une grande superficie dans la dépression de Guigou avec un pourcentage de plus de 60 %. Cela reflète un fort morcellement des terres agricoles.

» Les parcelles moyennes [entre 2 et 4 ha] forment d'environ 22 % de la superficie totale de la dépression de Guigou.

» Les parcelles supérieures à [> 4 ha] sont faibles et couvrent à peine 11 % de la superficie totale. Les parcelles de grandes superficies sont des parcelles récemment aménagées par les agriculteurs et se situent généralement sur les marges des anciennes parcelles.

L'analyse des figures 6.2 et 6.3 nous a permis de comprendre la répartition des parcelles agricoles dans la dépression de Guigou. En effet, on peut distinguer deux types de parcelles ; les parcelles réservées aux cultures pluviales et les parcelles réservées aux cultures irriguées. La superficie de chaque type de culture en fonction des parcelles est présentée ci-après. La multiplication des parcelles, notamment celles qui sont orientées vers les cultures irriguées, a favorisé la classification de la dépression de Guigou parmi les plus importants périmètres irrigués du Moyen Atlas tabulaire.

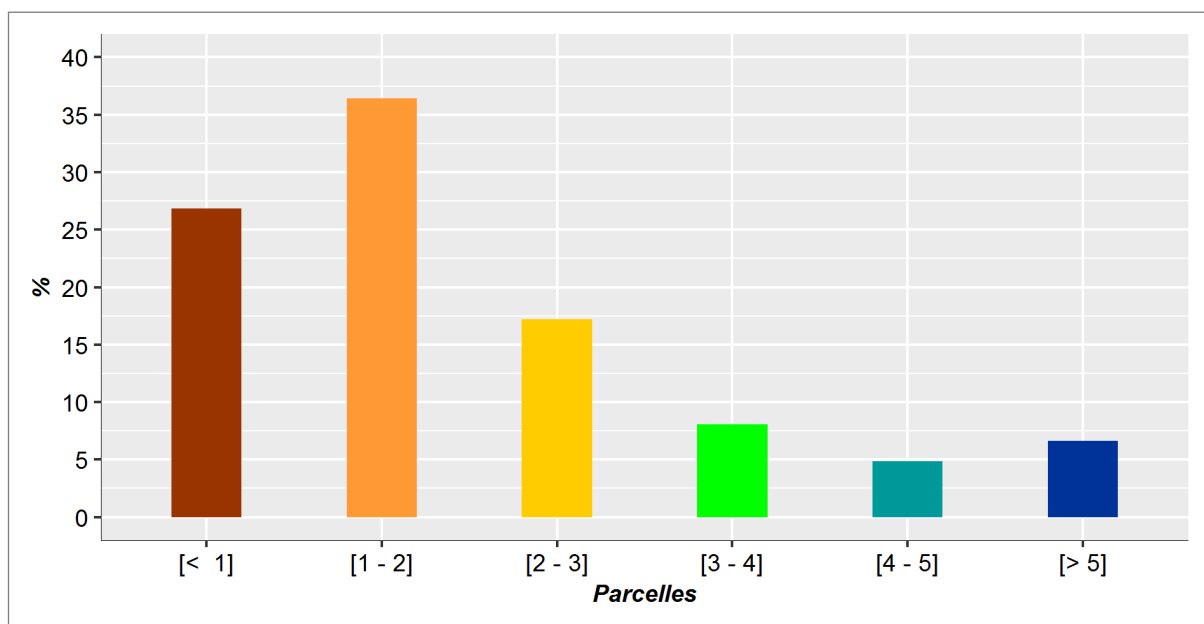


FIGURE 6.2. Répartition des parcelles agricoles en fonction de la superficie en % dans la dépression de Guigou

4. Évolution d'occupation des sols dans la dépression de Guigou entre 1972 et 2018

Avant 1980, l'activité économique dans la dépression de Guigou a été largement basée sur l'élevage transhumant. Quelques populations regroupées en petits noyaux de sédentarisation occupent la dépression en pratiquant une production céréalière (maïs, orge, blé) sous irrigation

extensive à partir d'un réseau traditionnel dérivé de l'oued Guigou ou de ses sources (Jennan, 1986 ; Loubignac, 1938). Après cette période, plusieurs facteurs internes et externes ont orienté les activités des populations de façon générale vers une pluriactivité agricole (prédominance de la céréaliculture extensive). En parallèle, une réadaptation des systèmes d'irrigation s'instaure avec le creusement des puits et l'installation de motopompes permettant le prélèvement des eaux souterraines (Devos et al., 2000). C'est le point de départ de l'extension et l'intensification de l'irrigation.

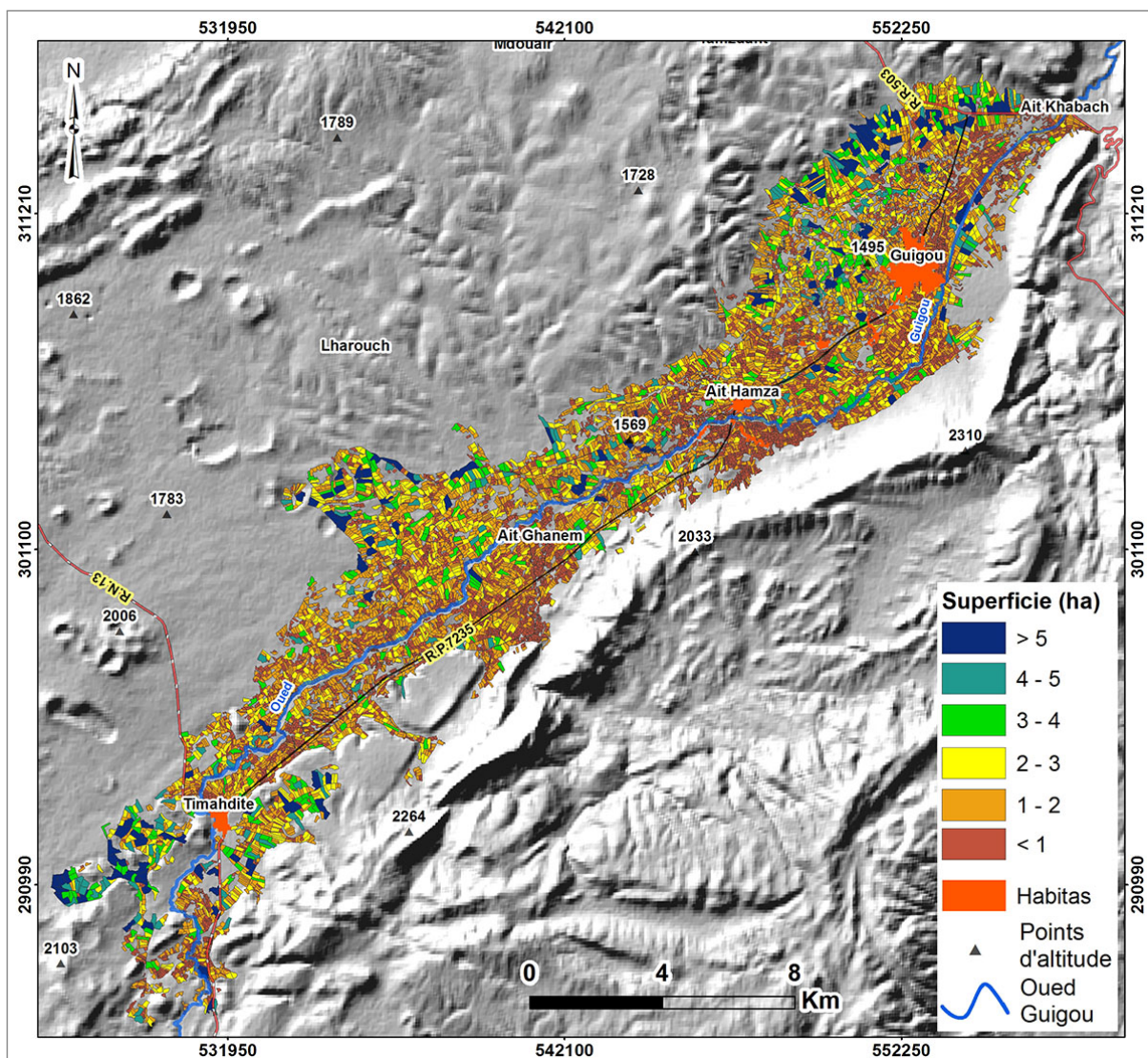


FIGURE 6.3. Répartition des parcelles agricoles dans la dépression de Guigou

Actuellement, la dépression de Guigou se caractérise par une dynamique remarquable d'occupation des sols. Elle est essentiellement marquée par l'extension des cultures maraîchères irriguées (pomme de terre, oignon, carotte ...) sur les terres des pâturages et les terres de cultures pluviales. La comparaison entre la situation d'occupation des sols en 1972 et 2018

(figs. 6.4 à 6.8) montre que la dépression de Guigou a connu une extension significative des terres irriguées.

Dans la dépression de Guigou deux grandes phases d'évolution ont été distinguées. La première phase se caractérise par la prédominance des activités basées sur le pâturage (élevage transhumant) et la concentration d'une superficie très limitée des cultures irriguées le long de l'oued Guigou (Loubignac, 1938). L'irrigation a été basée sur l'utilisation des techniques traditionnelles à partir d'un réseau de seguias. La deuxième phase est marquée par l'augmentation du nombre de puits sur l'ensemble de la dépression et l'introduction des motopompes. Cela a conduit à une extension importante des surfaces irriguées au détriment des terres de pâturages et des cultures pluviales. En parallèle avec l'augmentation rapide des surfaces irriguées, les techniques d'acheminement et d'exploitation des eaux souterraines ont enregistré une évolution remarquable. Les modifications exercées sur les pratiques agricoles dans cette dépression participent à la régression continue des activités traditionnelles et à l'accélération de la pression sur les eaux souterraines.

4.1. Concentration des surfaces irriguées le long de l'oued Guigou

Jusqu'aux années 1960, la plaine de Guigou a été dominée par la céréaliculture (maïs, orge, blé) extensive qui complète l'activité pastorale. La superficie irriguée à partir d'un réseau des Séguias traditionnel des séguias dérivant de l'oued Guigou et ses sources a été très limitée (Jennan, 1986 ; Loubignac, 1938). Après cette période les populations sont passées d'une société des transhumants (nomadisme, semi-nomadisme) à une société fixée autour des terres de pâturages et des ressources en eau. Cette fixation a permis l'apparition des premiers noyaux de sédentarisation ce qui favorise l'augmentation de la superficie des cultures irriguées.

L'observation de la carte (fig. 6.4) de la situation d'occupation des sols en 1972 montre les traces des cultures irriguées le long de l'oued Guigou et ses sources ainsi qu'une concentration importante à proximité des anciens noyaux de sédentarisation au niveau du centre de Guigou, d'Ait Hamza et Ait Ghanem.

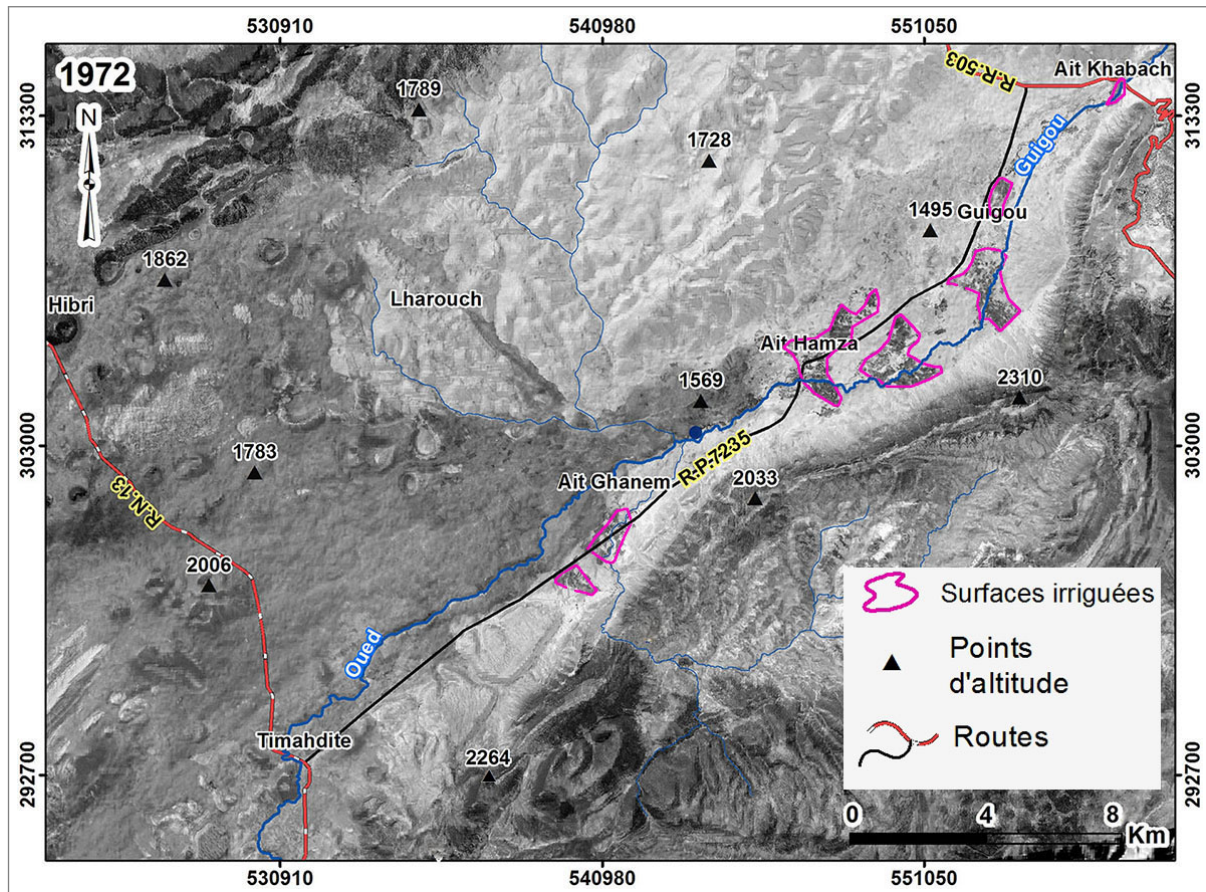


FIGURE 6.4. Occupation des sols dans la dépression de Guigou 1972

[Image satellite Corona]

Durant la période entre 1972 et 1985 la dépression de Guigou a connu une faible augmentation des surfaces irriguées (fig. 6.5) avec une extension importante des cultures pluviales sur l'ensemble de dépression. Après cette période, la dépression a enregistré une dynamique socio-spatiale importante. Cette dynamique est liée au creusement des puits et l'introduction de motopompes pour le prélèvement des eaux souterraines. L'essor de l'irrigation dans la dépression de Guigou s'est accéléré avec la sécheresse qui a affecté le Maroc durant les années 80 et 90. La succession des années sèches perturbe les systèmes de production basés sur les précipitations (cultures pluviales) et provoque la diminution de rendement des terres, la dégradation des pâturages et le tarissement des sources.

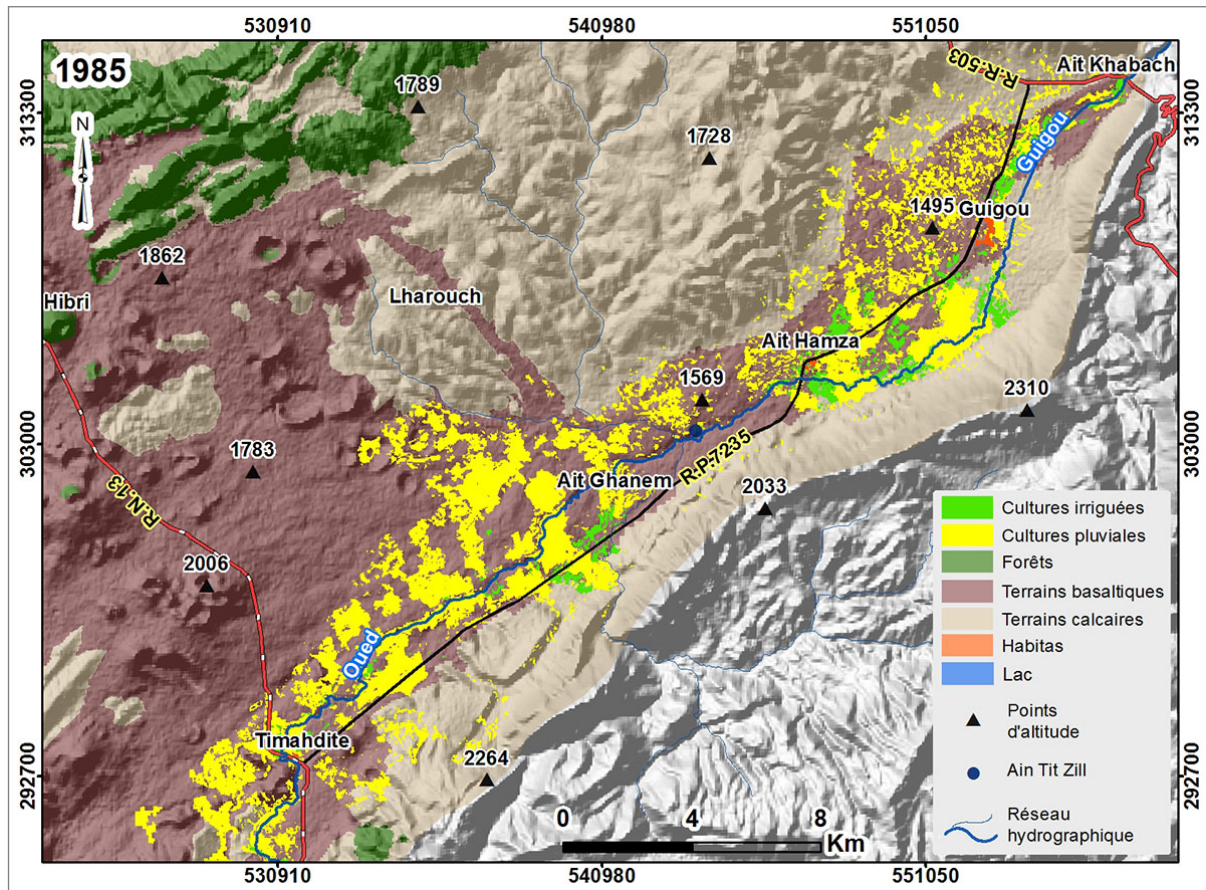


FIGURE 6.5. Occupation des sols dans la dépression de Guigou 1985

[image satellite Landsat TM, 17 mai et 14 août 1985]

4.2. Vers l’explosion des surfaces irriguées dans la dépression de Guigou

4.2.1. Extension des cultures irriguées sur les fonds de la dépression

Après plusieurs années de souffrances des populations dans un milieu montagnard marginal où les conditions de vie sont très difficiles, « *l’espoir d’un développement local est apparu grâce à de multiples initiatives et à une nouvelle appréciation des potentialités de la région par les acteurs locaux* » (Tag, 1996). Durant cette période, le Moyen Atlas en général a connu des interventions étatiques ayant pour objectifs l’amélioration de niveau de vie et la fixation des populations par l’aménagement des moyens hydrauliques.

D’après les entretiens réalisés auprès des populations durant la période de travail de terrain, le début d’intervention de l’État dans la dépression de Guigou a été commencé à partir de 2008 dans le cadre de PMV. Aussi les statistiques officielles (tableau 6.1) indiquent une intensification notable des dossiers subventionnés par l’État. La subvention de l’État dans le cadre du plan du Maroc vert (PMV) concerne l’aménagement et le creusement des puits, la mise en

place du goutte-à-goutte et la construction des canaux d'irrigation. À cela s'ajoute un nombre important d'investisseurs (d'origines ; Er-Rachidia, Doukala, Missour, ...) qui se sont précipités pour exploiter la richesse de la zone. La combinaison de ces facteurs a favorisé l'extension des terres irriguées au détriment des terres de pâturages (terrains calcaires et terrains basaltiques) et de cultures pluviales.

Année	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	Total
Dossiers subventionné	394	376	244	179	164	328	370	258	265	2578

TABLEAU 6.1. Dossiers de subvention accordée par l'État dans la dépression de Guigou entre 2008 et 2016

[MAPMDREF. 2017]

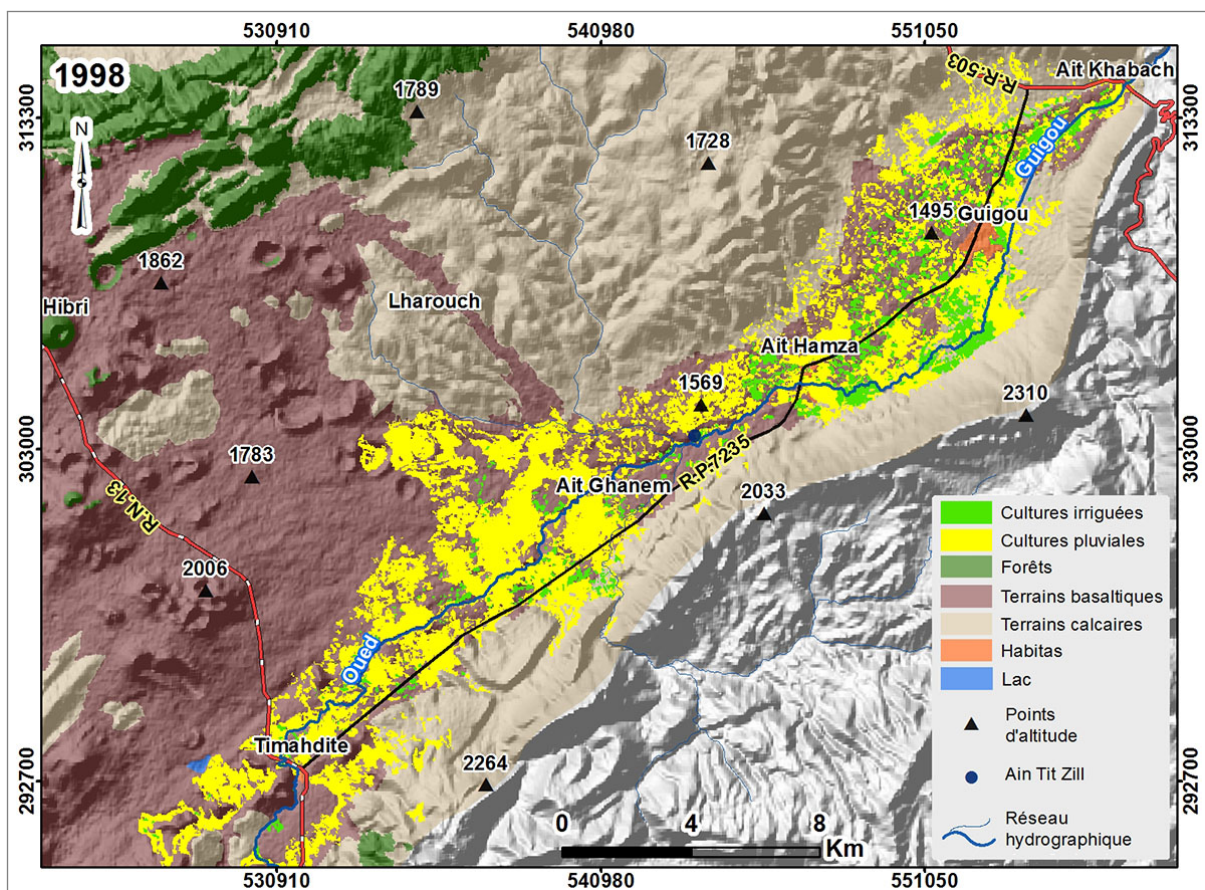


FIGURE 6.6. Occupation des sols dans la dépression de Guigou 1998

[image satellite Landsat TM, 12 avril et 2 août 1998]

La lecture des cartes (figs. 6.6 et 6.7) permet de mettre en lumière l'extension des cultures irri-

guées (pomme de terre, oignon, carotte ...) dans la dépression de Guigou. Ces changements au niveau des pratiques agricoles favorisent la régression des pratiques traditionnelles d'occupation et d'utilisation des terres. En parallèle avec ces modifications, les centres urbains (Guigou et Timahdite) enregistrent une extension marquée.

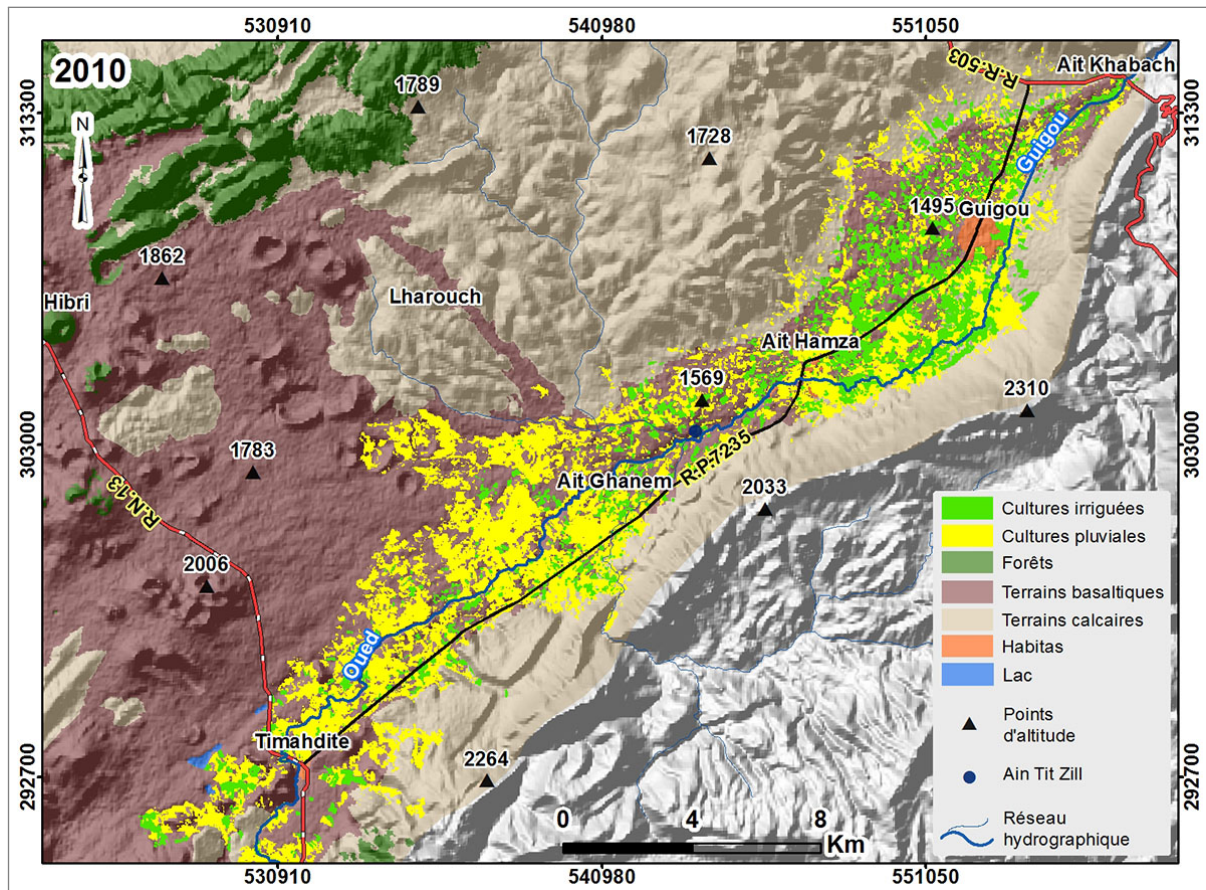


FIGURE 6.7. image satellite Landsat TM, 15 mai et 3 août 2010

[Image satellite Landsat TM]

4.2.2. L'extension de l'irrigation dans toutes les directions de la dépression

La comparaison entre les cartes d'occupation des sols montre un déploiement progressif des terres dédiées aux cultures irriguées (figs. 6.4 à 6.8). La carte d'occupation des sols (fig. 6.8) met en évidence une forte concentration de surfaces irriguées à proximité du centre urbain de Guigou, entre Ait Hamza et Ait Ghanem et Timahdite et le long de l'oued Guigou. Les modifications spatio-temporelles de l'occupation des sols sur cette période s'observent clairement dans la dépression de Guigou. L'extension progressive des cultures irriguées dans la dépression de Guigou est liée à l'apparition des facteurs catalyseurs du développement. Il s'agit de la combinaison des facteurs naturels (la tendance du climat vers la sécheresse, l'abondance des

ressources en eau souterraines) et anthropiques (l'aménagement des terrains basaltiques, le creusement d'un nombre considérable des puits et la réalisation du barrage Sehb El Marga).

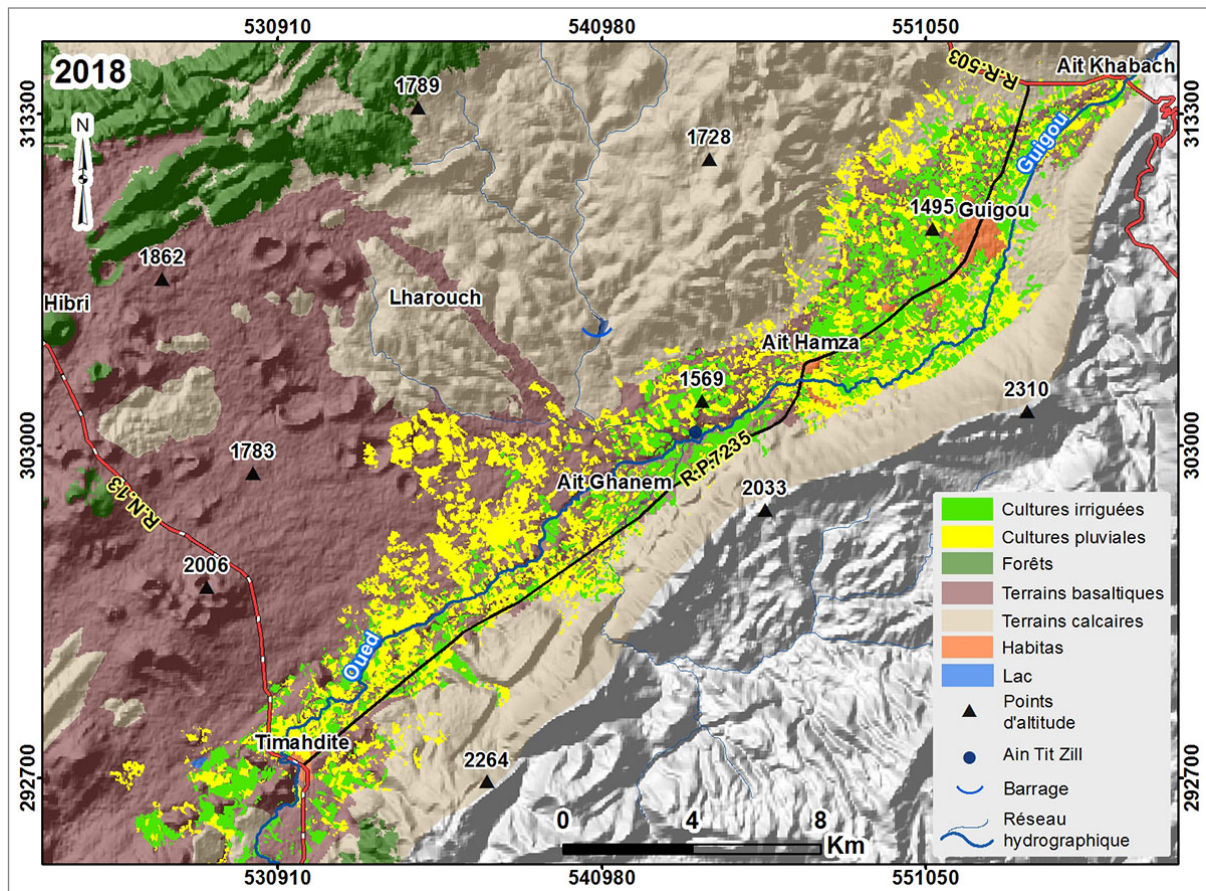


FIGURE 6.8. Occupation des sols dans la dépression de Guigou 2018

[image satellite Landsat OLI, 19 avril et 9 août 2018]

4.3. La dynamique des cultures maraîchères irriguées dans la dépression de Guigou

L'interprétation de la figure 6.9 et le tableau 6.2 montrent qu'entre 1985 et 2018, la superficie des terres cultivées (pluviales et irriguées) a augmenté de façon significative. Les cultures irriguées passent de 699.03 ha (moins de 1 % des superficies) en 1985 à 3987.34 ha (5,21 % des superficies) en 2018 soit une augmentation de plus de 3 288 ha. Les cultures pluviales avec 6544 ha en 1985 (8,55 %) connaissent une légère diminution de leur couverture spatiale avec 5635,46 ha (7,36 %) en 2018. Les terrains basaltiques et calcaires s'étendent de façon dominante sur le secteur d'étude. Mais ces surfaces sont en constante diminution sur la période étudiée. Les terrains basaltiques passent de 26749.02 ha en 1985 à 25022.73 ha en 1998, 24926.21 ha en 2010 et 24505.97 en 2018 soit une perte de 2 243,05 ha entre 1985 et 2018. Une régression de

977,26 ha est enregistrée pour les terrains calcaires sur cette même période. De façon générale, l'évolution à la baisse de certaines surfaces, cultures pluviales, terrains basaltiques et calcaires, entre 1985 et 2018, se traduit par une augmentation de celles des cultures irriguées.

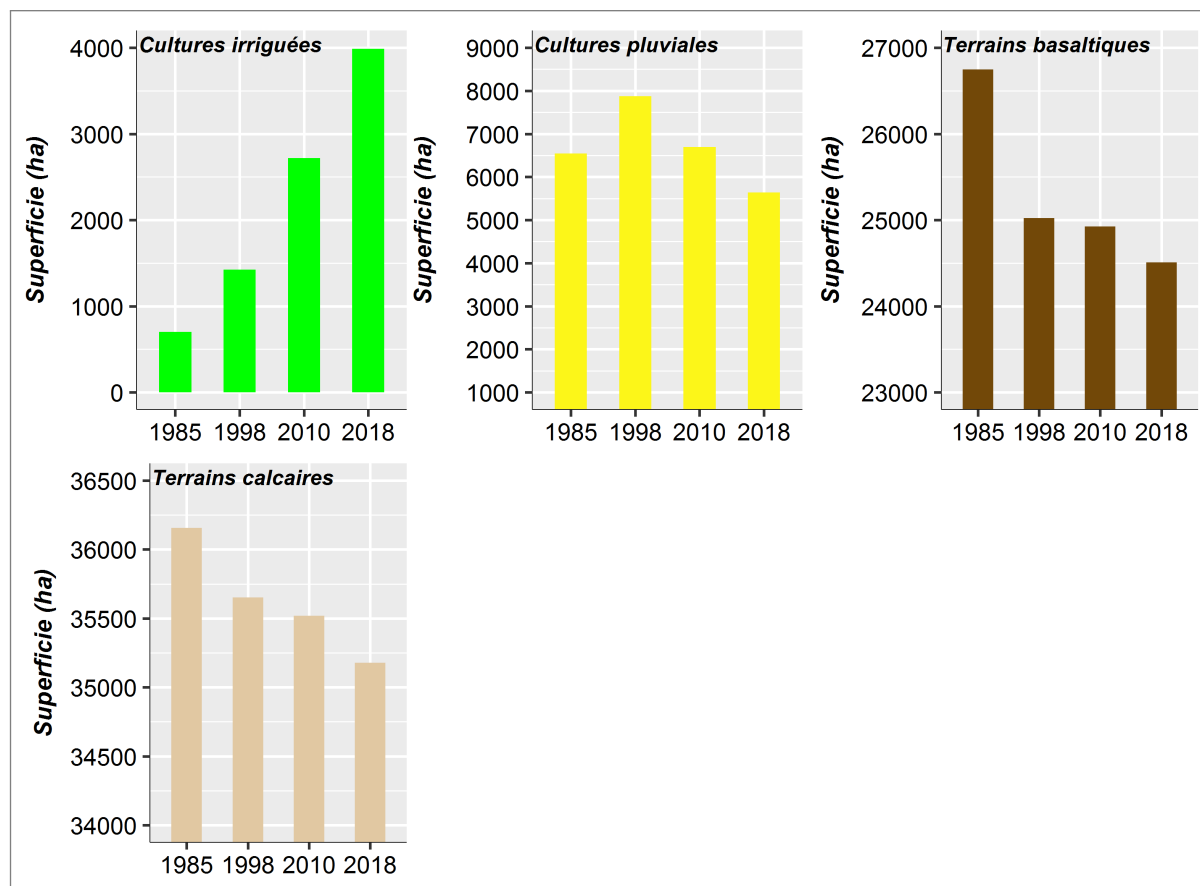


FIGURE 6.9. Évolution de la superficie (ha) d'occupation du sol dans la dépression de Guigou entre 1985 et 2018

Classes	1985 - 1998	1998 - 2010	2010 - 2018	1985 - 2018
Cultures irriguées	726	1293	1270	3288
Cultures pluviales	1328	-1181	-1055	-909
Forêts	55	47	423	525
Terrains basaltiques	-1726	-97	-420	-2243
Terrains calcaires	-503	-133	-341	-977

TABLEAU 6.2. Evolution de d'occupation du sol entre 1985 et 2018 par période

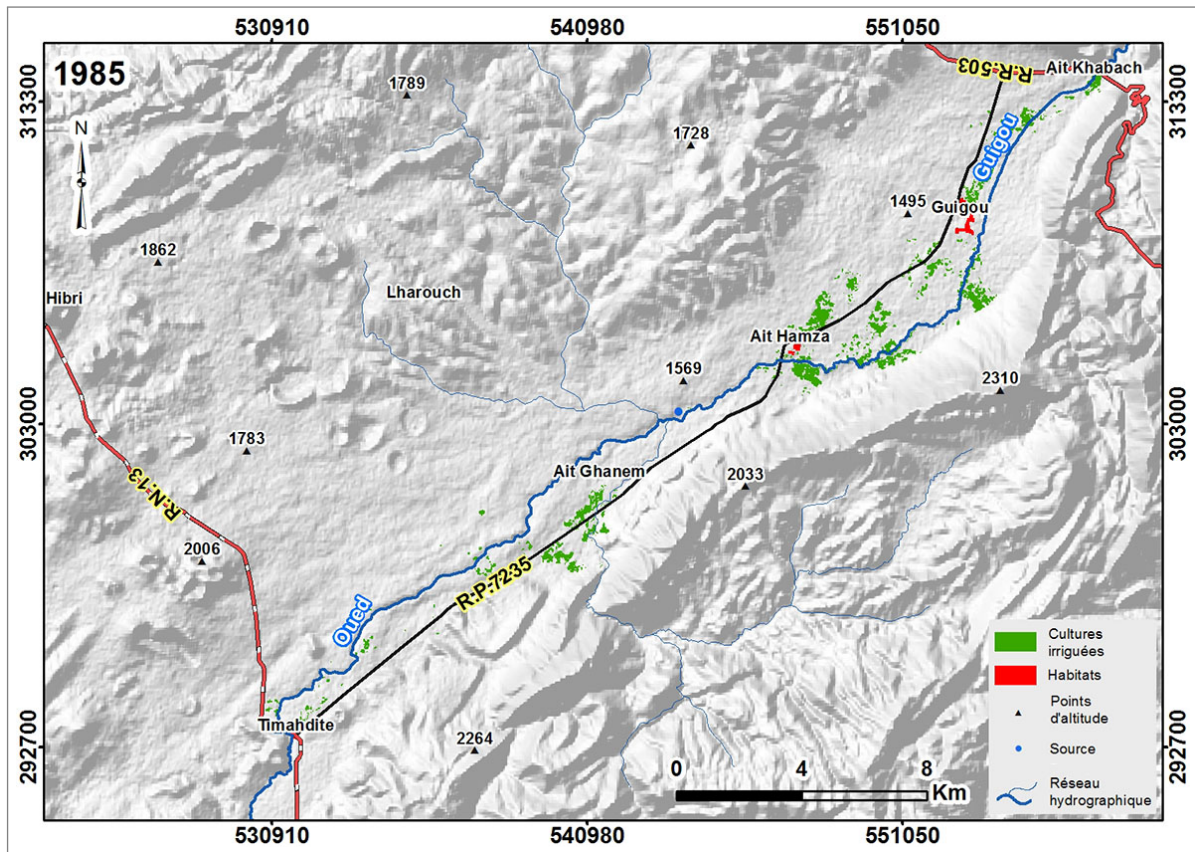


FIGURE 6.10. Les surfaces irriguées dans la dépression de Guigou en 1985

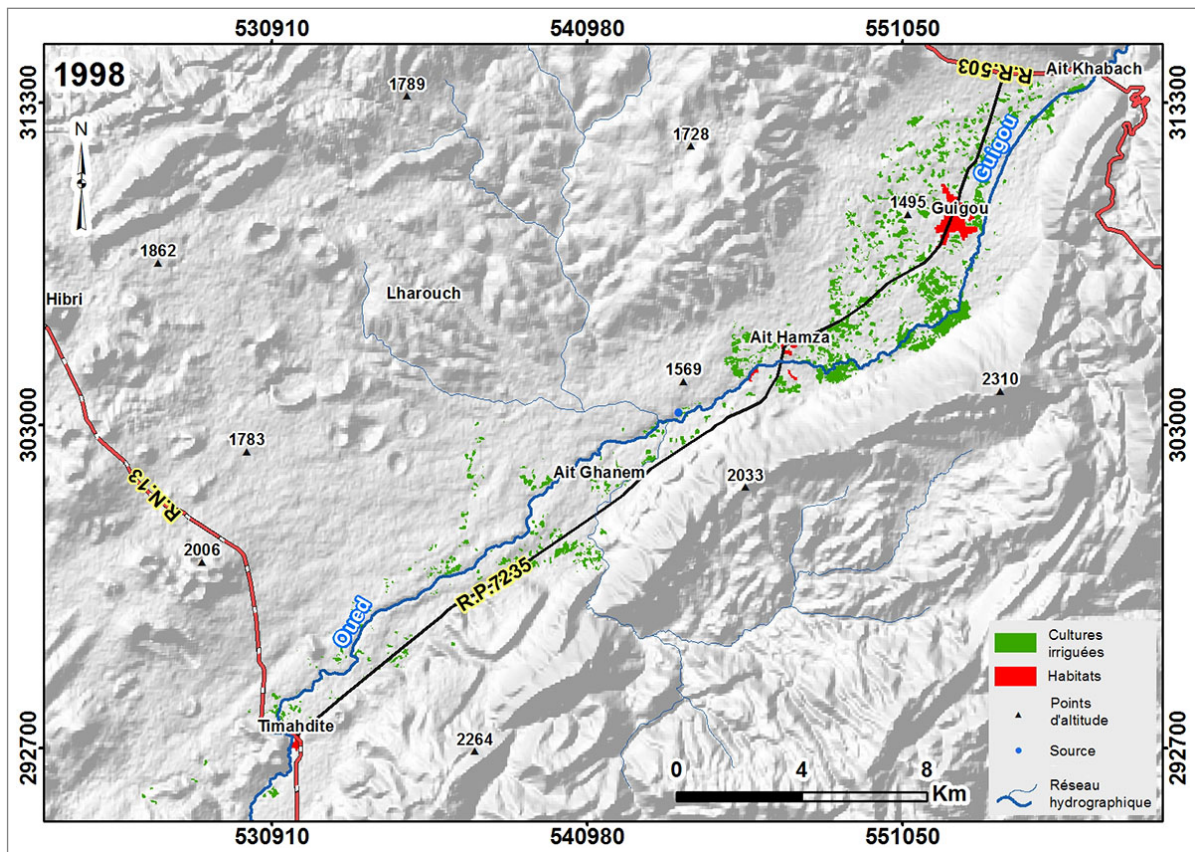


FIGURE 6.11. Les surfaces irriguées dans la dépression de Guigou en 1998

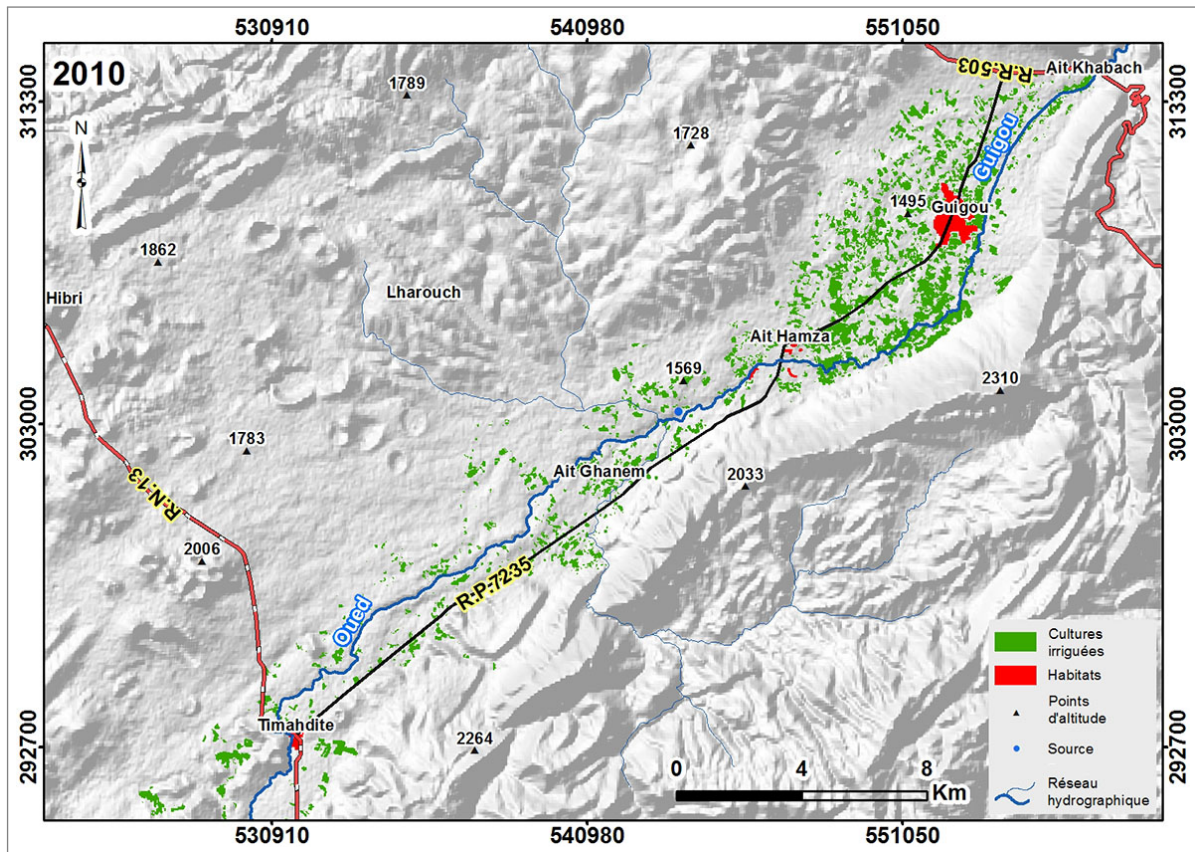


FIGURE 6.12. Les surfaces irriguées dans la dépression de Guigou en 2010

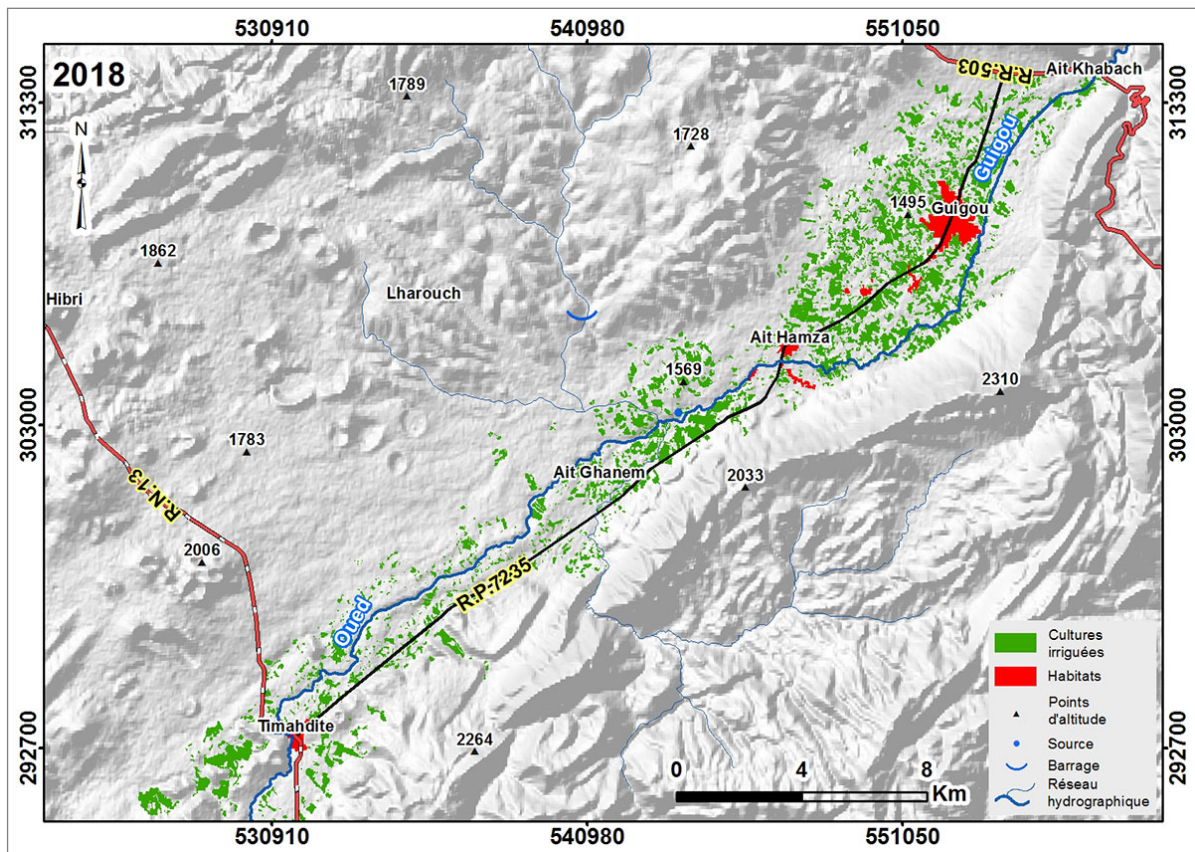


FIGURE 6.13. Les surfaces irriguées dans la dépression de Guigou en 2018

Les cartes (figs. 6.10 à 6.13) illustrent l'évolution des cultures irriguées dans la dépression de Guigou. La quantification de cette dynamique (tableau 6.2) permet de montrer l'évolution positive des cultures irriguées par plus de 3200 ha en 33 ans (environ 100 ha/an). Par contre, les cultures pluviales (-908 ha) et les terres de pâturages (terrains calcaires et terrains basaltiques) ont connu (-3240 ha) une régression continue. Ces différents aspects d'évolution des surfaces irriguées reflètent l'orientation vers des pratiques agricoles modernes d'occupation des sols ce qui participe à la régression de la société et des pratiques traditionnelles. L'extension des surfaces agricoles sur l'ensemble de la dépression provoque une pression très forte sur les nappes souterraines et par voie de conséquence l'amplification du déficit hydrologique et l'apparition des transformations importantes au niveau du système hydro-agricole.

Conclusion

L'étude diachronique d'occupation des sols entre 1985 et 2018 met en évidence l'évolution spatiotemporelle des surfaces agricoles dans la dépression de Guigou. Cette dynamique est liée à l'interaction de plusieurs facteurs naturels (la succession des années sèches, la disponibilité des ressources en eau souterraine) et anthropiques (la volonté de mieux rentabiliser les richesses de la région, l'intervention de l'État, l'augmentation de nombres des investisseurs et l'amélioration des techniques d'exploitation des eaux et d'irrigation).

La cartographie et la quantification des grandes transformations dans la dépression de Guigou montrent la forte dynamique des cultures irriguées (entre 1985 et 2018) au détriment des cultures pluviales et terrains de pâturages (terrains basaltiques et terrains calcaires). Cette dynamique a permis le façonnement d'un paysage agraire basé sur les cultures maraîchères irriguées (pomme de terre, oignon, carotte). Ce nouveau mode d'exploitation des terres remplace le système d'agriculture traditionnelle qui se base sur les précipitations.

En trois décennies d'évolution, le périmètre irrigué de Guigou passe de 699 ha à 3987 ha avec une augmentation de plus de 3200 ha. Il est indéniable que ces grandes transformations vont influencer les ressources en eau souterraines.

CHAPITRE 7

Chapitre 7 : La dynamique des cultures mixtes dans les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer

Introduction

Dans les deux chapitres précédents, nous avons montré la dynamique remarquable d’occupation des sols dans les dépressions d’Imouzzet et de dayet Aoua et dans la dépression de Guigou. Les premiers se caractérisent par une forte extension des vergers de rosacées et le deuxième se distingue par l’augmentation de la superficie des cultures maraîchères irriguées. Ce chapitre vise la spatialisation et la cartographie d’occupation des sols dans les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer afin de montrer la dynamique mixte des cultures irriguées (maraîchères et des vergers de rosacées) et des cultures pluviales. La cartographie et la quantification des grandes classes d’occupation des sols (cultures irriguées, cultures pluviales, forêts et terrains de pâturages) dans cette zone se basent sur la réalisation d’une étude diachronique de 1985 à 2018.

1. Les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer

Les dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer dépendent administrativement de la collectivité de Laanoucer (fig. 7.1). Elles se présentent sous la forme de dépressions composées de plusieurs unités plus ou moins fermées, résultat de l’activité tectonique et du processus de dissolution. Ainsi, la zone est caractérisée par la dominance des formations lithologiques perméables à fort coefficient d’emménagement (calcaires du Lias) et une pluviométrie relativement abondante. Durant la période 1915-2015 la station de Sefrou qui se situe à proximité des dépressions d’Afourgagh et de Laanoucer sur une altitude de 930m a enregistré en moyenne 585 mm de précipitations. Ces conditions favorisent la richesse en ressources en eau souterraines.

L'abondance des ressources en eau souterraines a contribué à l'installation des populations, et ce depuis des millénaires comme l'attestent les différents vestiges archéologiques et historiques aux niveaux local et régional. Actuellement, l'augmentation du nombre des populations et l'introduction des pratiques modernes d'utilisation des terres et des ressources en eau engendrent une dynamique rurale remarquable. L'extension des périmètres irrigués et la pratique de cultures destinées à la commercialisation (pommes de terre, pommes, poires, cerises) en sont les indicateurs.

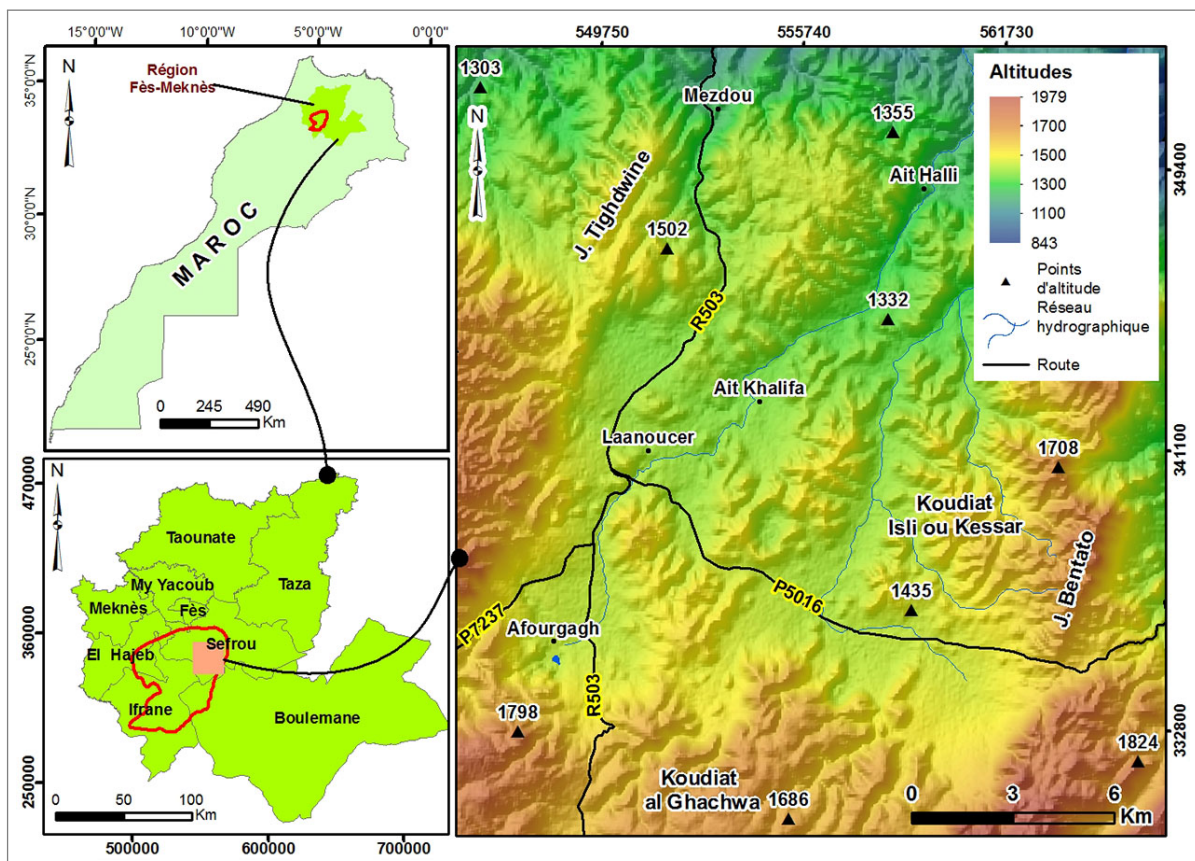


FIGURE 7.1. Situation géographique des dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer

Dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer, la disponibilité des ressources en eau (sources, lacs, nappes souterraines...) et la fertilité des sols dans les dépressions tectono-karstiques ont permis la mise en place de plusieurs périmètres irrigués d'étendues variables. Ainsi l'agropastoralisme basé sur la culture des céréales (blé, orge...) et pratiqué en bour a cédé la place à des exploitations modernes irriguées d'arboriculture et de maraîchage. On note donc que l'agriculture saisonnière de subsistance basée sur les céréales a évolué vers une agriculture intensive avec le recours à l'irrigation (Amyay et al., 2000).

2. Classes d'occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer

Les classes d'occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer ont été déterminées à partir du travail de terrain et l'interprétation des images satellites :

» **Cultures irriguées** : cette classe regroupe les cultures irriguées maraîchères irriguées (pomme de terre, oignon ...) et les vergers de rosacées (pommier, cerisier ...).

» **Cultures pluviales** : ce type de cultures s'étale sur une superficie importante dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer. Les principales cultures pluviales dans ces dépressions sont l'orge et le blé.

» **Forêts** : se situent hors la zone de dépression. Globalement les forêts dans cette zone se composent de différentes essences d'arbres de pins, chêne vert, etc. avec une dominance remarquable du chêne vert.

» **Terrains calcaires / de pâturages** : englobent toutes les terres non occupées par les cultures pluviales et les cultures irriguées (terrains de pâturages ...). La majorité de ces zones sont situées sur les marges de la dépression et à proximité des zones forestières.

3. Répartition des parcelles agricoles dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer

La carte (fig. 7.2) montre la spatialisation et la structure des parcelles dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer, en effet, elle permet de mettre en lumière la variation des structures des parcelles d'une zone à l'autre.

Généralement les anciennes parcelles qui se caractérisent par une superficie très limitée (< 1 ha) se situent principalement au niveau de Ait Khalifa et de Laanoucer, par contre les parcelles récentes à grande superficie se localisent le long des routes régionales 503 et provinciale 5016 et aux alentours du lac d'Afourgagh. La répartition des classes en fonction de la superficie (fig. 7.3) montre que :

» Les parcelles à superficie limitée [< 1 et entre 1 et 2 ha] occupent environ 40 % de la superficie totale des dépressions.

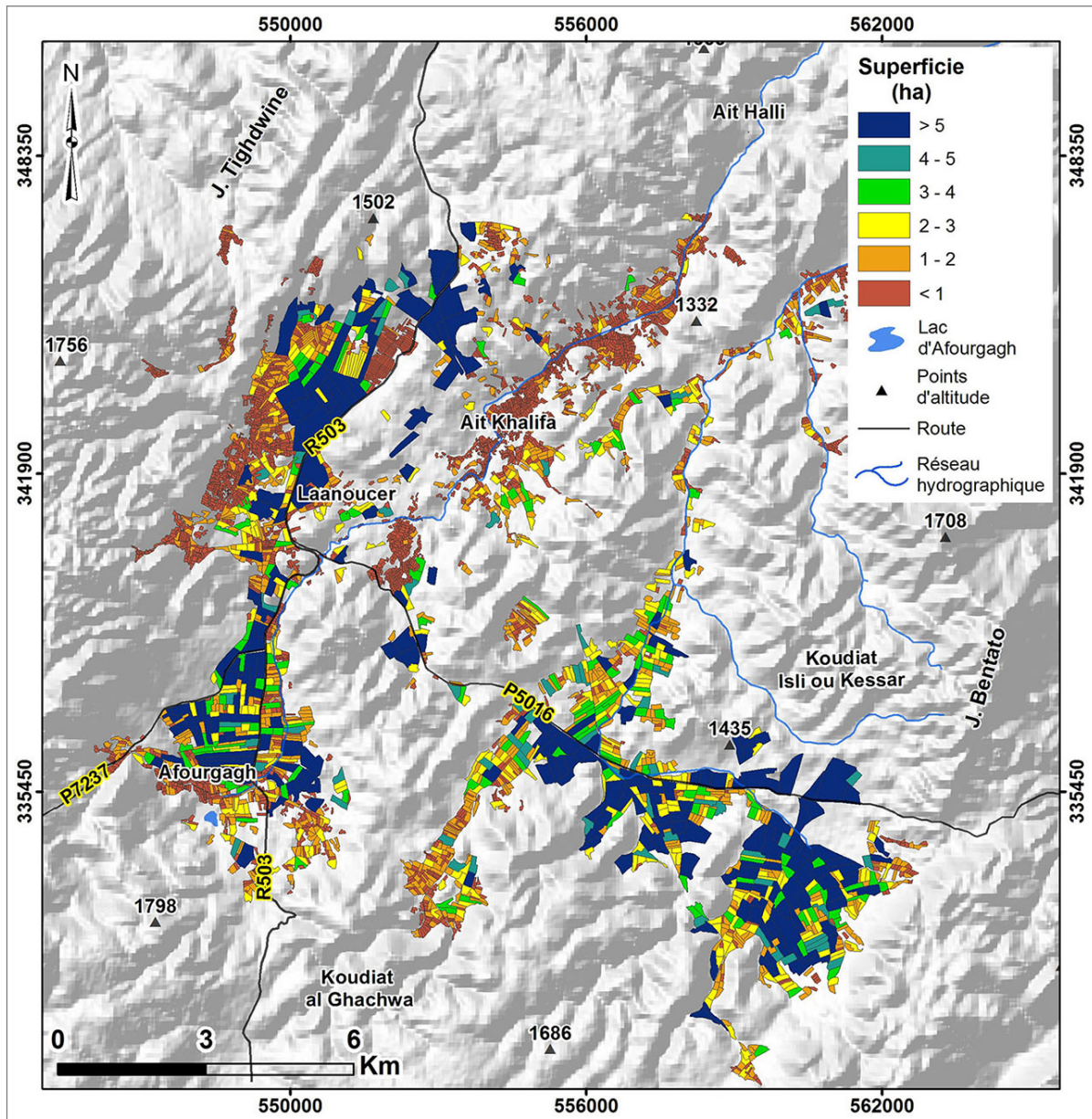


FIGURE 7.2. Répartition des parcelles agricoles en fonction de la superficie en % dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer

» Les parcelles moyennes [entre 2 et 4 ha] représentent environ 21 % de la superficie des dépressions.

» Les grandes parcelles supérieures à [> 4 ha] forment une superficie très importante d'environ 42 % de la surface totale des dépressions. Les grandes parcelles sont récemment aménagées par les agriculteurs et destinées principalement aux cultures irriguées.

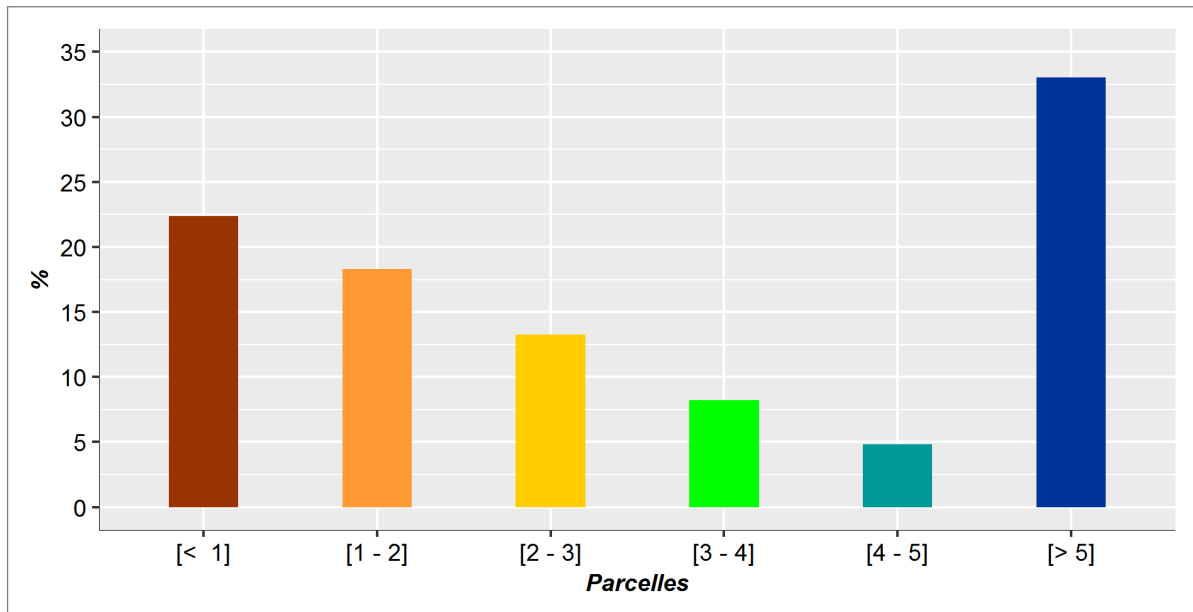


FIGURE 7.3. Répartition des parcelles agricoles en fonction de la superficie en % dans la dépression d'Afourgagh

D'après l'interprétation des figures 7.2 et 7.3 et la figure 7.9, on peut distinguer entre les anciennes parcelles qui se caractérisent par une superficie très limitée et les parcelles récentes de grandes superficies. Ces dernières sont destinées aux cultures irriguées.

4. Évolution d'occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer entre 1972 et 2018

Les études menées sur le Moyen Atlas montrent qu'il a été une terre de pâturages où les populations pratiquaient une double transhumance : celle d'hiver dans la plaine et d'été dans la montagne (Jennan, 1996). Sous l'effet de plusieurs facteurs naturels et anthropiques, les populations ont constitué les premiers noyaux de sédentarisation dans les dépressions intramontagnardes autour des sources. A l'instar de d'autres secteurs du Moyen Atlas tabulaire (dépression de Guigou, dépressions d'Imouzzet et de dayet Aoua), les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer (pays d'Amekla) ont subi de transformations très importantes.

Les cartes (figs. 7.4 à 7.9) indiquent que cette zone a connu des changements importants au niveau d'occupation des sols. Les grands aspects de ces changements résident dans la régression de la société pastorale et l'extension des terres agricoles (terres des cultures pluviales et terres des cultures irriguées).

D'après l'interprétation des cartes d'occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer, nous avons distingué trois phases d'évolution : la première phase se caractérise par une faible extension des cultures sur l'ensemble de la dépression, la deuxième phase enregistre une extension remarquable des cultures pluviales et la troisième se distingue par une intensification des cultures irriguées à proximité des ressources en eau et des axes routiers.

Dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer, l'abondance des ressources en eau souterraines contribue à l'essor d'une agriculture qui se base sur l'irrigation intensive (rosacée et maraîchère) souvent au détriment des terrains de pâturages et terres des cultures pluviales. Le développement des pratiques modernes d'irrigation provoque une pression très forte sur les ressources en eau.

4.1. Phase de faible extension de l'agriculture dans les dépressions

« Sur les photographies aériennes de l'année 1962, la dépression d'Afourgagh comprend des terrains non cultivés, sans trace d'activité agricole permanente ni découpage spatial quelconque et sans habitat construit en dur » (Amyay et al., 2000). L'interprétation des images CORONA (fig. 7.4) montre que jusqu'à 1972, les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer ne connaissent pas de grands changements au niveau d'occupation des sols. Cette phase de non exploitation agricole de ce secteur se poursuit jusque dans les années 1980.

Jusqu'à 1985, la cartographie d'occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer (fig. 7.5) illustre une très faible extension de surfaces agricoles (irriguées et pluviales) à l'exception de quelques îlots réparties autour des douars, sur les axes routiers et à proximité des sources. Cette première phase est caractérisée par la dominance des activités traditionnelles basées essentiellement sur l'élevage transhumant.

4.2. Le remplacement des terres de pâturages par les cultures pluviales

Comme le reste du territoire marocain, les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer ont été affectées par la sécheresse sévère des années 80 ce qui provoque la dégradation des terres de pâturages et participe à la régression des mouvements des transhumants entre la plaine en hiver et la montagne en été. Cela a participé largement à la fixation des populations autour

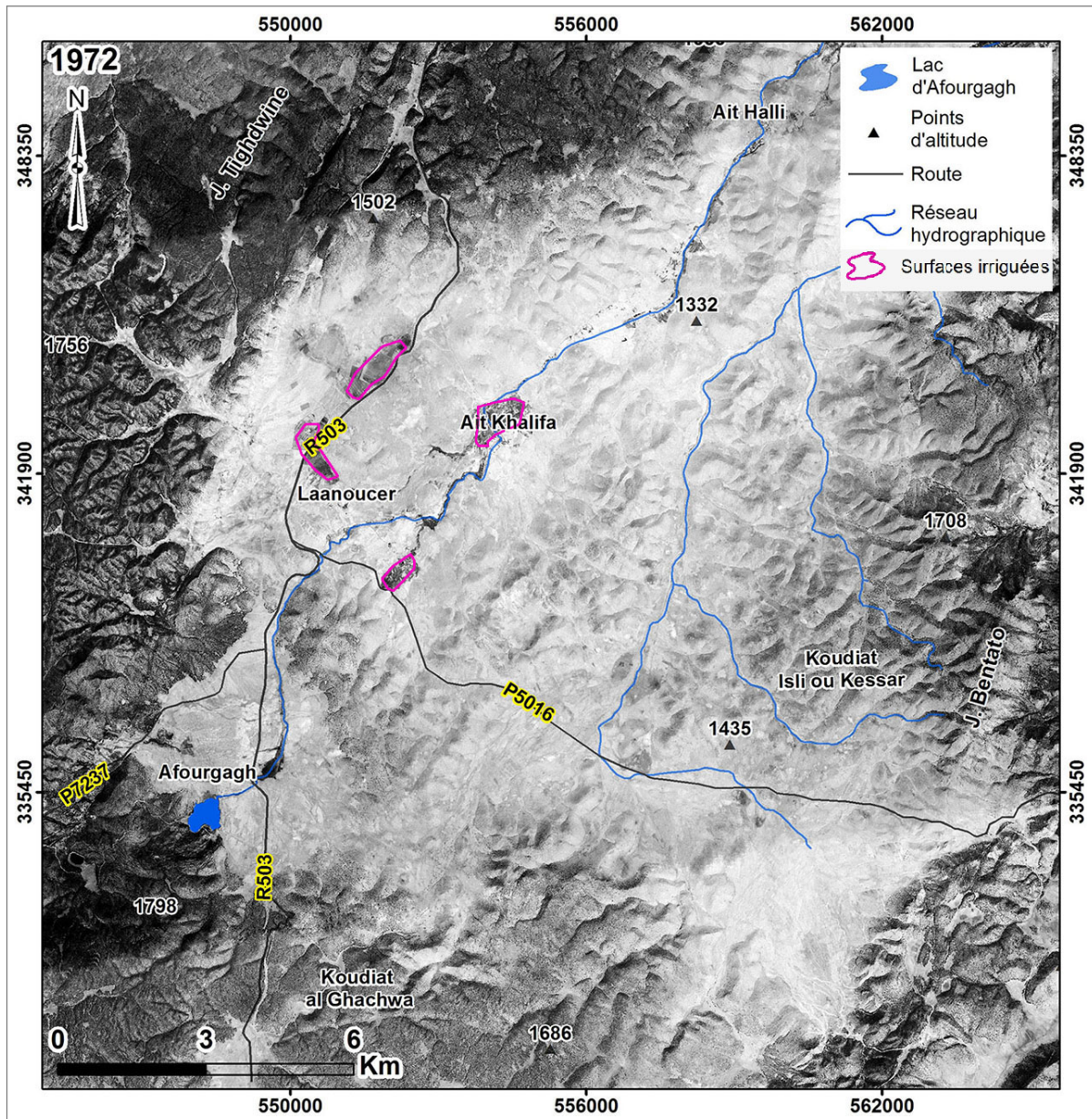


FIGURE 7.4. Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 1972

[Image satellite Corona]

des ressources en eau (lacs et sources). La concentration et l'augmentation de la population génèrent une extension importante des cultures pluviales sur l'ensemble des dépressions, et l'apparition de surfaces irriguées au niveau des points d'eau (lacs et nappes souterraines).

L'observation de la carte (fig. 7.6) permet d'indiquer l'extension des cultures dans les différentes zones des dépressions après une longue période de sécheresse. En effet, cette extension est notable vers le sud-ouest et le long de la route provinciale N°5016 et à proximité du lac Afourgagh.

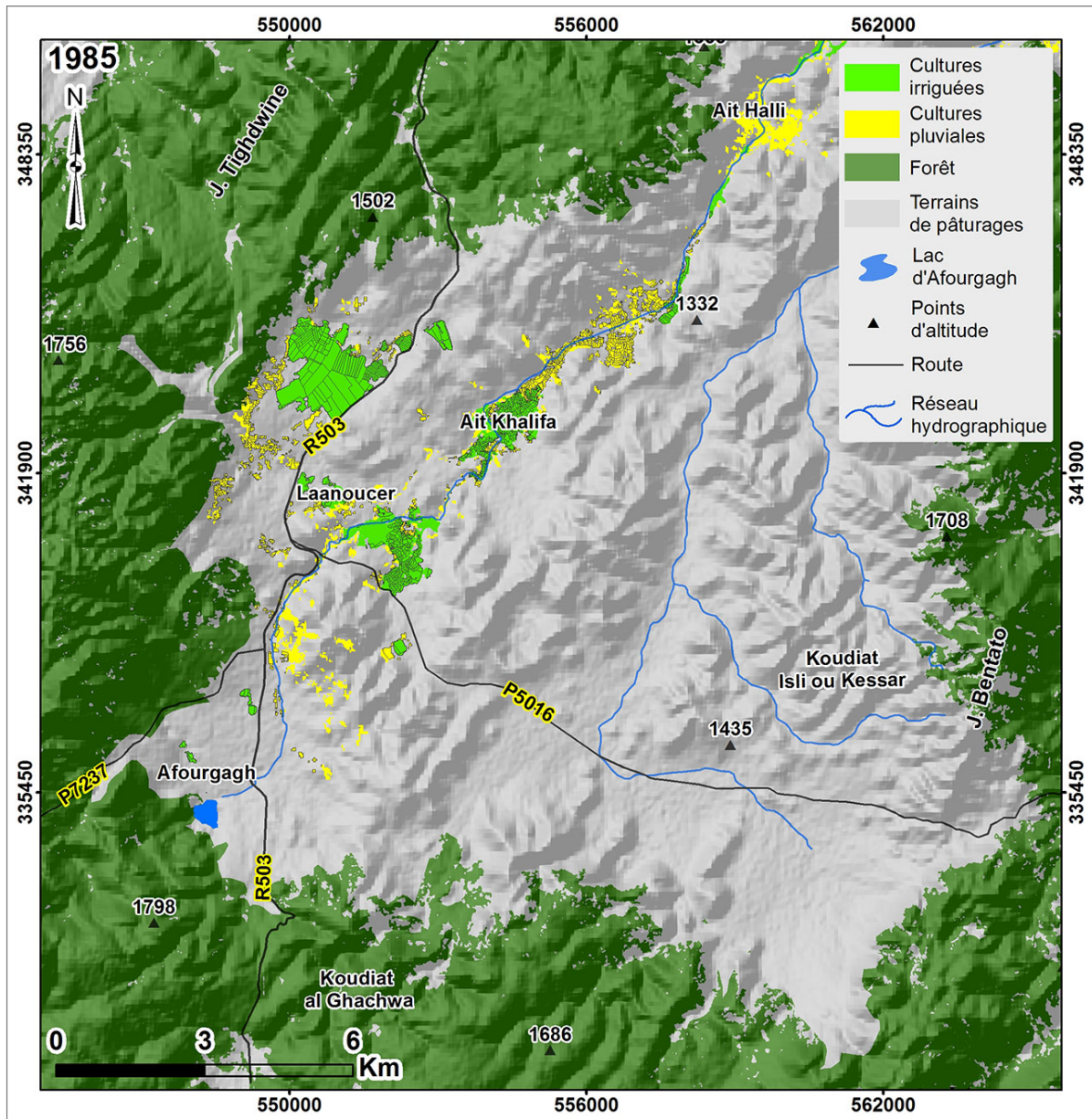


FIGURE 7.5. Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 1985
[image satellite Landsat TM, 17 mai et 14 août 1985]

4.3. La prédominance de l'irrigation sur l'ensemble des dépressions

Durant les dernières décennies, les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer enregistrent des changements rapides au niveau d'occupation du sol. La régression brutale des pratiques traditionnelles d'occupation des terres a favorisé l'extension des surfaces agricoles qui se basent sur des techniques modernes d'irrigation et d'aménagement (photos 1 et 2 *in* fig. 7.7).

La combinaison des facteurs naturels et anthropiques (succession des années sèches, la subvention de l'État, ...) ont participé au déploiement des cultures irriguées dans les dépressions

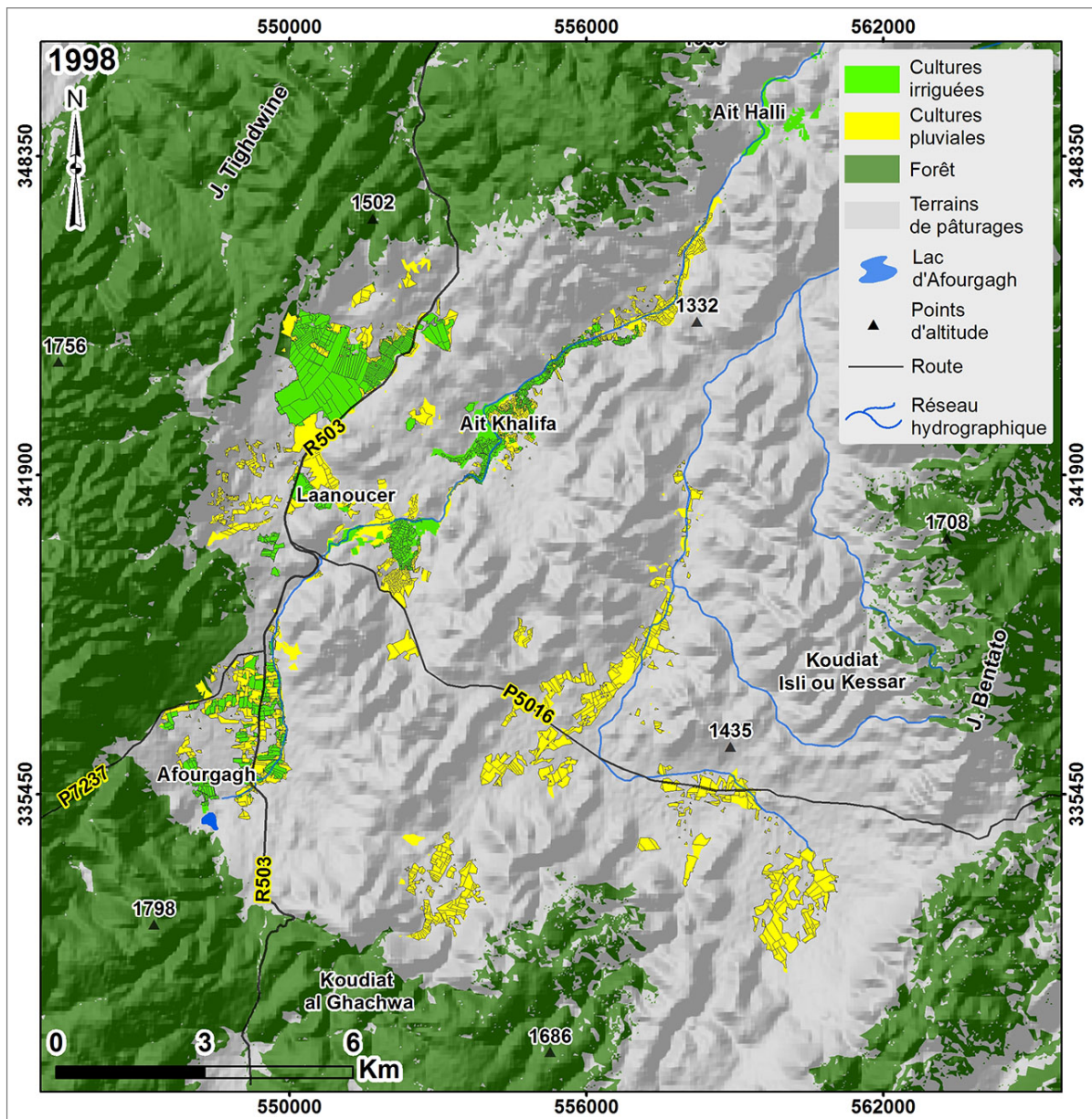


FIGURE 7.6. Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 1998

[image satellite Landsat TM, 12 avril et 2 août 1998]

d'Afourgagh et de Laanoucer. Les tableaux ci-après (tableaux 7.1 et 7.2) présentent les subventions menées par l'État pour développer l'agriculture irriguée dans la province de Sefrou en générale et dans la commune de Laanoucer en particulier. Les subventions sont réalisées dans le cadre du développement agricole et dans le cadre du plan Maroc vert.

L'augmentation de la subvention de l'État dans cette région depuis 2009 génère des modifications flagrantes des pratiques agricoles et une augmentation remarquable des surfaces irriguées. La comparaison entre les cartes d'occupation des sols avant et après la subvention (figs. 7.6 à 7.9) met en lumière l'importance des interventions étatiques dans le développement



Photo 7.1. Travaux d'épierrage par l'utilisation des pelles mécaniques



Photo 7.2. Fossé pour la mise en place du goutte-à-goutte

FIGURE 7.7. Aménagement des terres dans la commune de Laanoucer

Année	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
Dossiers subventionné	566	518	477	653	912	1488	662	1769	1087

TABLEAU 7.1. Dossiers de subvention accordé par l'État « province de Sefrou » entre 2009 et 2017 dans le cadre du développement agricole

[DPA Sefrou 2019]

Filière	Intitulé du projet	Communes rurales	Montant (MDH)	Sup. (ha)	Nombre bénéficiaires	Date de début
Pommier	Développement de la filière pommier	Laanoucer	28405	40	325	2012

TABLEAU 7.2. Dossiers de subvention accordé par l'Etat « commune Laanoucer » à partir de 2012 dans le cadre du plan Maroc vert

[DPA Sefrou 2019]

des cultures irriguées dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer et dans les dépressions du Moyen Atlas en général. La carte (fig. 7.9) illustre parfaitement la situation d'occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer. Il s'agit d'une extension des cultures irriguées aux alentours du lac et à proximité des axes routiers.

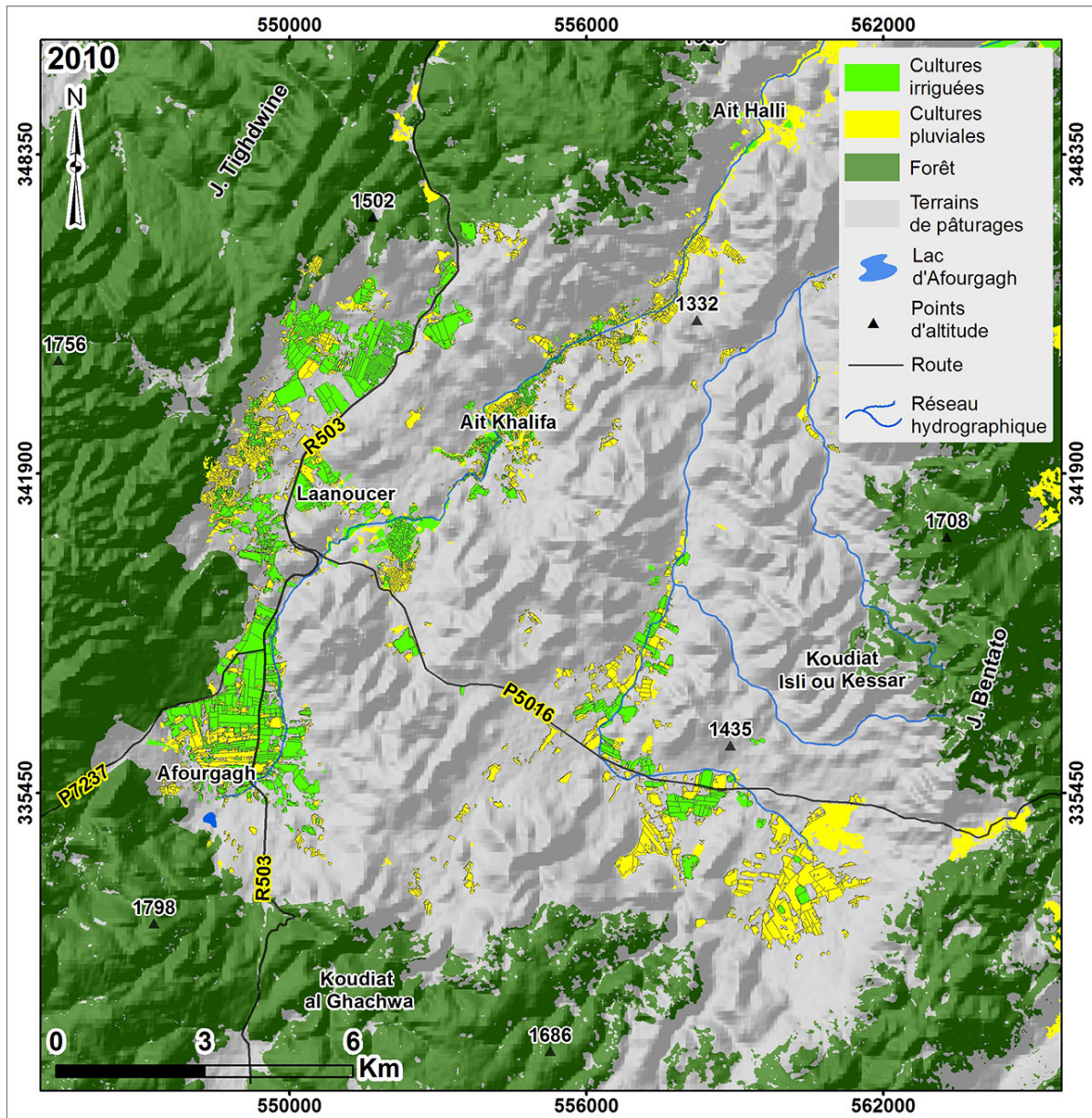


FIGURE 7.8. Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 2010

[image satellite Landsat TM, 15 mai et 3 août 2010]

4.4. La dynamique des surfaces irriguées dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer

Sous l'effet de la combinaison des variables naturelles et anthropiques, les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer enregistrent durant les dernières décennies une dynamique d'occupation des sols notable. Les principaux aspects de cette dynamique sont l'extension des surfaces agricoles (cultures irriguées et pluviales) et l'introduction des pratiques modernes d'occupation des terres ce qui provoque la régression de la société pastorale et l'augmentation de la pression sur les ressources en eau souterraines.

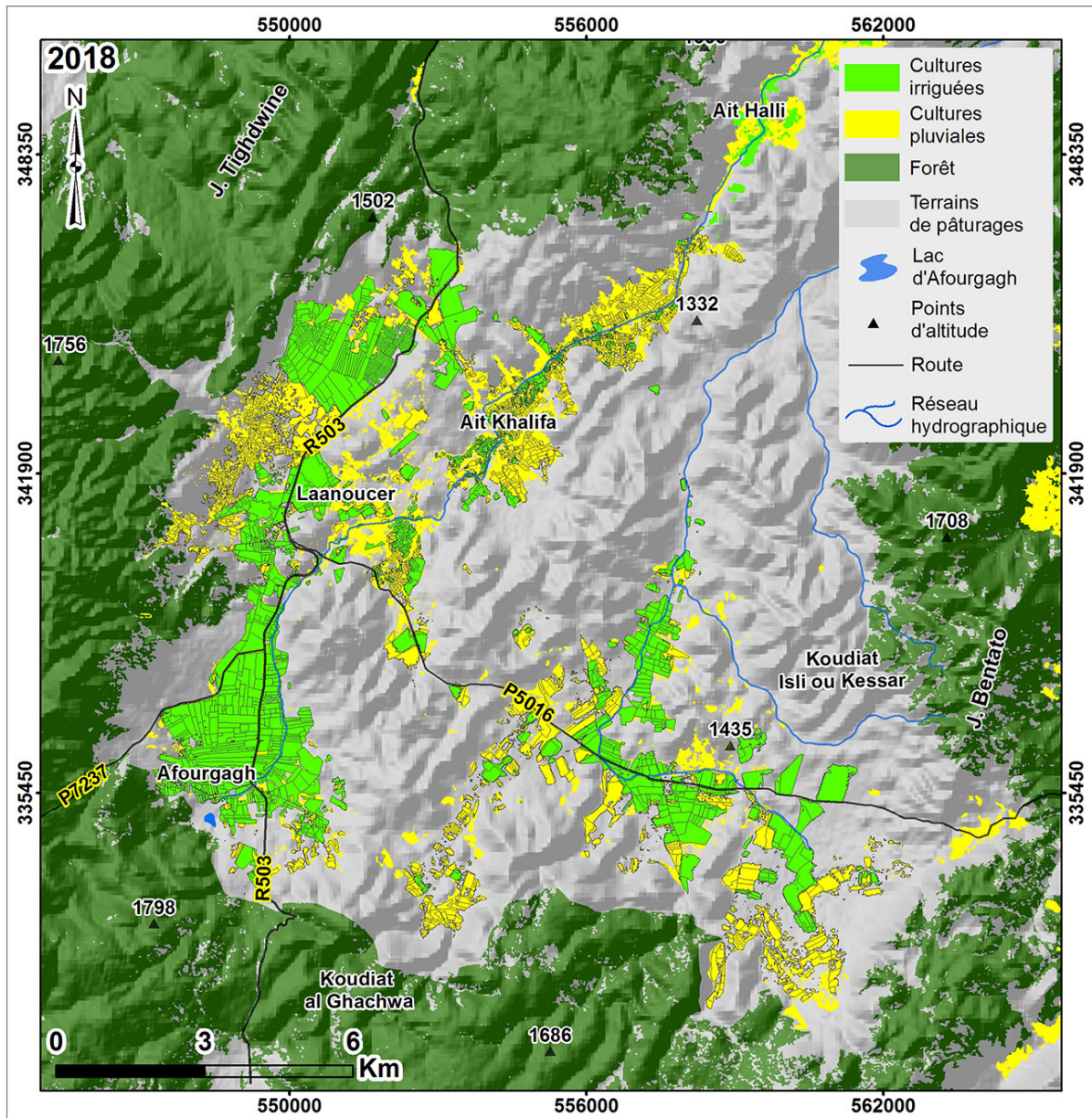


FIGURE 7.9. Occupation des sols dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer 2018

[image satellite Landsat OLI, 19 avril et 9 août 2018]

La lecture des figures 7.10 et 7.11 et le tableau 7.3 montrent qu'entre 1985 et 2018 les surfaces agricoles dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer augmentent de façon significative. Elles passent d'environ 723 ha (1.3 %) en 1985 à plus de 3700 ha (5 %) en 2018 pour les cultures irriguées (+2000 ha) et d'environ 745 (1.4 %) ha en 1985 à plus de 4200 ha (8 %) en 2018 pour les cultures pluviales (+3500 ha). En parallèle avec l'augmentation des surfaces agricoles, les terres de pâturages enregistrent une régression importante d'environ 28950 ha (53.6 %) en 1985 au 23000 ha (42.7 %) en 2018 (-5899 ha).

Il ressort de la carte (fig. 7.11) que les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer ont enregistré

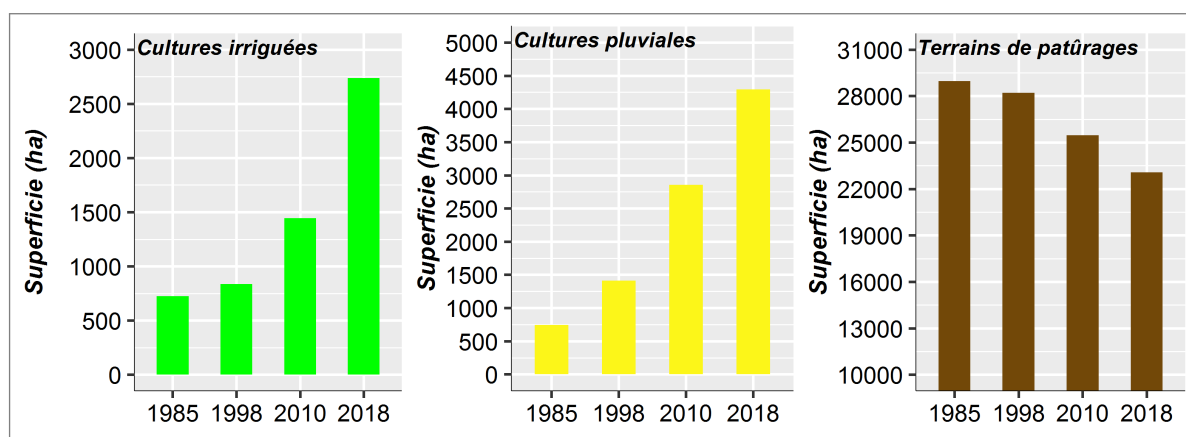


FIGURE 7.10. Évolution de la superficie (ha) d'occupation du sol les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer entre 1985 et 2018

Classes	1985 - 1998	1998 - 2010	2010 - 2018	1985 - 2018
Cultures irriguées	112.46	607.07	1294.62	2014.15
Cultures pluviales	663.75	1446.98	1433.59	3544.31
Forêts	-740.27	-2759.46	-2400.23	-5899.96
Terrains de pâturages	-1726	-97	-420	-2243

TABLEAU 7.3. Évolution d'occupation du sol entre 1985 et 2018 par période

trées une extension flagrante des périmètres irrigués. En 1985 les cultures irriguées et pluviales occupent une superficie très faible. Jusqu'à 1998, les surfaces agricoles ne couvrent qu'une superficie limitée. La surface agricole augmente d'une manière remarquable notamment entre 2010 et 2018 avec un taux de croissance de plus de 180 ha par an. Les zones à proximité des ressources en eau et des axes routiers sont les plus touchées par ces grandes transformations. Le déploiement des terres agricoles dans cette dépression est lié au développement des techniques d'aménagement des terres, d'irrigation et de creusement de puits. La multiplication de nombres des puits associés à une exploitation non contrôlée des ressources en eau achemine le niveau piézométrique de la nappe vers la baisse. Cette situation a conduit les agriculteurs vers des changements consécutifs du système hydroagricole.

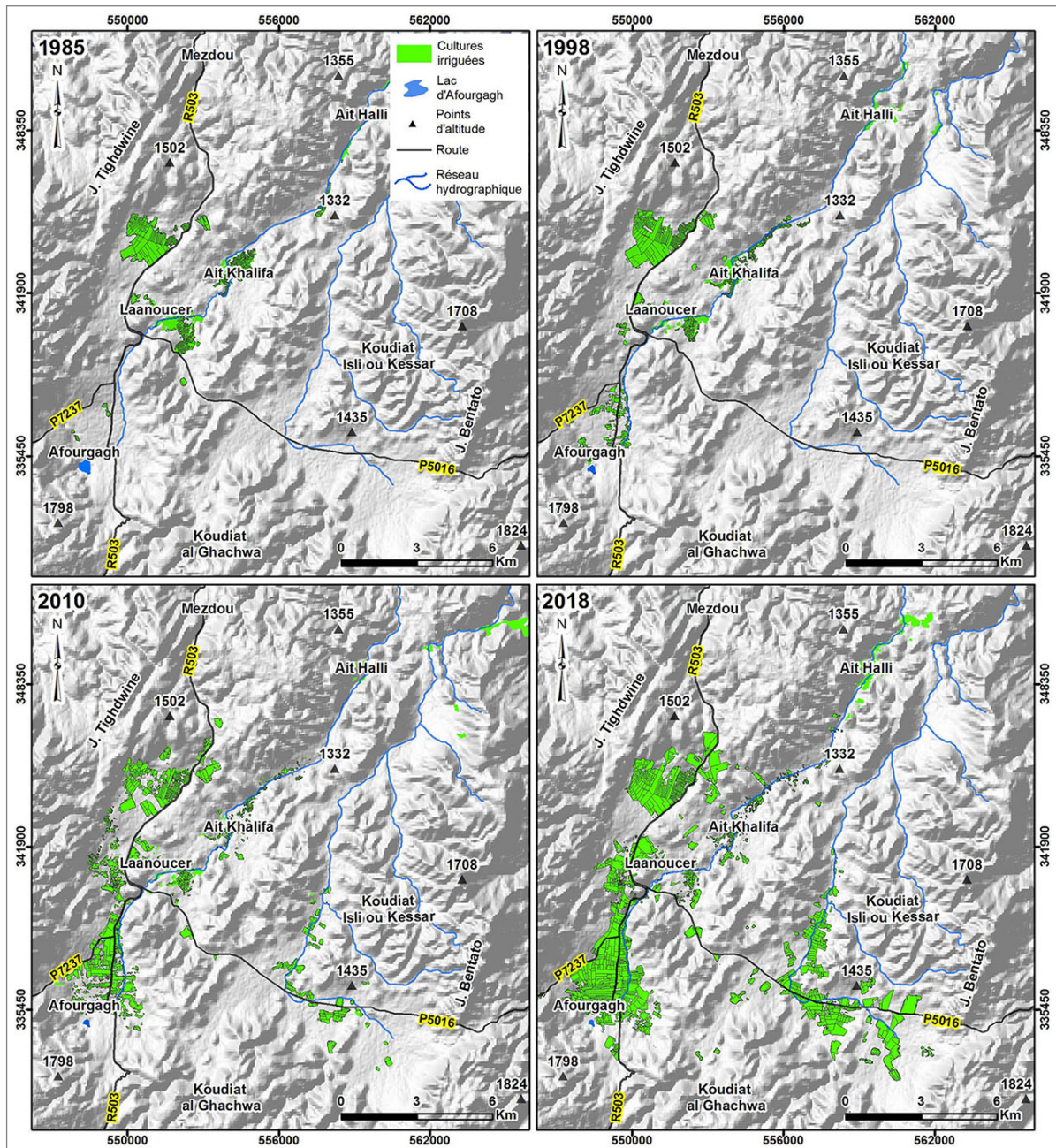


FIGURE 7.11. Évolution des surfaces irriguées les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer entre 1985 et 2018

[Image satellite Landsat OLI]

Conclusion

La dynamique observée dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer est liée à l'interaction de plusieurs facteurs d'ordre naturels et anthropiques. L'évolution spatiotemporelle des surfaces agricoles dans ces dépressions a engendré au cours de trois décennies des transformations notables au niveau des structures paysagères. Localement se traduit par la régression de la société traditionnelle et l'extension progressive des pratiques modernes d'occupation des

terres. Il est indéniable que le remplacement des modes d'occupation des sols a provoqué une pression très forte sur les eaux souterraines et conduit à une baisse généralisée de la nappe.

Conclusion de la deuxième partie

Dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire (dépressions de Guigou, d'Imouzzer, d'Afourgagh, Laanoucer ...) l'interaction entre plusieurs facteurs a conduit à une dynamique remarquable d'occupation des sols. La mise en évidence de cette dynamique est abordée par le suivi d'une méthodologie qui se base sur le traitement des données multi-sources et multi-dates (images satellites et travail de terrain). À l'échelle de trois secteurs intramontagnards du Moyen Atlas tabulaire, nous avons travaillé sur les grandes classes d'occupation des sols (cultures pluviales, cultures irriguées, forêts ...) pour éviter le problème de séparabilité de la réflectance spectrale entre les différents types de cultures (pomme de terre, carotte, pommier, nectarinier ...).

Les résultats obtenus montrent que les trois secteurs étudiés se caractérisent par une dynamique importante des structures paysagères. Cette dynamique est marquée essentiellement par la tendance évolutive des surfaces irriguées au détriment des terres de pâturages et de cultures pluviales. En trois décennies, la superficie des cultures irriguées (maraîchères et vergers de rosacées) a multiplié par plus de cinq dans les dépressions de Guigou et d'Afourgagh et plus de trois dans les dépressions d'Imouzzer et de dayet Aoua. Cette multiplication par plus de 4.5 en moyenne sur l'ensemble des dépressions s'explique principalement par la succession des interventions étatiques, l'abondance des ressources en eau et le recours des agriculteurs à l'irrigation pour pallier la problématique de diminution des rendements des cultures pluviales, très vulnérables aux aléas climatiques (succession des années sèches et la tendance générale des précipitations à la baisse).

L'évolution progressive des pratiques agricoles basées sur l'irrigation dans le Moyen Atlas tabulaire a conduit à des transformations paysagères, économiques, sociales très profondes et en parallèle le déclenchement d'une problématique environnementale locale voire régionale, il s'agit principalement de la baisse alarmante de niveau des nappes souterraines, question que nous allons traiter d'une manière détaillée dans la troisième partie de ce travail.

TROISIEME PARTIE

**L'IMPACT DE L'EXTENSION DES SURFACES IRRIGUEES SUR LES
RESSOURCES EN EAU DANS LE CONTEXTE DES TENDANCES
CLIMATIQUES ACTUELLES**

CHAPITRE 8 : LES TENDANCES D'EVOLUTION DU CONTEXTE CLIMATIQUE

CHAPITRE 9 : SPATIALISATION DES PRÉCIPITATIONS ET DES ETAGES BIOCLIMATIQUES DANS LE MOYEN ATLAS TABULAIRE ET SES BORDURES

CHAPITRE 10 : L'IMPACT DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET DE LA DYNAMIQUE DES SURFACES IRRIGUÉES SUR LES RESSOURCES EN EAU

Introduction de la troisième partie

La compréhension de la dégradation quantitative actuelle des ressources en eau et les grands changements au niveau des systèmes hydro-agricoles nécessite le suivi de l'évolution d'occupation des sols d'une part et l'analyse de la variabilité et la tendance du climat d'autre part. Dans ce sens, plusieurs études ont été réalisées dans les différents pays du monde. Certains de ses travaux se focalisent sur la variabilité du climat comme facteur principal de la dégradation des ressources en eau (Ademe et al., 2020 ; Dad et al., 2021 ; Gbohoub et al., 2021 ; Rahman et al., 2021 ; Zhou et al., 2021), tandis que d'autres combinent le climat et les changements des pratiques agricoles pour comprendre la situation actuelle des ressources en eau (Wu et al., 2021b ; Xiong et al., 2021 ; Zhang et al., 2020) qui se caractérise par une dégradation continue (Bahir et al., 2021 ; Lyazidi et al., 2020 ; Mendieta-Mendoza et al., 2021 ; Yifru et al., 2021 ; Yue et al., 2020 ; Zellner et al., 2020).

Rappelons que dans la deuxième partie de ce travail nous avons réalisé une étude diachronique d'occupation des sols dans trois secteurs du Moyen Atlas tabulaire, cela a permis de montrer les changements successifs des structures paysagères marquées essentiellement par une dynamique remarquable des cultures irriguées (pomme de terre, carotte, pommiers, nectariniers, etc.) au détriment des terres de pâturages et des cultures pluviales (blé, orge, avoine, etc.).

Cette partie porte dans un premier temps sur l'analyse statistique des variables climatiques, la spatialisation des précipitations par l'application du modèle PLUVIA, la validation des précipitations satellitaires TRMM et GPM à partir des mesures aux stations et la spatialisation des étages bioclimatiques. Dans un deuxième temps, nous avons abordé l'impact combiné des changements climatiques et de l'extension des surfaces agricoles irriguées sur les ressources en eau (lacs, nappes souterraines, sources et oueds) et sur le système hydro-agricole dans la zone d'étude.

CHAPITRE 8

Chapitre 8 : Les tendances d'évolution du contexte climatique

Introduction

La consultation de bases de données internationales montre que les travaux relatifs à l'étude des paramètres climatiques (température, précipitations, etc.) sont nombreux avec une augmentation remarquable de ce type d'études durant les dernières années. Globalement, elles se basent sur l'utilisation de longues séries des mesures au niveau des stations et actuellement des mesures par les satellites. Ce chapitre est consacré à l'analyse des paramètres climatiques par l'application de plusieurs tests statistiques (l'indice de Nicholson, la méthode de CUSUM, la segmentation de Hubert et le quotient pluviothermique d'Emberger Q2). Ces indices permettent de détecter les ruptures dans les séries climatiques et de montrer la tendance actuelle du climat et son impact sur le système hydrologique et sur l'agriculture et les différentes pratiques d'occupation des sols.

1. L'essor des travaux relatifs à l'étude du climat durant les dernières années

Les études réalisées dans les différents pays du monde ont focalisé sur l'étude de la relation entre le changement au niveau des paramètres climatiques et les problèmes qu'elles causent aux différentes échelles ; global, continental, national et régional. Ainsi, les thématiques abordées par les chercheurs sont variées et les études sont très nombreuses. Un nombre important des travaux de recherches ont été mené sur l'analyse de la tendance et de la variabilité climatique (Ademe et al., 2020 ; Chang et al., 2020 ; Dad et al., 2021 ; Gbohouiab et al., 2021 ; Grove, 2021 ; m Lucas et al., 2021 ; Nicholson et al., 2018 ; Rahman et al., 2021 ; Rehman et El-Gebeily, 2009 ; Rodrigues et al., 2020 ; Sayemuzzaman et Jha, 2014 ; Thompson, 1999 ; Vu et al., 2019 ; Zeltz, 2021 ; Zhou et al., 2021 ; Šraj et Bezak, 2020). En revanche,

d'autres chercheurs ont étudié la tendance des paramètres climatiques et les activités anthropiques (Oreggioni et al., 2021 ; Pirasteh et al., 2021 ; Wu et al., 2021b ; Xiong et al., 2021 ; Zhang et al., 2018, 2020), afin de comprendre l'impact de l'évolution actuelle du climat sur l'environnement et sur la société. Ainsi, des études ont essayé de montrer l'impact de la tendance du climat sur les ressources en eau, sur les cultures irriguées et sur le couvert végétal (Bahir et al., 2021 ; Choukri et al., 2020 ; Djebou et al., 2021 ; El-Assaoui et al., 2021 ; Marega et al., 2021 ; Shimoda et al., 2018). Avec l'augmentation remarquable des travaux relatifs à l'étude du climat, des auteurs ont tenté de faire des études synthétiques des travaux et des méthodes utilisées pour montrer la tendance générale des paramètres climatiques et les actions menées par les États à travers le monde (Mudelsee, 2019 ; Nalau et BrodieVerrall, 2021 ; Puertas et Marti, 2021 ; Ward, 2022).

Une étude bibliographique sur l'adaptation au changement climatique a été réalisée par Nalau et BrodieVerrall (2021) qui s'étend de 1978 à mi-2020 montre les principaux thèmes de recherche abordés par les chercheurs dans le domaine du climat. L'observation de la figure 8.1 montre la dominance remarquable de trois thématiques : la résilience, la vulnérabilité et l'agriculture. Globalement, les études sur les variations climatiques et la tendance actuelle du climat sont nombreuses, avec une augmentation marquée ces dernières années.

2. Données et méthodes

Actuellement, l'analyse de la variabilité et de la tendance du climat constitue l'un des défis scientifiques les plus urgents et d'une grande importance pour la société et l'environnement. Dans cette étude, la mise en évidence de la variabilité climatique, la tendance du climat est abordée par le traitement des données climatiques et notamment les précipitations et la température (tableau 8.1) et l'application de plusieurs méthodes statistiques pour étudier la tendance du climat (CUSUM, indice de Nicholson, indice d'Emberger).

Données	Période	Source
Précipitations / stations	1914 - 2017	ABHS
Température / stations	1961 - 2017	ABHS

TABLEAU 8.1. Données climatiques utilisées

2.1.1. Indice de Nicholson

L'indice pluviométrique de Nicholson a été utilisé dans les pays d'Afrique (Nicholson et al., 2018) pour suivre les fluctuations des régimes pluviométriques et hydrologiques (El-Fellah-Idrissi et al., 2017 ; Soro et al., 2011) et pour estimer le déficit pluviométrique annuel d'une série temporelle de données climatiques (Alamou et al., 2016). Ainsi, il permet de déterminer des périodes excédentaires et déficitaires mettant en évidence des changements dans les apports pluviométriques (Assemian et al., 2013). Cet indice pluviométrique se définit comme une variable centrée réduite des pluies annuelles (Fossou et al., 2014). Il est le rapport de la différence entre la hauteur des précipitations annuelles à la station (i) et la hauteur moyenne annuelle des précipitations à l'écart type (Noufé et al., 2011). Le calcul de l'indice exprimé suivant l'équation 1 (tableau 8.2), proposée par Lamb (1982) et Nicholson et al. (1988). En outre, cet indice permet de calculer des anomalies thermométriques.

2.1.2. Méthode du CUSUM et de segmentation de Hubert

La méthode du CUSUM issue de la méthode du simple cumul (Brunet-Moret, 1971 ; Lettenmaier, 1976 ; Nejari, 2002), permet de tester si la moyenne est stationnaire sur la durée d'une chronique. Au Maroc, la méthode du CUSUM a été utilisée pour exprimer la tendance des années humides et/ou sèches (El-Fellah-Idrissi et al., 2017 ; Nejari et al., 2000 ; Qadem, 2015 ; Sary et Akdim, 2000) afin d'expliquer la tendance du climat et de montrer son influence sur le système hydrologique. La valeur C_j est calculée pour chaque année comme indiqué dans l'équation 2 (tableau 8.2). Aussi, pour vérifier l'homogénéité de la série pluviométrique, nous avons utilisé la méthode de segmentation de Hubert (Hubert et al., 1989) exprimée par l'équation 3 (tableau 8.2).

Indicateurs	Formules	N°
Indice de Nicholson	$I_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\delta}$	(2)
CUSUM	$C_j = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})$	(3)
Segmentation d'Hubert	$D_m = \sum_{i=1}^n d_k$	(4)

TABLEAU 8.2. Les tests statistiques utilisés pour étudier la tendance des climats dans ce travail

3. Variabilité des précipitations mensuelles dans la zone d'étude

L'analyse de la variabilité mensuelle des précipitations entre 1957 et 2017 se base sur les données de six stations situées dans le Moyen Atlas et ses bordures. Dans ce travail, nous avons sélectionné les stations qui contiennent les plus longues séries pluviométriques afin de caractériser la variation mensuelle des précipitations.

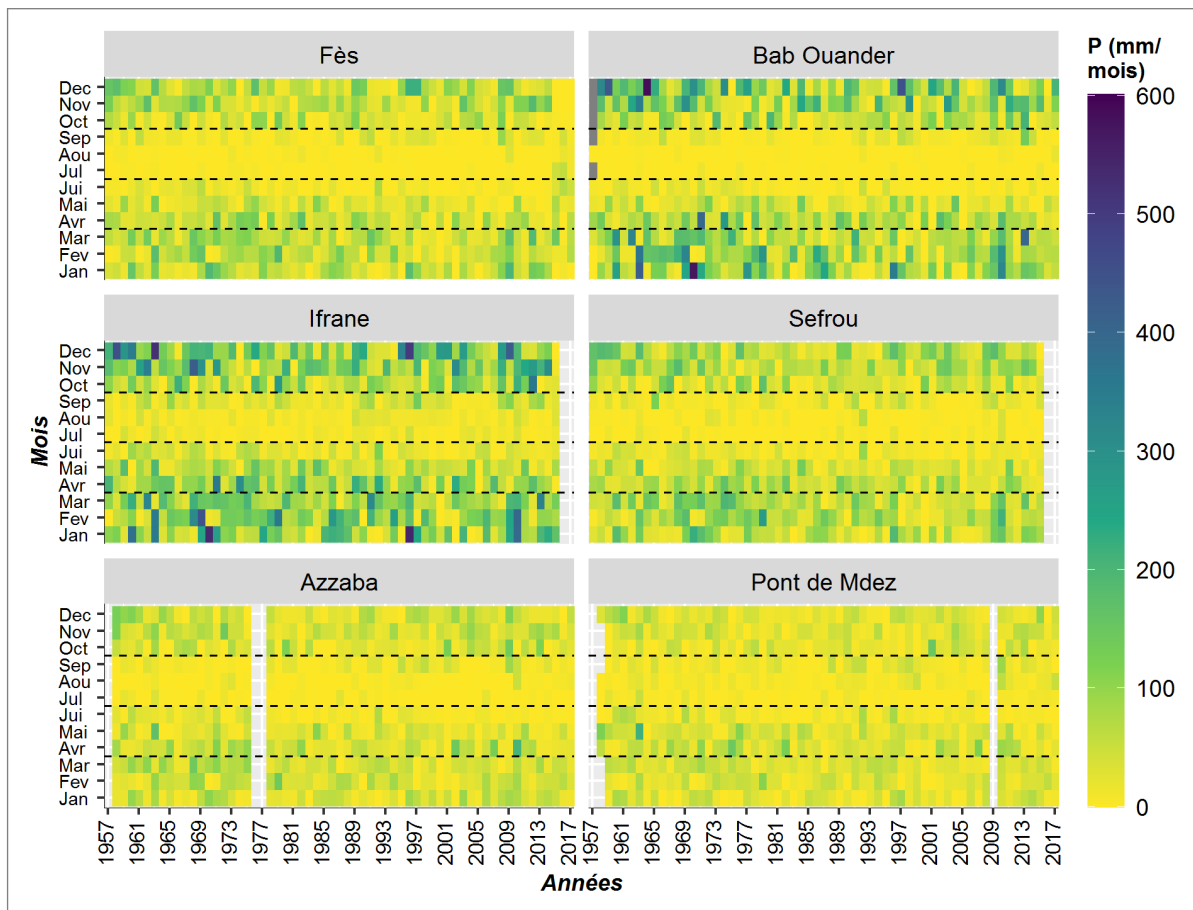


FIGURE 8.2. Les précipitations mensuelles entre 1957 et 2017

L'interprétation de la figure 8.1 montre une forte variation des précipitations dans les différentes stations. En effet, elles varient d'une station à l'autre et d'une année à l'autre. Les quantités les plus élevées des précipitations ont été enregistrées dans la station d'Ifrane (Moyen Atlas tabulaire) et dans la station de Bab Ouander (Rif Central). Tandis que les faibles valeurs des précipitations ont été enregistrées successivement dans la station de Fès (Sais), Sefrou, Azzaba et pont de Mdez (Moyen Atlas Plissé). Ainsi, la figure (fig. 8.1) met en évidence un fort contraste saisonnier des précipitations. Les valeurs les plus faibles se concentrent dans la période estivale, la période de l'augmentation de la pression sur les ressources en eau pour l'irrigation des surfaces irriguées notamment dans les dépressions du Moyen Atlas tabulaire.

4. La tendance sécheresse pluviométrique durant les décennies récentes

Dans le même sens d'étude des variations annuelles des précipitations, nous avons appliqué des tests sur les séries des précipitations pour vérifier leur homogénéité ou hétérogénéité et pour détecter les ruptures. Dans ce travail, nous avons appliqué trois méthodes pour étudier la tendance générale des précipitations dans plusieurs stations. Dans un premier temps, nous avons analysé les précipitations à l'échelle de trois stations sur une longue période (plus d'un siècle pour les stations de Fès et de Sefrou et 81 ans pour la station d'Ifrane). Après, nous avons appliqué les mêmes tests sur six stations à partir de 1957 jusqu'à 2017.

4.1. L'analyse de la variabilité des précipitations sur longue durée

L'analyse de la variabilité pluviométrique dans trois stations situées dans le Moyen Atlas et ses bordures sur une période variable de 81 ans à 103 ans montre que les stations se caractérisent par une tendance hétérogène des précipitations entre 1915 et 2017.

4.1.1. A l'échelle des stations de Fès et de Sefrou

L'étude de la variabilité pluviométrique dans les stations de Fès et de Sefrou sur plus d'un siècle indique une hétérogénéité des séries des précipitations. Au sein des séries nous avons distingué deux grandes périodes homogènes par l'application du test de segmentation de Hubert² (tableau 8.3).

Les CUSUMs (figs. 8.3 et 8.4) et les résultats de l'application de l'indice pluviométrique (IP) (figs. 8.5 et 8.6) montrent que La première période s'étend de 1915 à 1979 (65 ans) et se caractérise par l'alternance des années humides (40 ans pour la station de Fès et 41 ans pour la station de Sefrou) et des années sèches (25 ans pour la station de Fès et 24 ans pour la station de Sefrou) avec une prédominance remarquable des périodes humides. Tandis que la deuxième s'étale de 1980 à 2017 (38 ans) et se distingue par une diminution remarquable des valeurs de la courbe Cj et de l'indice IP. La dominance des années déficitaires est parfaitement visible par l'indice IP des deux stations dont 29 sur 38 pour la station de Fès et 27 sur 36 pour la station de Sefrou. Ainsi sein de la deuxième période, nous avons distingué une période humide de courte durée qui s'étend sur trois années de 2009 à 2011.

2. Ce test est appliqué par l'utilisation du logiciel « Khronostat »

Station	Période	Moyenne	Écart Type	N des années	Diagnostic
Fès	1915-2017	503.8	140.7	103	Série hétérogène
	1915-1979	548.8	106.7	65	Série homogène
	1980-2017	426.9	158.9	38	Série homogène
Sefrou	1915-2015	585.1	156.3	101	Série hétérogène
	1915-1979	639.1	121.7	65	Série homogène
	1980-2015	487.5	165.8	36	Série homogène

TABLEAU 8.3. Résultat de segmentation d'Hubert des précipitations annuelles dans les stations de Fès et de Sefrou

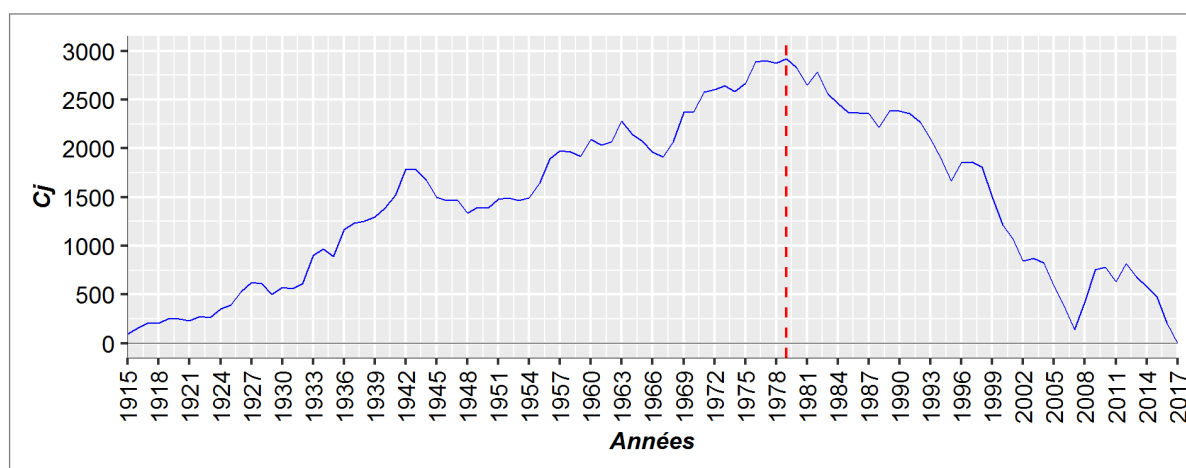


FIGURE 8.3. CUSUM des précipitations annuelles (1915-2017) à la station de Fès

La comparaison entre les deux périodes permet de mettre en évidence une forte diminution des apports pluviométriques, avec 29 années déficitaires pour la station de Fès et 27 années pour la station de Sefrou en période humide contre 40 années déficitaires pour la station de Fès et 41 années pour la station de Sefrou durant la seconde période. Alors que jusqu'en 1980, les années sèches ont été moins fréquentes, elles sont devenues la norme depuis presque 40 ans, signifiant vraisemblablement que cet état de sécheresse climatique est devenu structurel au Maroc.

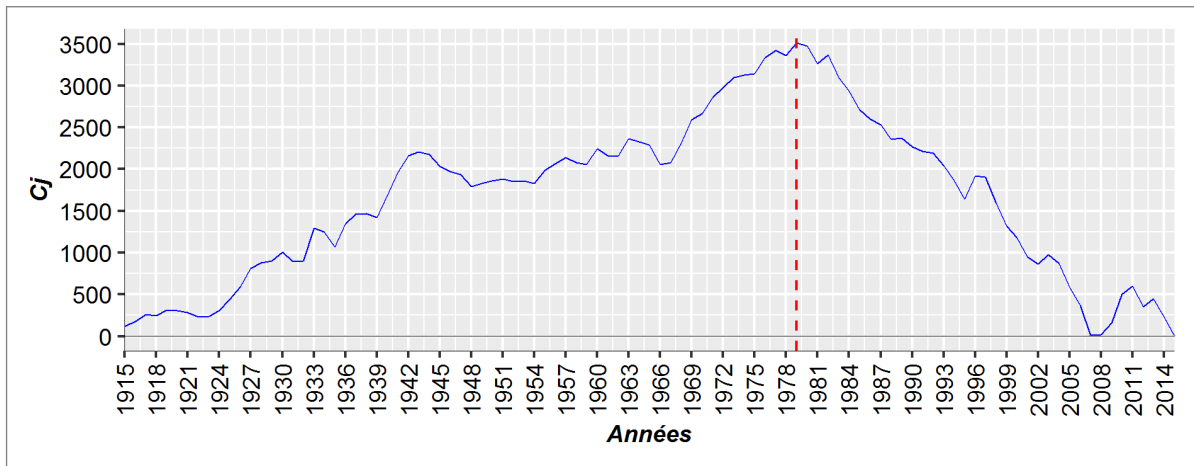


FIGURE 8.4. CUSUM des précipitations annuelles (1915-2015) à la station de Sefrou

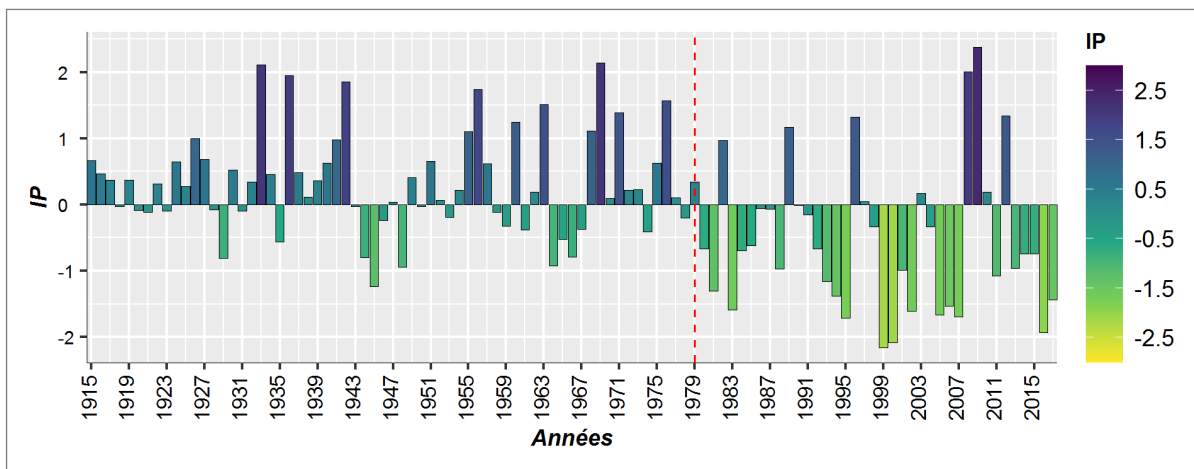


FIGURE 8.5. Représentation graphique de l'indice de Nicholson calculé pour la station de Fès (1915 à 2017)

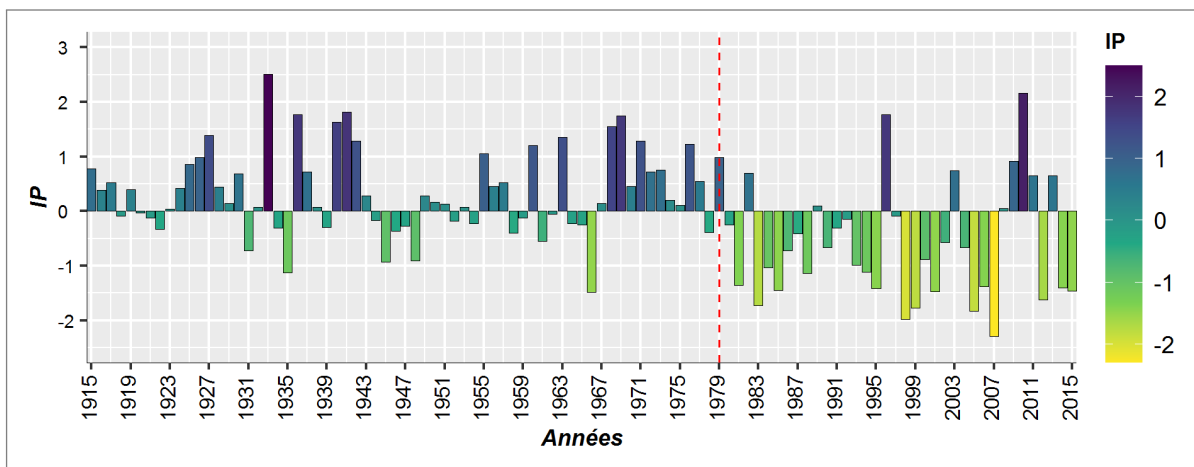


FIGURE 8.6. Représentation graphique de l'indice de Nicholson calculé pour la station de Sefrou (1915 à 2015)

4.1.2. A l'échelle de la station d'Ifrane

L'analyse des données pluviométriques à la station d'Ifrane entre 1935 et 2015 indique une nette alternance des périodes humides et des périodes sèches (fig. 8.7). L'indice IP (fig. 8.8) montre clairement le nombre des années humides (34 ans) et des années déficitaires (47 ans) sur une période de 81 ans. Par rapport aux stations de Fès et de Sefrou, la station d'Ifrane a enregistré une longue période de sécheresse qui s'étend de 1934 à 1954. Cette période a été suivie par une nouvelle tendance des précipitations à la hausse jusqu'à 1971. A partir 1972 le nombre des années déficitaires a connu une augmentation remarquable, avec 29 années sèches contre 15 humides ce qui signifie une tendance du climat vers la sécheresse durant les dernières décennies.

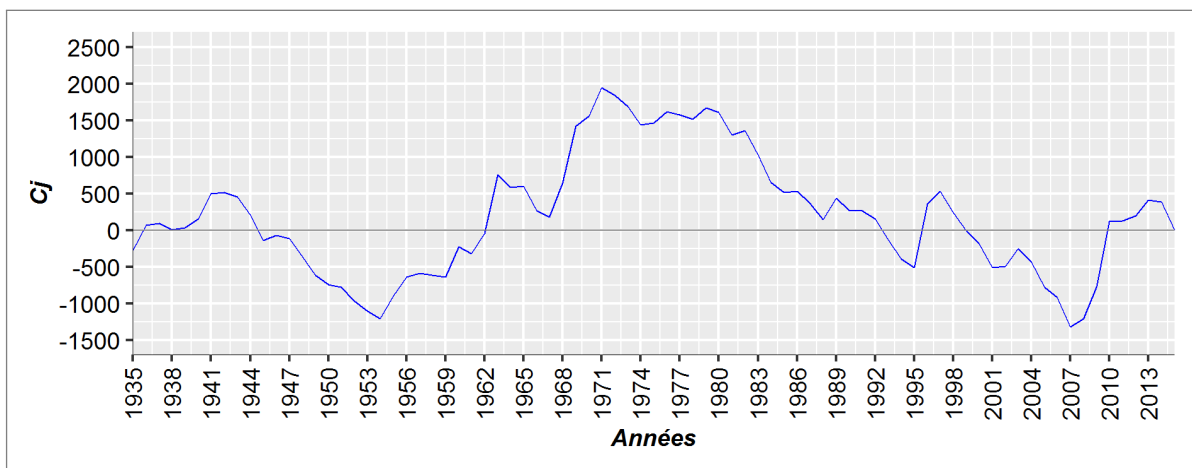


FIGURE 8.7. CUSUM des précipitations annuelles (1935-2015) à la station d'Ifrane

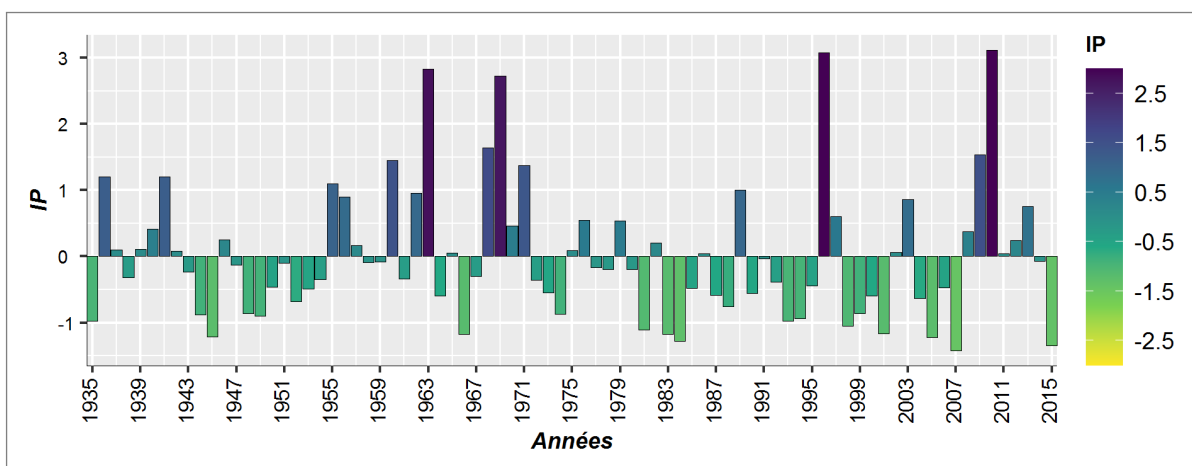


FIGURE 8.8. Représentation graphique de l'indice de Nicholson calculé pour la station d'Ifrane (1935 à 2015)

Le changement brutal au niveau des quantités des précipitations a entraîné une sécheresse

climatique très sévère qui a affecté le Maroc depuis les années 1980 (Barakat et Handoufe, 1997 ; Labouesse, 1986 ; Stour et Agoumi, 2008). Cette tendance vers la sécheresse a participé largement à la perturbation des systèmes agricoles basés sur les précipitations (diminution de rendement des terres, dégradation des terres de pâturages ...) et l'amplification du déficit hydrologique qui se traduit localement par le tarissement des sources, l'assèchement des lacs et la baisse alarmante de niveau des nappes souterraines.

4.2. L'analyse de la variabilité des précipitations entre 1957 et 2017

L'analyse des séries pluviométriques sur plus d'un siècle (Stations de Fès et de Sefrou) nous a permis de distinguer deux grandes périodes avec des caractéristiques différentes. Pour montrer la sévérité de sécheresse sur le territoire marocain à partir des années 80, nous avons appliqué des tests pour détecter les ruptures au niveau des séries pluviométriques à l'échelle de six stations situées dans des domaines différents (Moyen Atlas plissé, Moyen Atlas tabulaire, Sais et Rif central).

D'après l'interprétation des figures 8.9 et 8.10, nous constatons que la période qui s'étend de 1957 à 1979 est caractérisée par la dominance des années humides. En revanche, à partir de 1980, l'ensemble des stations enregistrent une forte diminution des précipitations. Cela a conduit au cours du temps à l'accumulation du déficit pluviométrique et par conséquent la succession des années sèches. Il s'agit de la tendance du climat vers une sécheresse sévère. Cette période a enregistré quelques années humides notamment entre 2009 et 2012. Généralement, la quantité des précipitations enregistrées varie d'une station à l'autre ce qui influence la hauteur du courbe C_j et de l'indice I_p .

Comme le reste du pays, le Moyen Atlas s'inscrit dans le contexte des changements climatiques qui ont affecté le Maroc au cours des dernières décennies (Amyay et al., 2012 ; El-Jihad, 2016 ; Sebbar et al., 2020). La diminution progressive des précipitations dans le Moyen Atlas et ses bordures au cours des dernières décennies explique la tendance du climat vers une sécheresse qui provoque la perturbation du système hydrologique régional. Cette sécheresse a accentué la pression des populations sur les ressources en eau. Elle a accru le recours à des pratiques modernes d'exploitation des terres basées sur l'exhaure des eaux souterraines ce qui a amplifié

l'ampleur du déficit pluviométrique. Les principaux aspects de ce déficit seront analysés dans les chapitres suivants.

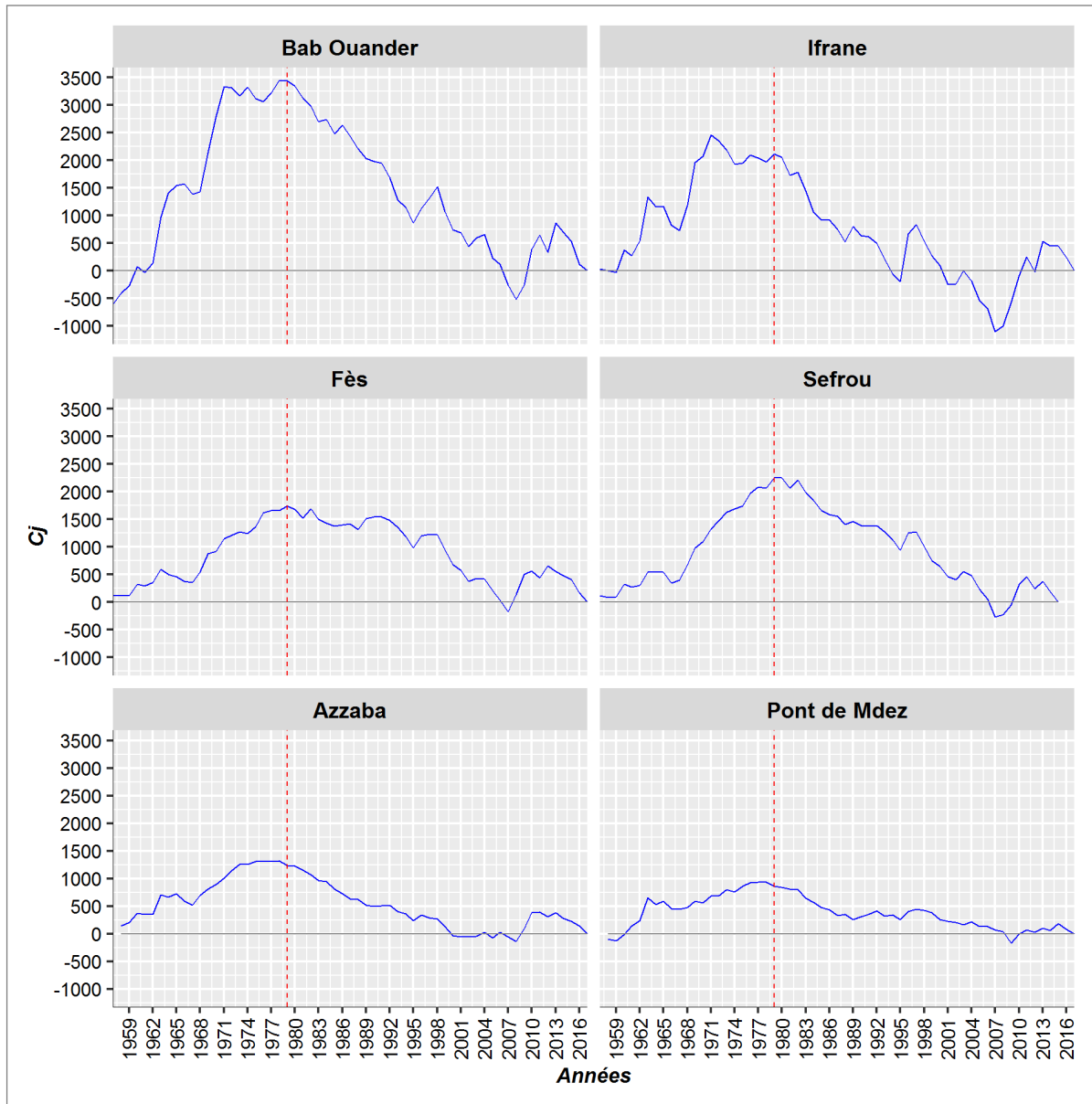


FIGURE 8.9. CUSUM des précipitations annuelles (1957-2017) à l'échelle de cinq stations

5. L'augmentation remarquable des anomalies positives de la température

Pour étudier la température, nous avons utilisé deux types de données, il s'agit des données issues de la base de données NOAA (1910-2021) et les données mesurées par l'agence du bassin hydraulique de Sebou (ABHS) (1985-2017). Les données se NOAA seront utilisés pour mettre en évidence des anomalies thermiques mensuelles à l'échelle globale, tandis que les données de l'ABHS, pour caractériser la température mensuelle et pour détecter les anomalies annuelles

sur quatre stations dans le Moyen Atlas.

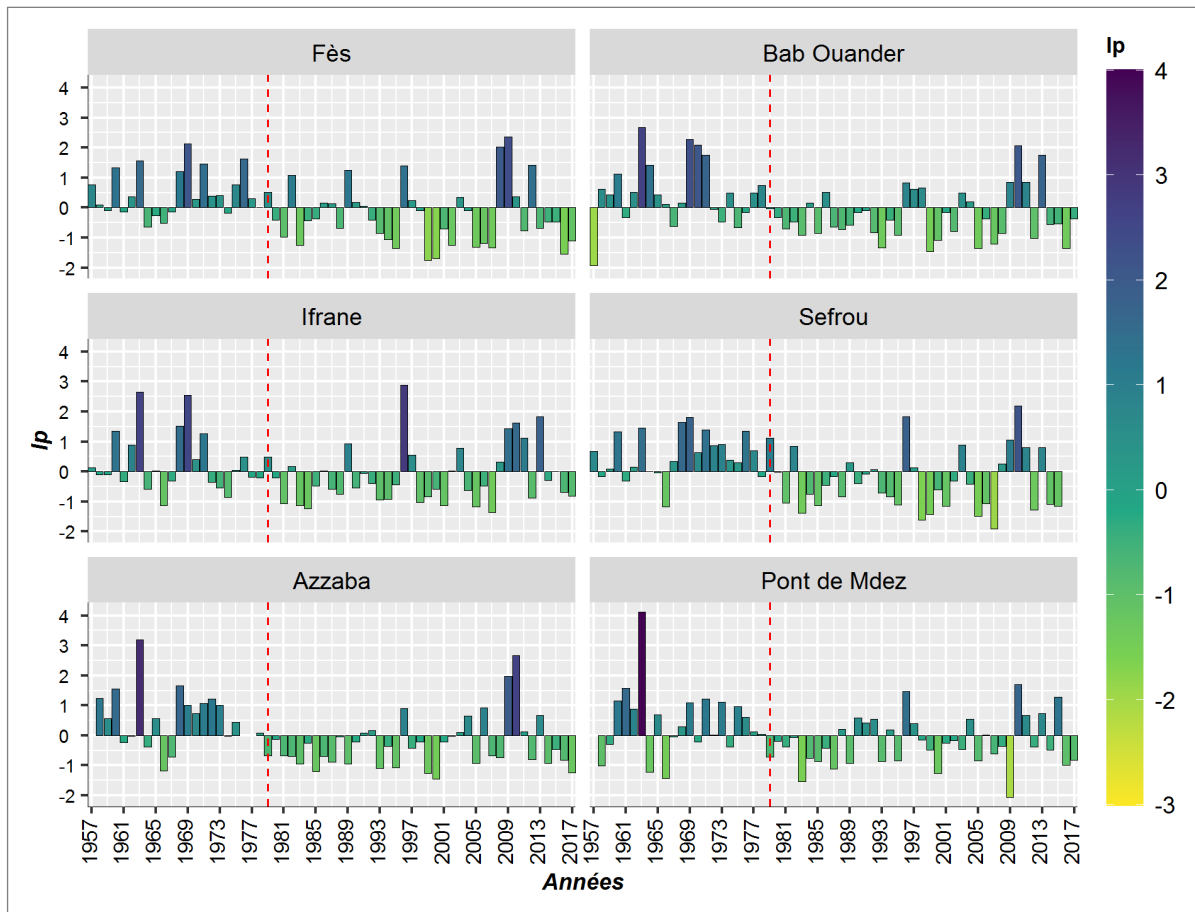


FIGURE 8.10. Représentation graphique de l'indice pluviométrique de Nicholson annuel calculé à l'échelle de six stations de 1957 à 2017

5.1. À l'échelle globale

D'après l'analyse des données mensuelles mesurées par NOAA (fig. 8.11) nous constatons une augmentation bien nette des anomalies positives des températures à partir de la fin des années 70 et le début des années 80. Concrètement, la série qui s'étend de 1910 à 2021 se compose de deux grandes périodes. La première (1910-1976) se caractérise par la dominance des anomalies négatives et la seconde par des anomalies positives. Ce changement dans la tendance de la température et les anomalies positives restent stables sur l'ensemble de la deuxième période avec une hausse remarquable de la température durant les dernières années. Cette homogénéité des anomalies positives se traduit par un réchauffement climatique global. Ce réchauffement (la hausse des températures moyennes) a été souligné dans les rapports officiels du NOAA et du GIEC (GIEC, 2019 ; IPCC, 2007, 2013 ; NOAA, 2022)

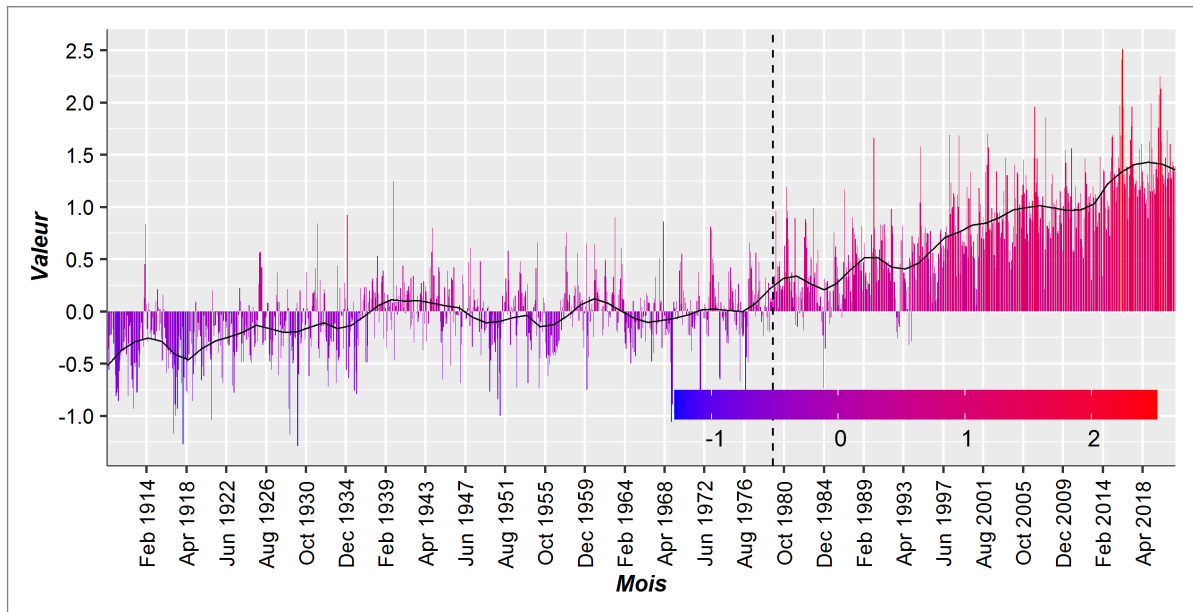


FIGURE 8.11. Anomalies des températures moyennes mensuelles sur la période 1910 - 2021

Source des données : (NOAA, 2022)

5.2. À l'échelle du Moyen Atlas

L'analyse de la température (fig. 8.12) illustre la variation de la température moyenne annuelle sur quatre stations (Fès, Ifrane, Azrou et El Hajeb) du Moyen Atlas. Globalement, la température varie légèrement d'une station à l'autre, mais sur le plan saisonnier toutes les stations enregistrent les valeurs les plus basses durant la période hivernale et les valeurs les plus élevées durant la période estivale. En effet, cette dernière se distingue par l'augmentation de la pression sur les ressources en eau pour l'irrigation. Alors, l'étude de la température sur quelques stations du Moyen Atlas nous a permis de mettre en évidence un fort contraste saisonnier. Ci-après une présentation de la tendance de la température sur les mêmes stations.

L'analyse de la température à l'échelle globale montre une tendance homogène de la température vers le réchauffement. En outre, l'étude de la température sur quatre stations du Moyen Atlas permet de mettre en évidence que la période qui s'étend de 1985 à 2017 se caractérise par une hétérogénéité bien nette des anomalies thermiques (fig. 8.13). Ainsi, l'interprétation de la figure conduit à distinguer deux grandes périodes.

> **La première période (1985 - 1996)** : se caractérise par la prédominance des anomalies négatives de la température sur l'ensemble des stations. Cette période se situe directement après la longue sécheresse qui a affecté le Maroc durant les années 80.

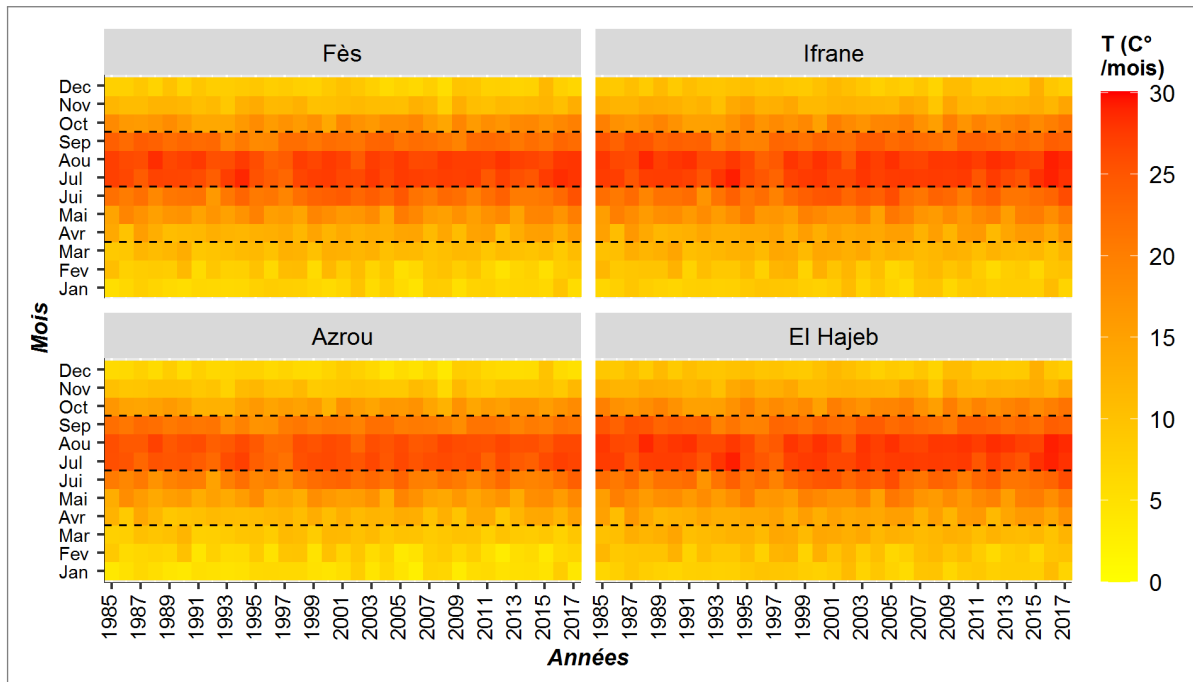


FIGURE 8.12. La température mensuelle entre 1985 et 2017

> **La deuxième période (1997 - 2017) :** cette période a enregistré une augmentation des anomalies positives. En effet, la valeur la plus élevée dépasse 2 C° en 2017 ce qui explique clairement la tendance de la température vers le réchauffement climatique. D'après la comparaison des résultats (fig. 8.13) à l'échelle de quatre stations nous constatons qu'elles se caractérisent par une même tendance de la température.

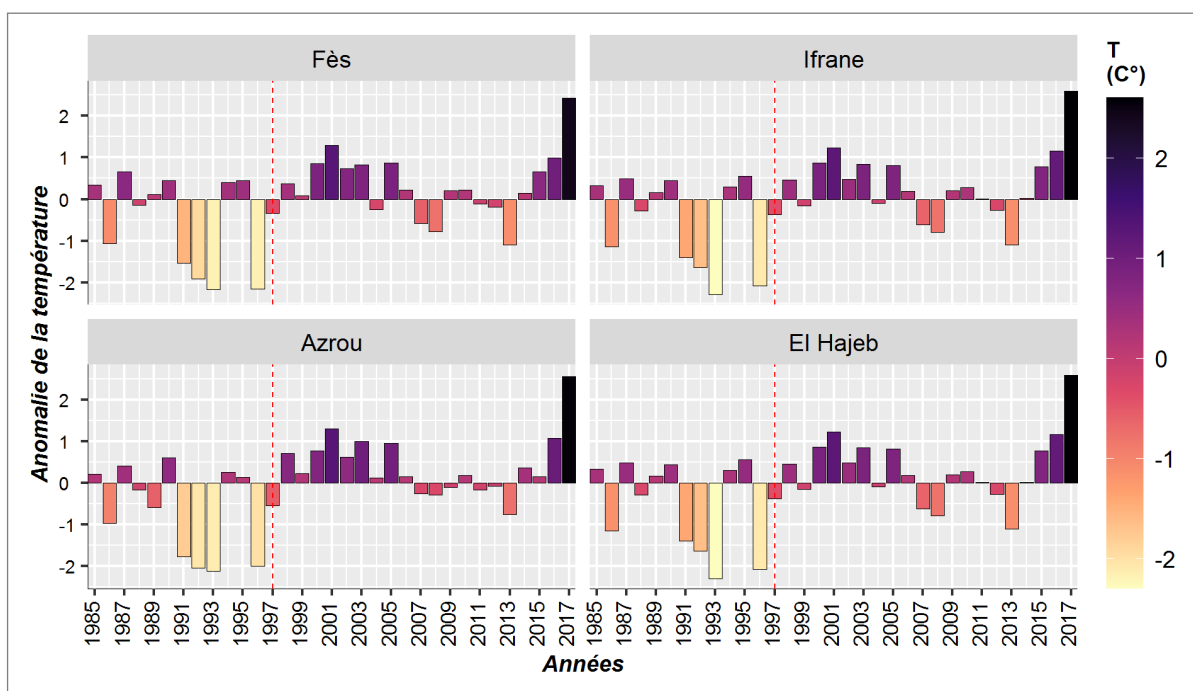


FIGURE 8.13. Anomalies des températures moyennes annuelles sur la période 1985 – 2017

6. Le contexte bioclimatique récent des périmètres irrigués

Précédemment, nous avons analysé la tendance des paramètres climatiques à l'échelle du Moyen Atlas et ses bordures. Les résultats obtenus montrent une nette diminution des précipitations et une hausse de la température. Ci-après, nous allons combiner les deux paramètres climatiques (précipitations et température) pour évaluer le contexte bioclimatique récent des périmètres irrigués (dépressions intra-montagnardes). Globalement, la durabilité de l'agriculture et du développement rural est étroitement dépendante du climat dont les changements ont été observés ces dernières décennies.

Le quotient pluviothermique d'Emberger, qui combine ces deux variables, traduit les conditions hydriques des milieux méditerranéens. Nous utilisons cet indice pour mettre en évidence l'amplitude des changements dans la contrainte biologique au niveau du Moyen Atlas et ses bordures, et plus particulièrement dans ses périmètres agricoles.

Pour la station de Fès-Saïs depuis les années 1960 l'augmentation de la température moyenne est davantage le fait de l'augmentation des Tmax (fig. 8.14). Elles augmentent de 2 °C environ tandis que les Tmin sont à peu près constantes. Cela entraîne une augmentation de l'amplitude thermique. La courbe des quotients Q2 annuels montre un glissement de la station de Fès de l'étage semi-aride vers l'étage aride. Cette aridification du climat est le fait conjugué d'une augmentation des températures estivales et d'une baisse des précipitations. Le poids des températures dans l'aridification du climat n'est pas négligeable puisque les calculs pour des précipitations constantes (moyen de la période 1962-2020) engendrent une diminution de 7 points du quotient Q2. Ainsi la station de Fès qui se trouvait à une valeur de Q2 de 57 à partir des années 1960/70 (Daget, 1977)

À l'échelle du Moyen Atlas et des périmètres irrigués (dépression de Guigou, dépressions d'Imouzzet et de dayet Aoua, dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer), le premier constat que l'on peut faire est qu'ils ne se situent pas dans les secteurs les plus favorables du point de vue hydrique. Ils sont caractérisés par des valeurs moyennes de Q2 calculées sur la période 1974/2017 de 66, 46 et 45, respectivement pour le périmètre irrigué d'Imouzzet, d'Afourgagh et de Guigou. Mais les valeurs pour la période d'avant 1980 sont bien plus élevées puisqu'elles

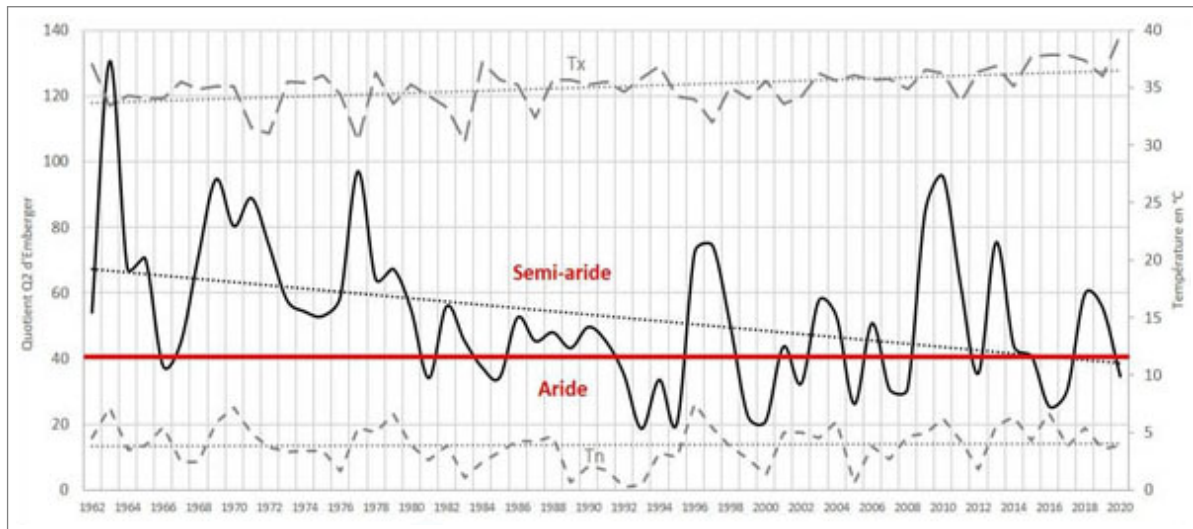


FIGURE 8.14. Quotient d'Emberger Q2 et températures à la station de Fès

sont respectivement de 79, 52 et 52. Toutefois depuis presque 50 ans, le contexte bioclimatique, le plus défavorable a eu lieu dans la décennie 1980/1990 pour laquelle la valeur moyenne pour le périmètre du Guigou, d'Afourgagh et de Laanouer a été de 34, valeur qui témoigne d'une ambiance bioclimatique aride.

Conclusion

Durant les dernières années, les travaux relatifs à l'étude du climat enregistrent une augmentation remarquable dans le monde entier. Ces études a permis de montrer l'impact de la tendance actuelle du climat sur l'environnement et sur les pratiques d'occupation des sols. Dans le contexte de l'étude de la variabilité climatique, nous avons appliqué des indices/tests statistiques sur plusieurs stations dans le Moyen Atlas tabulaire et ses bordures. Les résultats obtenus montrent une tendance globale vers une sécheresse climatique très sévère notamment à partir des années 1980. Cette situation se traduit statistiquement par une diminution alarmante des quantités des précipitations et la hausse des températures. Ce changement brutal au niveau des paramètres climatiques (à partir des années 1980) a participé largement à la perturbation des systèmes agricoles basés sur les précipitations et a conduit vers l'intensification des pratiques agricoles basées sur l'irrigation. Ces modifications au niveau des pratiques agricoles sont observées et quantifiées dans les trois dépressions étudiées dans la deuxième partie de ce travail. En effet, l'extension des surfaces irriguées dans un contexte des changements globaux constitue un facteur accélérateur du déficit hydrologique actuel.

CHAPITRE 9

Chapitre 9 : Spatialisation des précipitations et des étages bioclimatiques dans le Moyen Atlas tabulaire et ses bordures

Introduction

Les données pluviométriques issues des stations ne sont pas toujours suffisantes (François et Humbert, 2000) notamment dans les zones montagneuses où la densité des réseaux de mesures est faible (Droque et al., 2002). À cela s'ajoute, la complexité des reliefs qui influence la précision et la fiabilité des précipitations spatialisées. Couramment, les chercheurs utilisent les méthodes d'interpolation simples (polygones de Thiessen, IDW, Spline, kriging etc.) pour la spatialisation des précipitations. Ces méthodes se basent sur les données des stations et ne tiennent pas compte de la topographie comme facteur explicatif des précipitations.

Ce chapitre vise l'application du modèle PLUVIA développé par le CEREG pour spatialiser les précipitations dans le nord-est de la France, mais également applicable à d'autres terrains complexes (François et Humbert, 2000). Le modèle PLUVIA est utilisé pour la quantification et la spatialisation des précipitations sur l'ensemble du Moyen Atlas. Pour caractériser l'ambiance climatique, le quotient pluviothermique Q2 d'Emberger est retenu dans ce travail. La spatialisation des étages bioclimatiques se base sur les précipitations issues de l'application du modèle et les valeurs de la température calculées par l'utilisation des gradients thermiques.

En parallèle avec le modèle, les précipitations issues des satellites TRMM et GPM sont confrontées avec celles des stations pour mesurer le degré d'accord et la possibilité d'utilisation des produits satellitaires dans les milieux montagnards, marocains qui se caractérisent par une faible densité des stations de mesures.

1. Étude de la variation spatiale des précipitations

Les méthodes de spatialisation des précipitations sont très nombreuses. Généralement, ces méthodes peuvent être regroupées en trois catégories : les interpolateurs simples, les modèles statistiques et les méthodes géostatistiques multivariées (Nejjari, 2002). Dans ce travail, la spatialisation des précipitations se base sur le modèle statistique qui combine les paramètres topographiques et l'indice de végétation (NDVI). Ce modèle a été utilisé pour la cartographie et la spatialisation des précipitations dans le massif des Vosges (Humbert et Perrin, 1993 ; Marand et Zumstein, 1990), dans le nord-est de la France (François and Humbert, 2000), dans les grès d'Ardenne-Luxembourg (Lebaut, 2000). Sur le Moyen Atlas, il existe déjà des travaux sur la spatialisation des précipitations. En effet Nejjari (2002) a testé une dizaine de méthodes géostatistiques pour spatialiser les précipitations à l'échelle interannuelle. Qadem (2015) a testé une approche multicritère pour spatialiser les précipitations à l'échelle annuelles de 1974 à 2010 sur le Moyen Atlas. Reprenant ces conclusions indiquant que ce type de modélisation fonctionne correctement dans 70 % des cas pour les moyennes annuelles, nous avons repris la même démarche pour connaître les pluies sur le Moyen Atlas sur les périodes et aux échelles de temps qui nous préoccupent ici. La démarche multicritère nous paraît plus géographique dans le sens où elle transfère le problème de la connaissance du climat en tout lieu à celui de la connaissance des facteurs du climat en tout lieu (Charre et de Saintignon, 1997). Donc comme Qadem (2015) nous avons calculé 126 prédicteurs à partir d'un MNT SRTM de 90 m de résolution que nous avons dégradé à 1 km². Ces prédicteurs caractérisent la topographie du site et dans un voisinage plus ou moins loin, jusqu'à 32 km, selon toutes les directions (fig. 9.1). En complément, nous avons également utilisé une variable secondaire, mais cette fois-ci dépendante de la pluviométrie, celle de la végétation. Celle-ci est issue de l'observation spatiale et se présente sous la valeur de l'indice de végétation "NDVI".

1.1. Modèle de spatialisation des précipitations

Pour la spatialisation des pluies, nous avons utilisé le modèle statistique qui combine les précipitations, les paramètres topographiques (MNT) et l'indice de végétation (NDVI) (tableau 9.1).

Données	Période	Source
Précipitations / stations	1975 - 2017	ABHS
Précipitations / TRMM	2000 - 2017	NASA
Précipitations / GPM	2000 - 2017	NASA

TABLEAU 9.1. Données utilisées pour la validation des précipitations

1.1.1. Extraction des variables explicatives : topographies et NDVI

Les valeurs des altitudes comme variables explicatives des précipitations ont été extraites à partir du modèle numérique du terrain (MNT) sur des fenêtres centrées et excentrées (fig. 9.1). L'extension des fenêtres dans toutes les directions est comprise entre 1 km et 32 km autour de chaque station pluviométrique. Pour l'indice de végétation normalisé (NDVI), nous avons utilisé les images satellites MODIS MOD13A3 à résolution spatiale d'un km pour l'extraction des valeurs moyennes annuelles de chaque station.

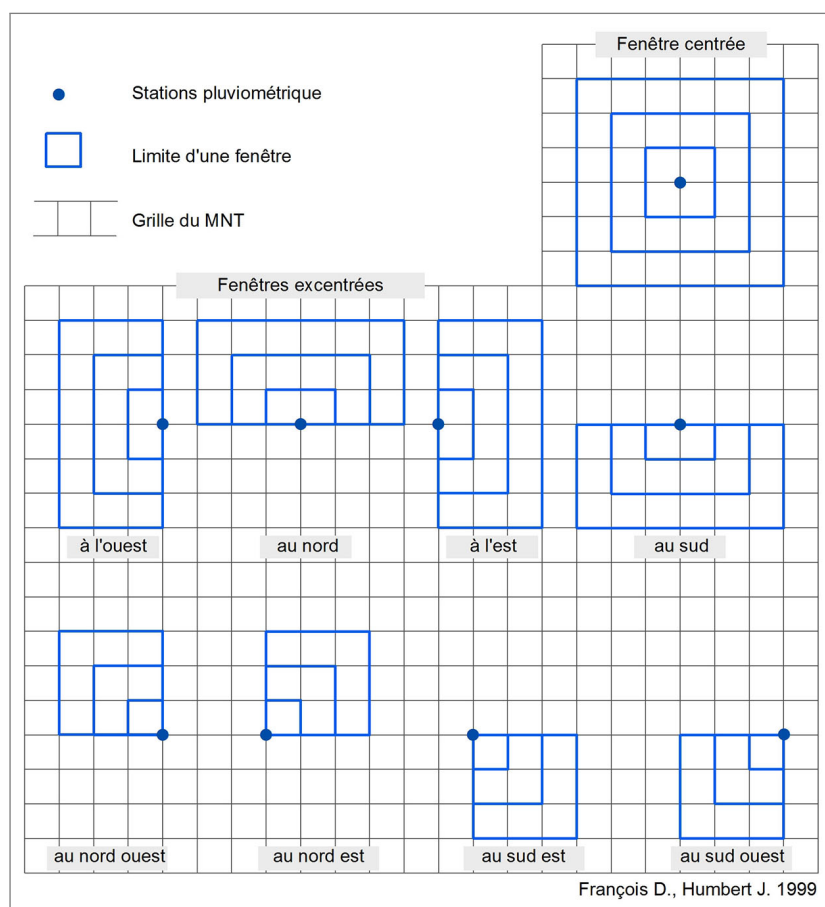


FIGURE 9.1. Fenêtres utilisées pour l'extraction des valeurs des altitudes

1.2. Méthode de calcul des précipitations

Pour la spatialisation des précipitations sur la zone d'étude, nous avons utilisé le modèle statistique qui se base sur les régressions multiples/ approche multicritère. Ces dernières ont été calculées pour 20 stations à 126 prédicteurs. Dans un premier temps, nous avons organisé les données des précipitations aux stations durant la période 1974-2017 (variables expliquées) et les données des altitudes et de NDVI (variables explicatives).

L'approche multicritère suppose une méthode pour sélectionner parmi l'ensemble des prédicteurs déterminés a priori ceux qui expliquent le mieux la variance des précipitations. L'optimisation de la relation entre précipitations et prédicteurs se fait via un modèle de régressions multiples dont certaines méthodes sélectionnent la meilleure combinaison de prédicteurs comme les procédures Best Subsets Regression de Minitab ou la régression PLS (Partial Least Squares Regression). À partir des prédicteurs sélectionnés, la valeur de la pluie en tout point de l'espace considéré est calculée par l'équation 5 tableau 9.2.

Indicateur	Formule	N°
Regression multiple	$Y = a_1 * X_1 + a_2 * X_2 + \dots a_n * X_n + \varepsilon$	(5)

TABLEAU 9.2. Regression multiple

Dans notre approche, nous avons procédé en plusieurs étapes afin de construire un modèle à régressions multiples. Nous basant sur les travaux de Qadem à propos de la définition d'une région homogène à partir de l'application de la méthode du vecteur régional nous avons repris les 19 postes qu'il a utilisés auxquels nous avons ajouté le poste de l'Aguelmam Sidi Ali. Ce poste avait été rejeté de la zone avec 66 % de correspondance au vecteur régional, mais de notre point de vue il est situé sur une position stratégique compte tenu de son altitude et de sa localisation géographique en bordure sud-ouest du notre secteur d'intérêt. Au total, le modèle reposera sur les données enregistrées aux 20 postes pluviométriques.

La deuxième étape a été de sélectionner les 126 prédicteurs topographiques, la localisation x, y des stations et le NDVI. La 3ème est la standardisation de ces variables par l'utilisation de l'équation 6 tableau 9.3.

Indicateur	Formule	N°
Standardisation	$X'_i = \frac{(X_i - \bar{X})}{\delta_x}$	(6)

TABLEAU 9.3. Standardisation des variables

avec X'_i : variable standardisée \bar{X} : moyenne de la variable δ : écart type de la variable

L'étape suivante consiste à tester la colinéarité de toutes ces variables à partir d'une matrice de corrélation. Après le filtrage des variables, il ne subsiste qu'une banque de 20 prédicteurs, à partir desquelles nous construisons un modèle de régression linéaire expliquant le mieux possible la variabilité spatiale des précipitations. Parmi les méthodes d'optimisation des modèles, c'est-à-dire de recherche des meilleurs prédicteurs, nous avons utilisé la méthode ascendante pas à pas qui consiste à ajouter un prédicteur après l'autre. Le choix du meilleur modèle est arrêté sur la base critère BIC (Bayesian Information Criterion) et sa validation se fait le R^2 de la variance expliquée par ce modèle. Cette démarche s'appuie sur les méthodes exposées dans l'ouvrage "Régression avec R" de (Cornillon et al., 2019).

Pour les trois périodes choisies pour la modélisation spatiale des précipitations dans notre domaine d'étude, les moyennes 1974-2017, 1974-1977 et 2014-2017 les résultats sont les suivants.

La distribution des pluies (fig. 9.2) illustre la baisse des précipitations dans le Moyen Atlas sur la période récente ; les valeurs moyennes calculées sont respectivement de 502 mm, 555 mm et 427 mm.

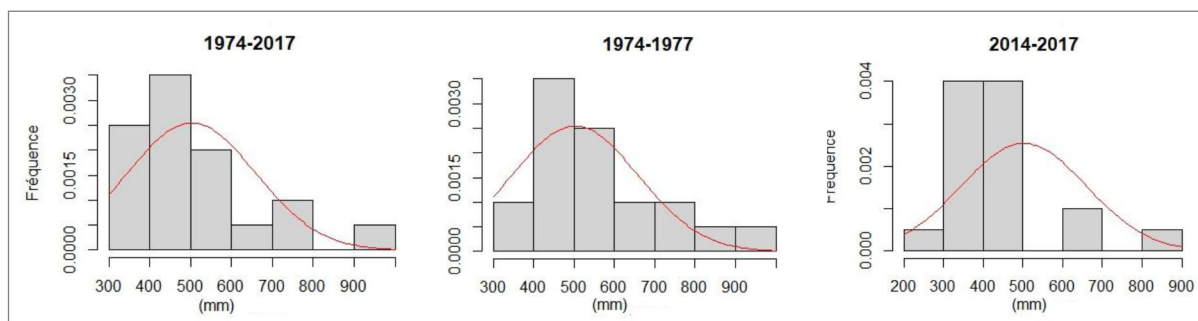


FIGURE 9.2. Histogrammes des pluies moyennes sur les trois périodes

En préalable à l'élaboration du modèle de régression multiple, nous nous sommes fixé une

limite de 6 prédicteurs. En effet, nous souhaitons conserver une certaine interprétabilité des facteurs explicatifs de la variabilité des précipitations. Les figures 9.3 et 9.4 des critères R^2 et BIC illustrent pour chacune des années le poids de chaque prédicteur dans l'explication de la variance.

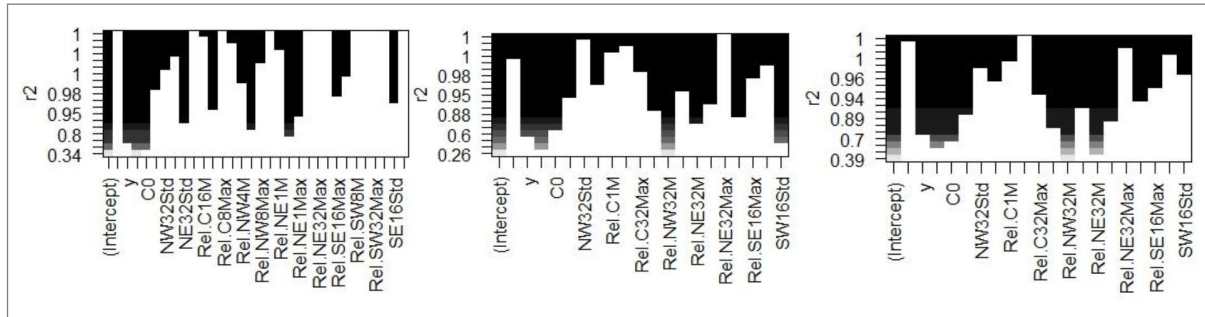


FIGURE 9.3. Le choix des prédicteurs selon le critère R^2

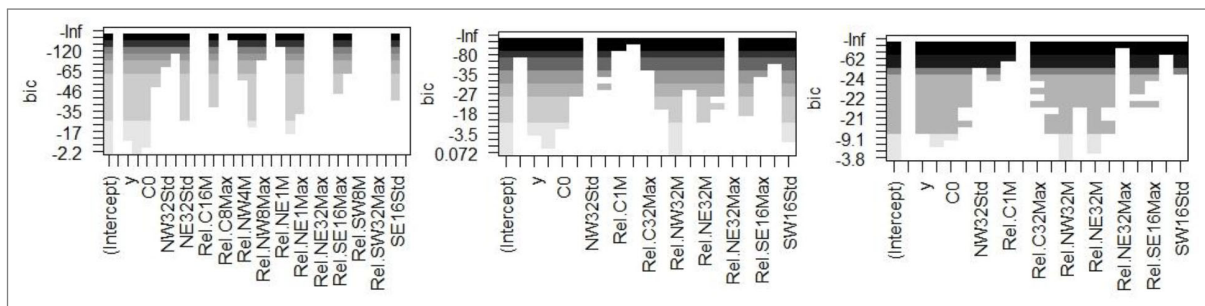


FIGURE 9.4. Le choix des prédicteurs selon le critère BIC

Il apparaît (tableau 9.4) que pour les trois périodes 5 prédicteurs sur 6 sont les mêmes. Il est intéressant d'émettre des hypothèses quant à leur signification du point de vue de la variabilité des pluies sur le domaine moyen atlasique. L'altitude du lieu C0 est un facteur d'augmentation des précipitations ce qui est cohérent d'une manière générale avec la connaissance que l'on a de l'effet orographique sur les précipitations. Le prédicteur "Rel.NW32M" qui renvoie à la différence relative d'altitude entre le point considéré et la moyenne des altitudes dans une fenêtre excentrée au nord-ouest sur 32 km semble décrire l'ampleur du phénomène orographique, car le plus souvent les masses d'air viennent de l'océan Atlantique situé au nord-ouest du Moyen Atlas.

Par contre le prédicteur "Rel.NE32M" affecté du signe négatif semble jouer dans le sens inverse des prédicteurs précédents et renverrait plutôt à un effet d'abris, d'assèchement des masses d'air. On note également que des 3 autres prédicteurs qui n'apparaissent qu'une fois dans les

1974/1977	(Intercept)	y	NDVI	C0	Rel.NW32M	Rel.NE32M	SW16Std
	-1283.51	0.01	49.82	194.02	232.61	-92.35	58.68
1974/2017	(Intercept)	y	NDVI	C0	NE32Std	Rel.NW32M	Rel.NE32M
	-1411.45	5.33E-03	110.36	300.12	-48.25041	143.73	-126.74
2014/2017	(Intercept)	y	NDVI	C0	Rel.NW4M	Rel.NW32M	Rel.NE32M
	-918.98	0.00	90.76	219.62	34.1599	124.27	-92.36

TABLEAU 9.4. Équations du modèle

équations du modèle, ceux renvoyant aux altitudes à l'ouest du domaine sont affectés du signe positif et celui situé à l'est du signe négatif; ceci va également dans le sens des arguments précédents sur l'effet d'abris ou d'exposition vis-à-vis des masses d'air provenant du nord-ouest.

Globalement, les résultats de la modélisation sont plutôt satisfaisants avec une variance expliquée respectivement à 92 %, 82 % et 88 % pour la période 1974-2017, 1974-1977 et 2014-2017 (fig. 9.5).

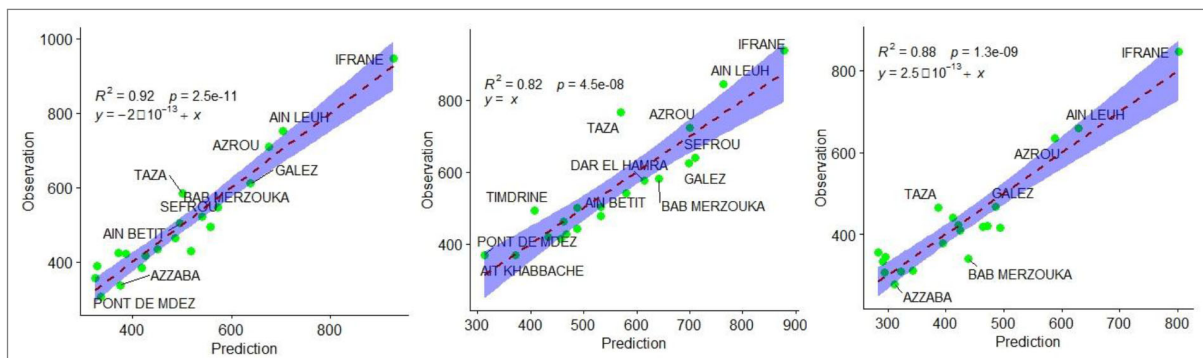


FIGURE 9.5. Comparaison entre les précipitations observées et les précipitations modélisées

Les valeurs du test de normalité de Shapiro-Wilk montrent qu'il n'y a pas de biais dans les résidus ce qui valide d'une certaine manière les modèles proposés. Certains auteurs (Cornet et al., 2005 ; Lhotellier, 2015) proposent de spatialiser les résidus pour passer à un modèle exact respectant les valeurs aux stations, mais nous faisons le choix de se satisfaire des résultats d'un modèle "approximatif", car il n'est pas certain que les résidus répondent à l'hypothèse d'autocorrélation spatiale.

1.3. Résultats de spatialisation des précipitations

Les résultats obtenus à partir de l'application du modèle sont utilisés, d'une part pour situer les périmètres irrigués dans le contexte pluviométrique du Moyen Atlas, mais également pour scruter l'assèchement de cette région depuis une quarantaine d'années nous avons souhaité étudier avec précision la variabilité spatiale des précipitations sur le domaine de l'étude. Pour cela, nous avons travaillé sur les moyennes interannuelles de 3 années : la période la plus ancienne 1974/1977 correspond à une série humide et 2014/2017 correspond à la série sèche récente.

Rappelons que les résultats obtenus à partir de l'analyse statistique des séries pluviométriques montrent une baisse remarquable des précipitations depuis les années 1980. La spatialisation des précipitations dans le Moyen Atlas tabulaire et ses bordures entre 1974 et 2017 indique une nette diminution des apports pluviométriques. Les cartes (figs. 9.6 à 9.8) illustrent parfaitement la variation spatiale des précipitations.

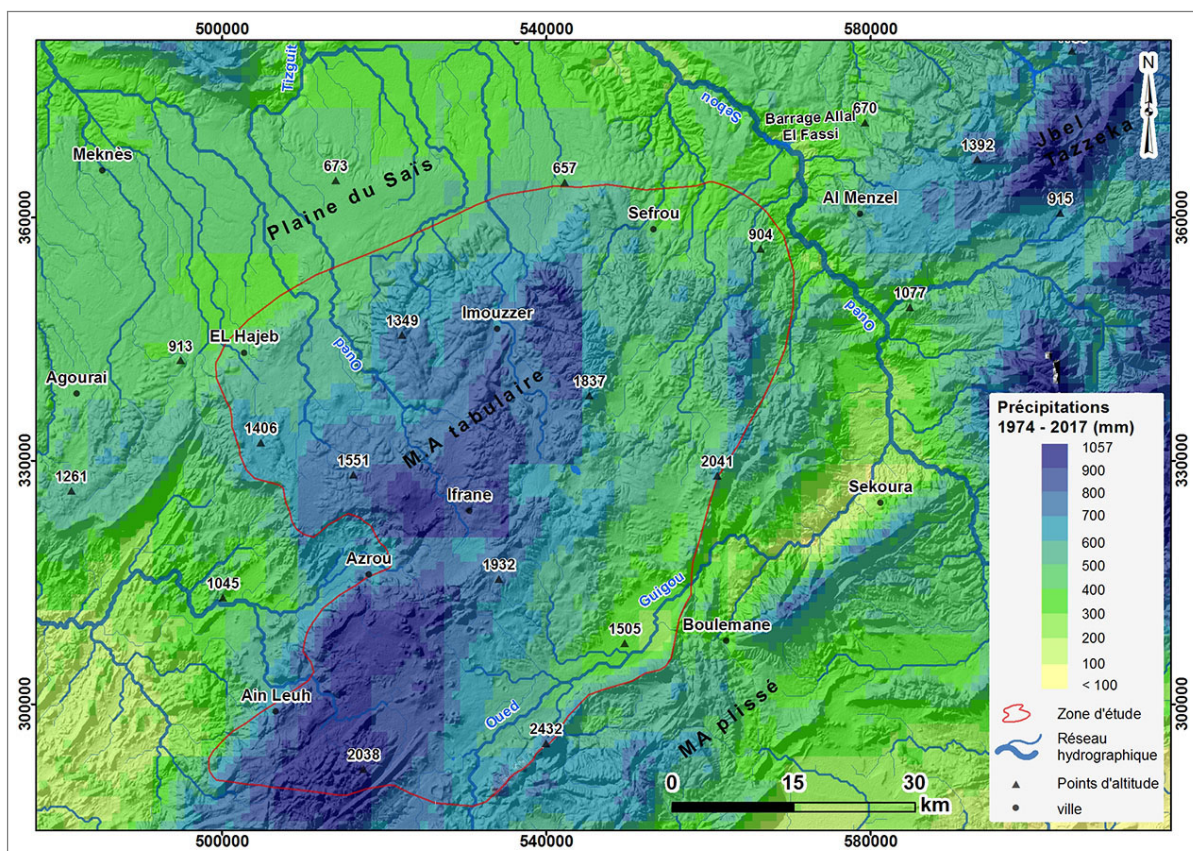


FIGURE 9.6. Carte des précipitations moyennes 1974 - 2017

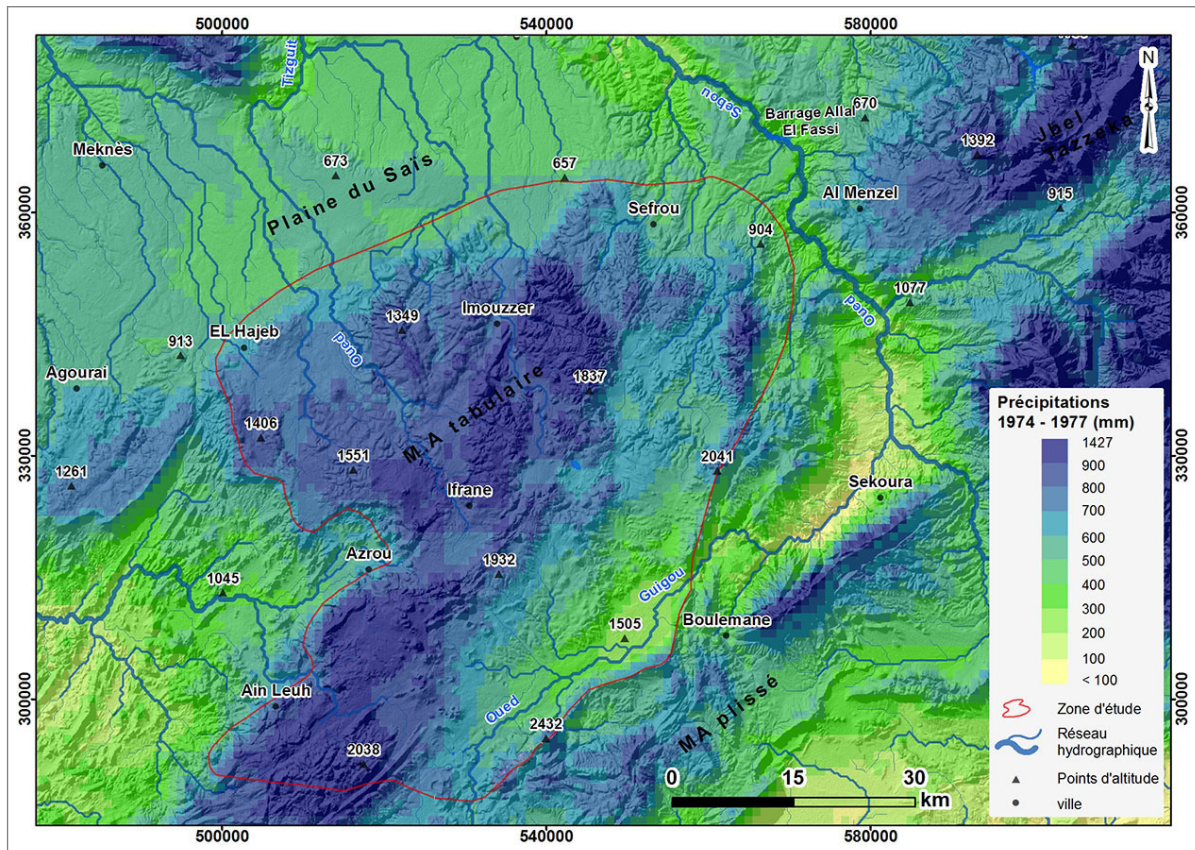


FIGURE 9.7. Carte des précipitations moyennes 1974 - 1977

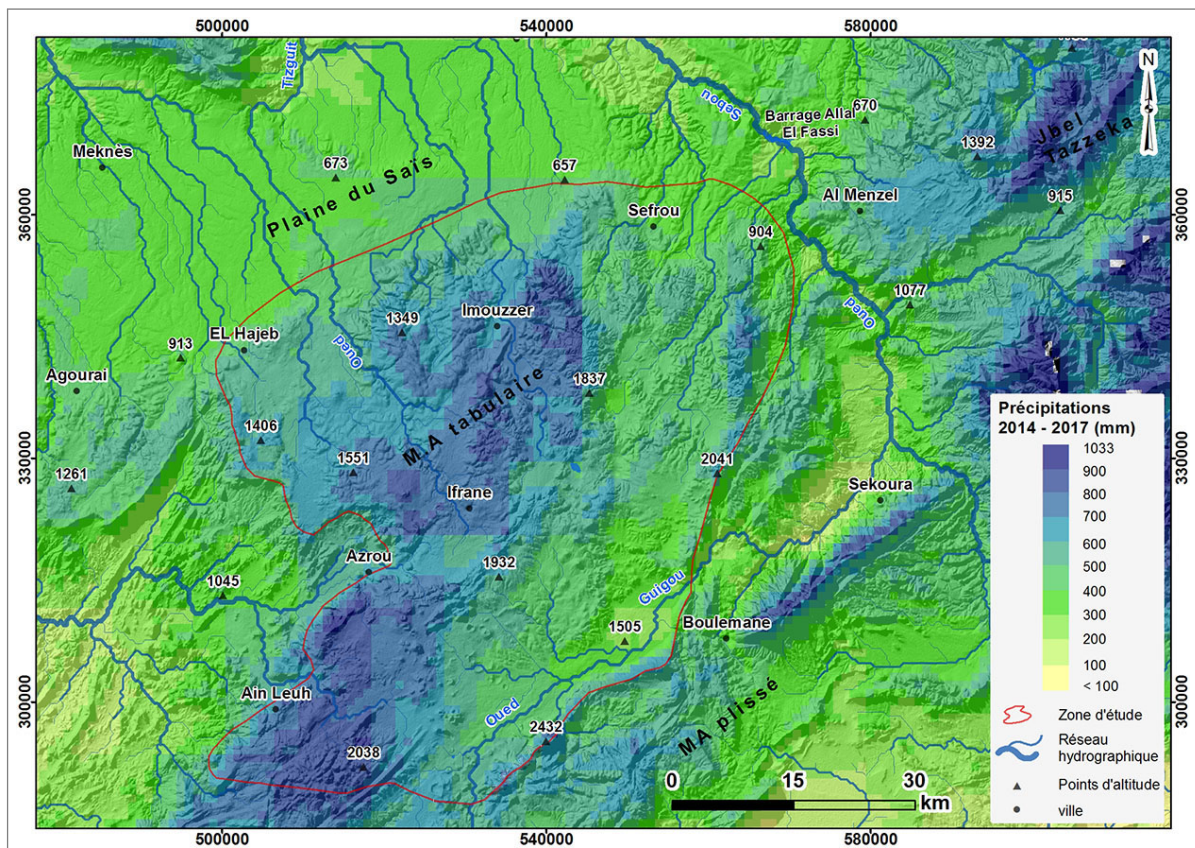


FIGURE 9.8. Carte des précipitations moyennes 2014 - 2017

La comparaison entre deux périodes, 1974/1977 et 2014/2017 nous a permis de mieux identifier la forte régression des précipitations sur le Moyen Atlas tabulaire. Le choix de ces périodes est effectué sur la base des résultats des tests statistiques que nous avons appliqués dans le chapitre 8 (CUSUM, indice de Nicholson, segmentation de Hubert). En effet, la première période (1974/1977) se situe dans une période humide, tandis que la deuxième (2014/2017) se trouve dans une période sèche. L'observation de la carte (fig. 9.7) permet de mettre en lumière que la zone d'étude a enregistré une quantité importante des précipitations entre 1974 et 1977. En revanche, la carte (fig. 9.8) indique une régression préoccupante des précipitations par rapport la première période.

La spatialisation des précipitations sur le Moyen Atlas montre que cette partie du Maroc a subi une forte perturbation au niveau des précipitations enregistrées entre 1974 et 2017.

2. L'étude de la variation des étages bioclimatiques

Parmi les nombreux indices permettant de caractériser l'ambiance climatique, nous avons retenu le quotient pluviothermique Q_2 d'Emberger qui offre deux avantages. Le premier est qu'il utilise pour son calcul des variables facilement accessibles : les températures moyennes mensuelles des extrêmes hivernales et estivales, et la pluviométrie annuelle. Le deuxième est qu'Emberger a mis au point le quotient Q_2 au Maroc. En outre, le quotient d'Emberger est considéré parmi les indices bioclimatiques les plus utilisés en Afrique du Nord et en région Méditerranée (Emberger, 1955 ; Gaussen, 1954 ; Le-Houérou, 1989 ; Sauvage, 1962).

Pour étudier l'évolution spatiotemporelle du quotient pluviothermique d'Emberger (Q_2) à l'échelle du Moyen Atlas et ses bordures nous avons spatialisé les valeurs de température et de précipitation à une résolution du km. En effet, le Q_2 d'Emberger est considéré parmi les indices qui permettent la caractérisation de l'ambiance climatique.

Pour les précipitations, nous avons utilisé celles issues de l'application du modèle sur l'ensemble du Moyen Atlas tabulaire et ses bordures. Pour la température, le gradient thermique a été calculé.

2.1. La spatialisation de la température

Afin d'établir le mieux possible les gradients thermiques verticaux existants dans le Moyen Atlas et ses bordures, différentes valeurs ont été utilisées : moyennes annuelles, moyennes mensuelles ou mois particuliers chauds ou froids (fig. 9.9). Bien que les valeurs des dix stations s'organisent bien selon l'altitude ($R^2 > 0.90$ pour toutes les séries testées) ils simplifient la réalité (El-Bouhali et al., 2021c). En effet Delannoy et al. (1979) ont montré que les valeurs des gradients thermiques dans le Moyen Atlas sont variables à la journée en fonction des types de temps et qu'il existe une différence entre la partie occidentale et orientale. Néanmoins si les gradients de l'ordre de $0.4^\circ \text{C}/100 \text{ m}$ n'expriment pas la totalité de la complexité entre topographie/exposition et température, ils doivent malgré tout refléter une certaine permanence qui prévaut à l'échelle mensuelle. La spatialisation des températures sur l'ensemble du Moyen Atlas s'est faite en appliquant un gradient thermique de $0.44^\circ \text{C}/100 \text{ m}$ à partir des valeurs enregistrées à la station de Fès.

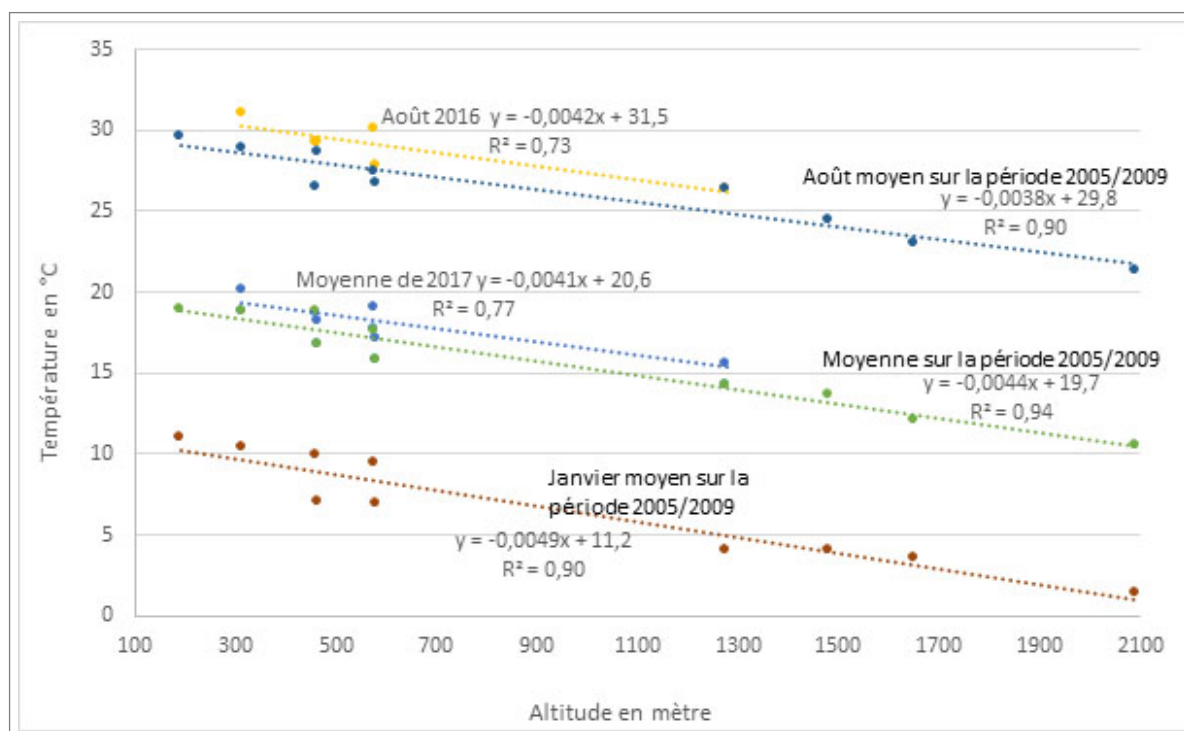


FIGURE 9.9. Gradients de températures dans le Moyen Atlas

Classiquement, la spatialisation des températures sur tout le domaine s'est appuyée sur des gradients thermiques. Une des difficultés rencontrées a été de valoriser en termes de gradient thermique les données fortes disparates en notre possession. Ces données couvrent néanmoins

près d'un siècle et proviennent de stations réparties le long d'un gradient altitudinal de 2000 m.

2.2. Résultats d'application du quotient pluviothermique d'Emberger

L'évolution constatée à la station de Fès est représentative de la tendance à l'échelle du Moyen Atlas où l'on constate une diminution globale des quotients Q_2 , notamment entre la période 1974/1979 et la période 2012/2017 (figs. 9.10 et 9.11) avec respectivement comme valeur maximale sur le domaine étudié 128 et 100. Cette tendance vers l'aridité du domaine se retrouve également à la station d'Ifrane dont la valeur est placée à 100 pour la période 1960/70 (Daget, 1977) et qui est calculé à 80 par notre modèle pour la dernière décennie.

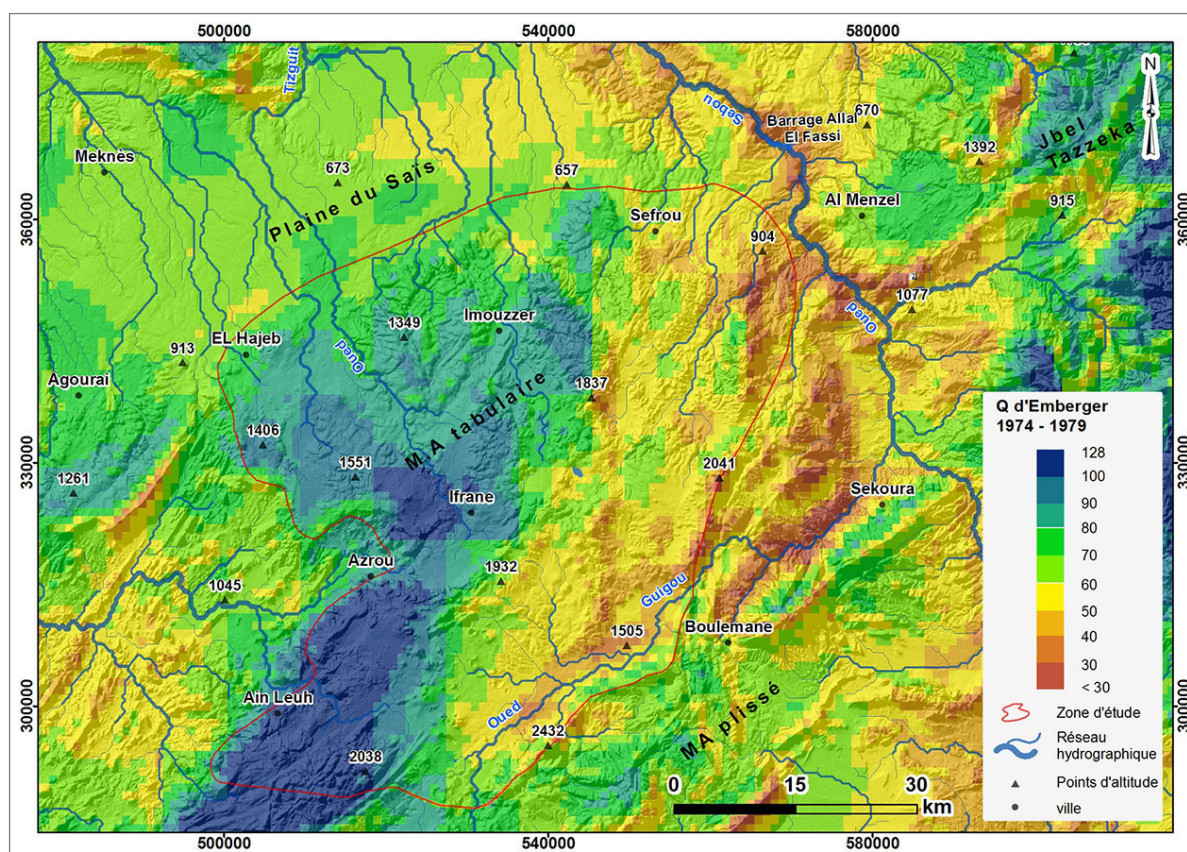


FIGURE 9.10. Moyenne de Q_2 sur la période 1974/79

Au final, sur la période récente (1975-2017), les variations du quotient pluviothermique d'Emberger mettent en lumière les changements dans la répartition des bioclimats au sein du Moyen Atlas et ses bordures. Ils deviennent de moins en moins favorables à l'agriculture. Ceci pose le problème de l'ajustement des systèmes agricoles à ces nouveaux contextes bioclimatiques, ce qui est un élément d'explication de la pression croissante sur la ressource en eau que l'on

observe actuellement à l'échelle des périmètres irrigués du Moyen Atlas.

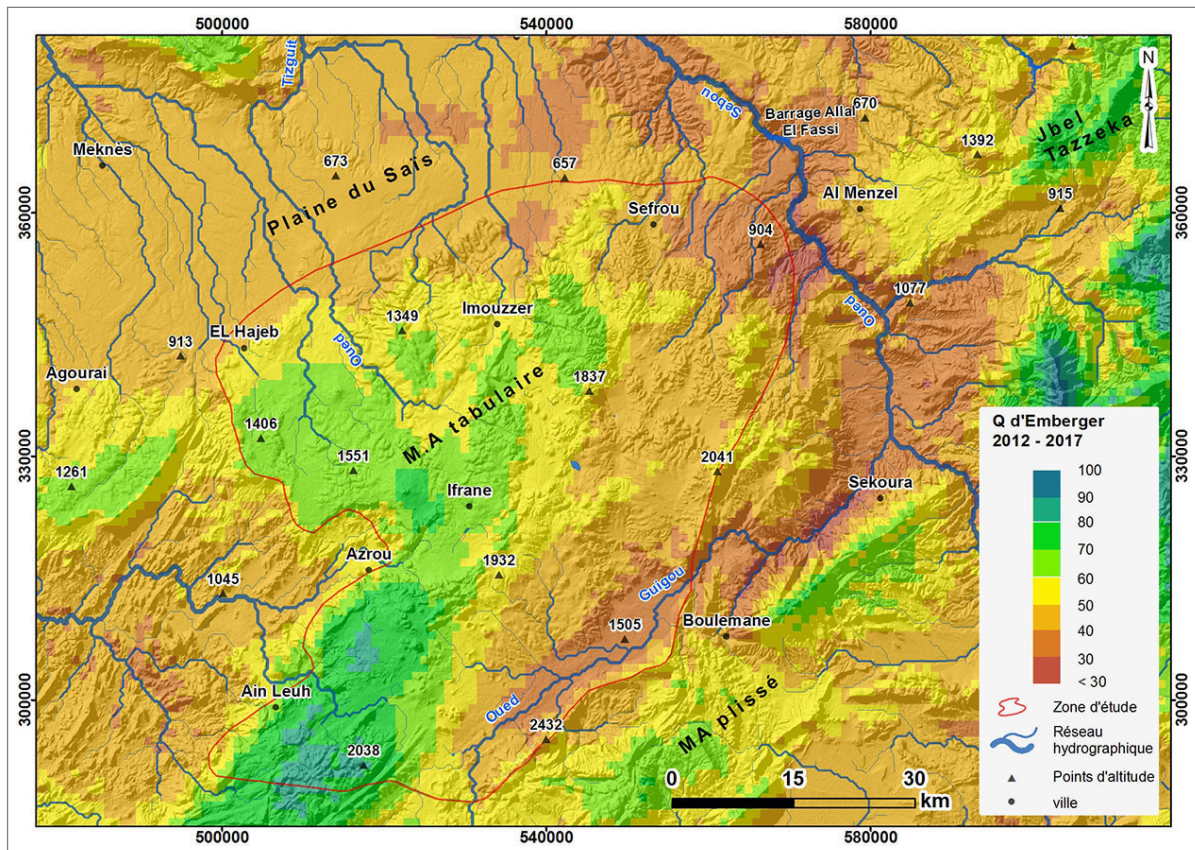


FIGURE 9.11. Moyenne de Q2 sur la période 2012/2017

Ainsi, l'utilisation couplée des valeurs de précipitations et de températures a montré une aridification du Moyen Atlas depuis une quarantaine d'années. Située dans des secteurs peu propices du point de vue des conditions hydriques, cette agriculture a pu compter sur l'eau exogène via les cours d'eau ou par une surexploitation des nappes. Pour autant, les prévisions à l'échelle du bassin méditerranéen indiquent pour les décennies à venir une diminution continue des précipitations.

3. La validation des précipitations satellitaires

Les précipitations sont une des plus importantes variables météorologiques de forçage dans l'hydrologie en général. Pour autant, la pluviométrie est mal connue du fait de la faible densité des postes de mesure au sol. Les données des précipitations dérivées des mesures satellitaires sont de plus en plus utilisées dans les travaux d'hydrologie du fait du manque, de l'absence ou de la difficulté à avoir des données suffisamment denses (Milewski et al., 2015).

3.1. Précipitations satellitaires TRMM et GPM

Avec l'évolution des recherches sur le climat et pour répondre aux besoins des données climatiques notamment les précipitations dans certaines régions du globe, des satellites TRMM et GPM ont été lancés depuis plusieurs années par l'agence spatiale américaine (NASA) et l'agence nationale de développement spatial du Japon (NASDA, puis JAXA). Ces satellites fournissent des observations mondiales (GPM) et tropicales des précipitations (TRMM). Ces données sont disponibles gratuitement sur le site de la NASA (Giovanni) avec une résolution spatiale (varie entre 0.1° pour GPM et 0.25° pour TRMM) et temporelle (quotidien et mensuel) variables.

Différents types de précipitations dérivées de satellites ont été développés comme the Climate Precipitation Center Morphing Method (CMORPH) (Joyce et al., 2004), le Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), le Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) (Huffman et al., 2007) et l'Integrated Multi-Satellite Retrievals for Global Precipitation Measurement (GPM) mission (IMERG) (Hou et al., 2014). Plusieurs études comparatives à l'échelle du globe (Abdelhamid et al., 2009 ; Arvor et al., 2008 ; El-Bouhali et al., 2020 ; Huffman et al., 2007 ; Shimelis et al., 2015 ; Skofronick-Jackson et al., 2018 ; Wang et al., 2017 ; Wu et al., 2021a ; Yang et al., 2017) et plus spécifiquement sur le pourtour méditerranéen (Tramblay et al., 2016) montrent que les précipitations TMPA présentent les meilleurs résultats. Aussi, un nombre très important des recherches porte sur la comparaison entre les produits satellitaires (Ezzine et al., 2014 ; Fang et al., 2019).

Le TRMM 3B42 est un des produits de TMPA (TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis), qui a été lancé le 27 novembre 1997 par la NASA avec la collaboration de l'Agence Spatiale Japonaise (JAXA). Après 17 années de production, TRMM a été arrêté le 8 avril 2015 et a été remplacé par les produits GPM. Ces produits ont fait l'objet d'évaluation dans différentes régions du monde, des milieux secs (Wang et al., 2018), humides (Michot et al., 2018) et ont montré le potentiel de cette nouvelle source de données. Cependant, peu d'études ont été faites sur l'utilisation des pluies satellites dans la région méditerranéenne et plus spécifiquement au Maroc. On peut citer Milewski et al. (2015) qui ont travaillé à l'échelle de tout le Maroc, mais sur des valeurs annuelles et Tramblay et al. (2016) qui ont travaillé sur le bassin du Loukkos sur des

moyennes mensuelles et de manière indirecte sur la validation de modèles hydrologiques. Un travail d'évaluation des précipitations TRMM a été mené plus au sud dans la zone semi-aride de l'amont du bassin de l'Oum Er Rbia [Ouatiki et al. \(2017\)](#) et montre une bonne estimation des précipitations à l'échelle mensuelle et annuelle exceptée pour les régions montagneuses.

L'apparition des données mesurées par les satellites et les données modélisées à l'échelle globale a conduit à l'essor des études comparatives avec les mesures aux stations climatiques. En effet, les données des précipitations satellitaires ont une vocation globale et généraliste, et leurs performances peuvent varier d'une région à l'autre. En conséquence, en préalable à toute utilisation, l'évaluation de ces produits avec des mesures fiables et indépendantes est nécessaire pour prendre en compte l'incertitude associée ([El-Bouhali et al., 2020](#)). Dans ce travail, les deux types de données (TRMM et GPM) font l'objet d'une évaluation avec les mesures au sol à l'échelle mensuelle et annuelle entre 2000 et 2017. L'évaluation et la validation concernent 15 stations climatiques situées dans le Moyen Atlas et ses bordures afin de vérifier la pertinence des produits satellitaires dans des milieux différents.

3.2. La mesure de performance des précipitations satellitaires

Pour mesurer la performance des précipitations (tableau 9.5), nous avons appliqué plusieurs indices statistiques (PCC, R^2 , MAE, NSE, PBIAS et RMSE) largement utilisés dans les recherches scientifiques ([Fang et al., 2019](#) ; [Herrnegger et al., 2018](#) ; [Li et al., 2018](#) ; [Wang et al., 2017](#)). Ci-après (tableau 9.6) une présentation des indices adoptés pour évaluer les différents produits des précipitations. Actuellement, les produits de précipitation satellitaires offrent une alternative aux estimations des précipitations au sol ([Li et al., 2018](#)). Mais l'utilisation des précipitations satellitaires nécessite une évaluation rigoureuse par l'application des indices statistiques pour représenter quantitativement le degré d'accord entre les données issues des satellites et celles issues des mesures aux stations.

3.3. Résultats de l'évaluation des précipitations satellitaires et les précipitations mesurées aux stations

Pour montrer le degré d'accord entre les précipitations mesurées par l'ABHS et celles mesurées par les satellites TRMM et GPM, nous avons utilisé six indices statistiques largement adoptés

Données	Période	Source
Précipitations / stations	1975 - 2017	ABHS
Précipitations / TRMM	2000 - 2017	NASA
Précipitations / GPM	2000 - 2017	NASA

TABLEAU 9.5. Données utilisées pour la validation des précipitations

Indicateurs	Formules	N°
Coefficient de corrélation	$CC = \frac{\sum[(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})]}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 * (y_i - \bar{y})^2}}$	(7)
Coefficient de détermination	$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}$	(8)
Pourcentage de biais	$PBias = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - G_i)}{\sum_{i=1}^n S_i} * 100$	(9)
Erreur quadratique moyenne relative	$RRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{H}_d^{i,m} - \bar{H}_d^{i,c})^2}}{\sum_{i=1}^n \bar{H}_d^{i,m}} * 100$	(10)
Erreur moyenne absolue	$MAE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i - \bar{y}_i }$	(11)
Coefficient d'efficacité du modèle de Nash-Sutcliffe	$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (OBS_i - SIM_i)^2}{\sum_{i=1}^n (OBS_i - \bar{SIM})^2}$	(12)

TABLEAU 9.6. Les indices statistiques utilisés pour évaluer les précipitations

par les chercheurs. Le coefficient de corrélation de Pearson (CC), le coefficient de détermination (R^2), le pourcentage de biais (PBias), l'erreur quadratique moyenne relative (RRMSE), l'erreur moyenne absolue (MAE) et le Coefficient d'efficacité du modèle de NashSutcliffe (NSE) sont définis par les formules présentées dans le (tableau 9.6) et calculées par l'utilisation de RStudio.

Dans notre étude, l'évaluation des précipitations a été menée sur des échelles mensuelles et annuelles sur 15 stations climatiques à partir de 2000 à 2017. Les résultats obtenus montrent une bonne performance entre les différents produits. Les tableaux ci-dessous (tableaux 9.7 à 9.10) mettent en évidence les résultats de la comparaison entre les produits. Le coefficient de corrélation (CC) et le coefficient de détermination (R^2) sont également donnés par les figures suivantes (figs. 9.12 à 9.16).

Stations	PCC	R²	MAE	NSE	PBIAS	RRMSE
Aguelmam Sidi Ali	0.79	0.63	89.32	0.25	18.20	0.05
Dar El Arsa	0.94	0.88	166.27	-0.13	35.70	0.07
Azzaba	0.84	0.71	234.08	-3.57	62.90	0.10
Ain Bettit	0.94	0.88	131.32	0.28	23.90	0.05
Fès	0.91	0.82	202.50	-0.44	46.20	0.08
Hajria	0.89	0.79	85.26	0.76	-6.90	0.05
Dar El Hamra	0.88	0.77	102.82	0.14	21.10	0.05
Ifrane	0.95	0.91	326.05	0.08	-32.30	0.18
Alt Khabbach	0.88	0.78	246.92	-5.62	64.10	0.10
Pont Mdez	0.79	0.63	288.86	-3.33	84.70	0.12
El Mers	0.86	0.73	122.51	-0.14	27.00	0.06
Bab Marzouka	0.83	0.69	87.16	0.67	-5.40	0.06
Sidi Moukhfi	0.90	0.81	172.92	0.55	20.20	0.08
Bab Ouender	0.95	0.91	93.25	0.79	-10.30	0.06
Ain Timdrine	0.94	0.88	202.46	-3.19	49.50	0.08

TABLEAU 9.7. Comparaison entre les précipitations aux stations et les précipitations GPM V6 à l'échelle annuelle

Stations	PCC	R²	MAE	NSE	PBIAS	RRMSE
Aguelmam Sidi Ali	0.77	0.60	18.61	0.48	18.20	0.040
Dar El Arsa	0.95	0.90	15.58	0.75	35.70	0.03
Azzaba	0.82	0.67	22.13	-0.118	62.90	0.047
Ain Bettit	0.93	0.87	15.58	0.77	23.30	0.03
Fès	0.91	0.82	20.15	0.58	46.10	0.038
Hajria	0.93	0.87	14.66	0.86	-6.40	0.03
Dar El Hamra	0.86	0.73	14.86	0.63	21.10	0.036
Ifrane	0.93	0.86	30.12	0.66	-32.30	0.09
Alt Khabbach	0.65	0.42	29.67	-0.94	64.10	0.054
Pont Mdez	0.46	0.21	32.94	-2.80	103.90	0.07
El Mers	0.80	0.64	18.32	0.37	27.00	0.038
Bab Marzouka	0.87	0.76	14.83	0.74	-5.40	0.05
Sidi Moukhfi	0.83	0.68	24.67	0.66	10.00	0.046
Bab Ouender	0.94	0.88	16.33	0.85	-10.30	0.04
Ain Timdrine	0.83	0.68	19.42	0.16	47.10	0.043

TABLEAU 9.8. Comparaison entre les précipitations aux stations et les précipitations GPM V6 à l'échelle mensuelle

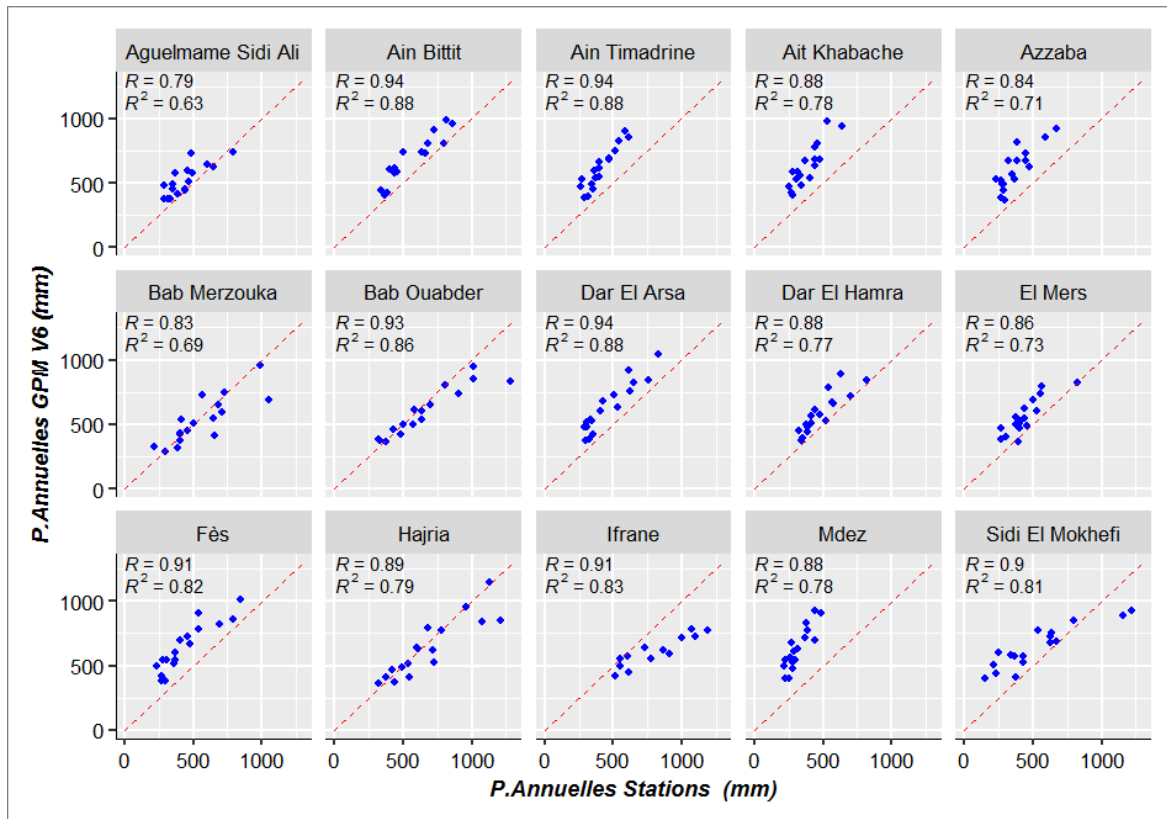


FIGURE 9.12. Régression des valeurs mesurées / valeurs GPM V6 annuelles

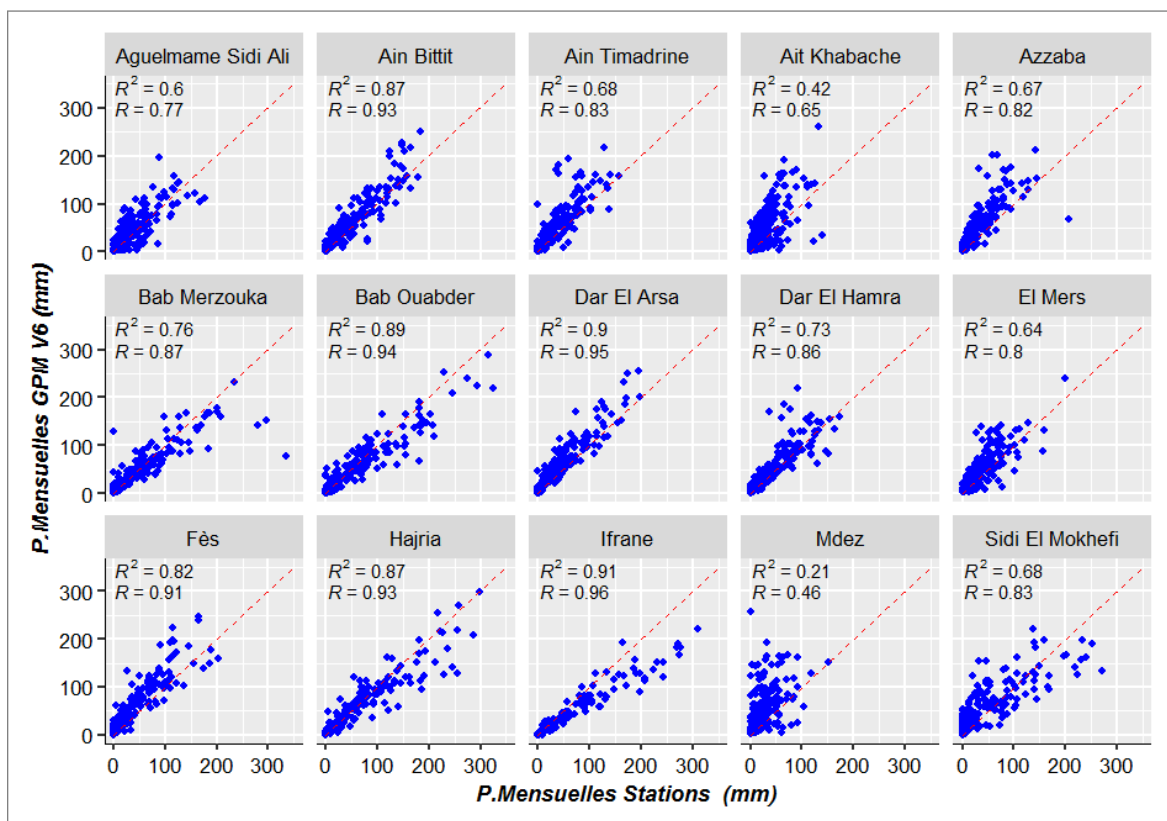


FIGURE 9.13. Régression des valeurs mesurées / valeurs GPM V6 mensuelles

Stations	PCC	R ²	MAE	NSE	PBIAS	RRMSE
Aguelmam Sidi Ali	0.62	0.39	112.43	-0.21	21.30	0.07
Dar El Arsa	0.94	0.88	145.22	0.11	31.20	0.06
Azzaba	0.86	0.74	252.53	-4.23	67.90	0.10
Ain Bettit	0.93	0.86	108.30	0.48	18.90	0.05
Fès	0.87	0.76	183.46	-0.29	41.50	0.08
Hajria	0.89	0.80	88.30	0.74	-8.50	0.05
Dar El Hamra	0.76	0.58	139.89	-0.74	28.80	0.07
Ifrane	0.91	0.82	342.63	-0.04	-34.00	0.20
Alt Khabbach	0.87	0.75	222.82	-4.28	57.80	0.09
Pont Mdez	0.87	0.75	222.82	-4.28	57.80	0.09
El Mers	0.72	0.52	279.87	-3.19	82.10	0.12
Bab Marzouka	0.74	0.55	124.11	-0.24	25.80	0.06
Sidi Moukhfi	0.82	0.67	92.65	0.63	-8.20	0.06
Bab Ouender	0.95	0.91	93.86	0.79	-11.10	0.06
Ain Timdrine	0.87	0.75	215.48	-3.97	52.70	0.09

TABLEAU 9.9. Comparaison entre les précipitations aux stations et les précipitations TRMM 3B43V7 à l'échelle annuelle

Stations	PCC	R ²	MAE	NSE	PBIAS	RRMSE
Aguelmam Sidi Ali	0.64	0.41	21.74	0.17	21.30	0.05
Dar El Arsa	0.94	0.89	14.28	0.78	31.20	0.03
Azzaba	0.82	0.68	23.54	-0.0347	67.90	0.04
Ain Bettit	0.94	0.88	14.42	0.83	18.30	0.03
Fès	0.90	0.81	18.96	0.59	41.40	0.03
Hajria	0.93	0.86	15.89	0.84	-8.50	0.03
Dar El Hamra	0.86	0.74	17.70	0.58	28.80	0.03
Ifrane	0.88	0.77	31.28	0.59	-34.00	0.10
Alt Khabbach	0.58	0.33	28.28	-0.80	57.80	0.05
Pont Mdez	0.76	0.58	26.51	-1.13	94.70	0.05
El Mers	0.74	0.55	19.52	0.32	25.80	0.04
Bab Marzouka	0.87	0.76	15.39	0.74	-8.20	0.05
Sidi Moukhfi	0.80	0.65	26.08	0.62	21.20	0.05
Bab Ouender	0.93	0.87	17.12	0.84	-11.10	0.04
Ain Timdrine	0.81	0.65	20.17	0.04	50.20	0.04

TABLEAU 9.10. Comparaison entre les précipitations aux stations et les précipitations TRMM 3B43V7 à l'échelle mensuelle

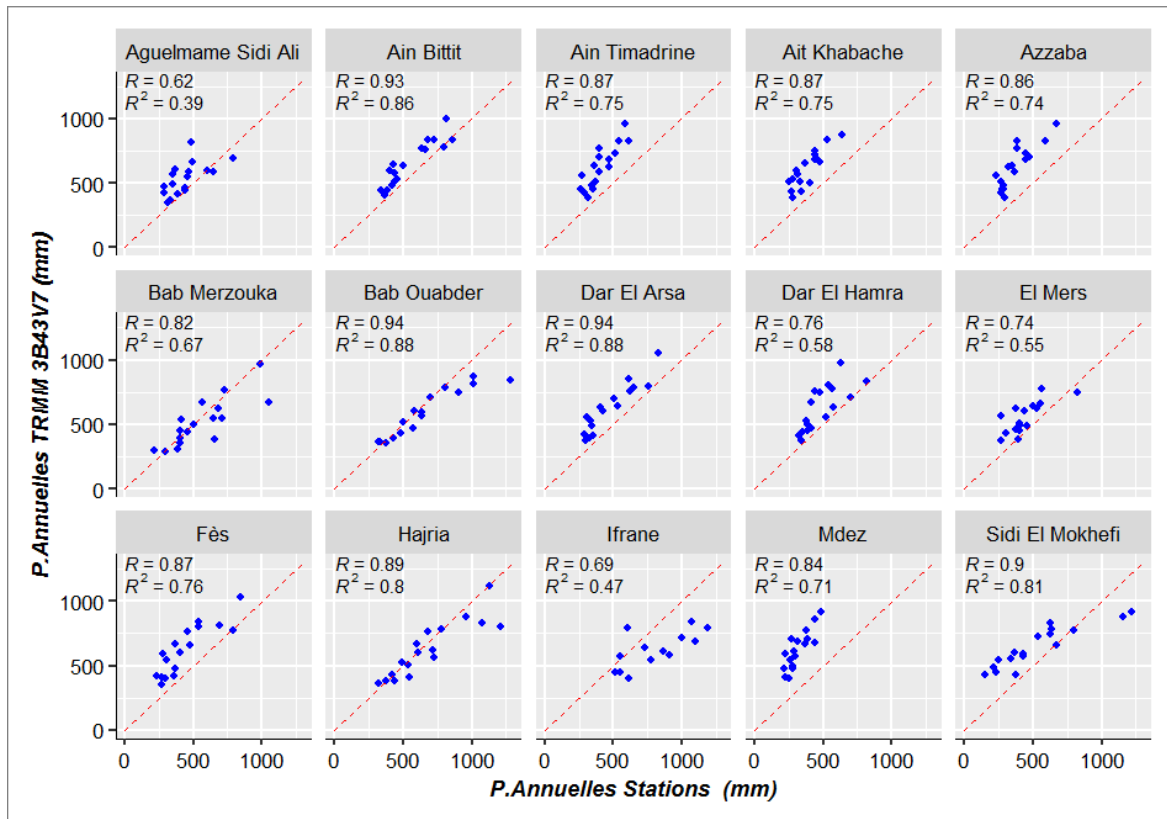


FIGURE 9.14. Régression des valeurs mesurées / valeurs TRMM 3B43V7 annuelles

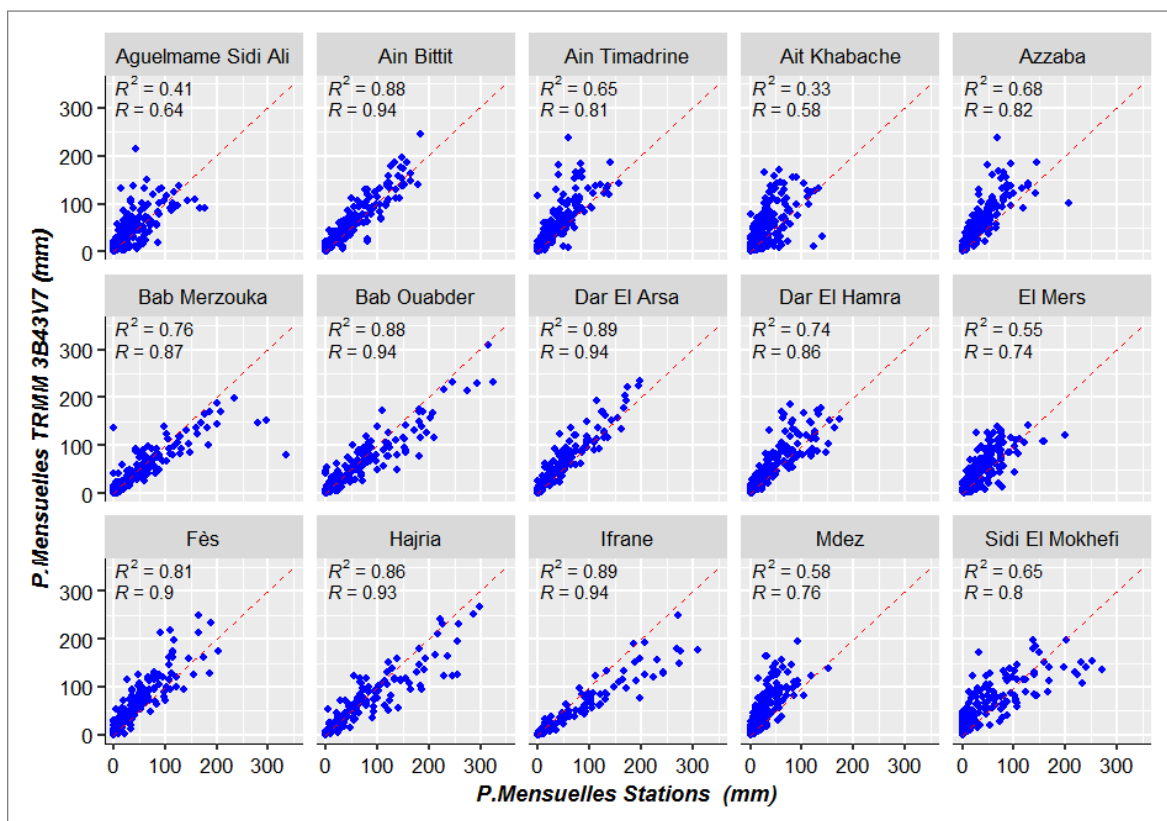


FIGURE 9.15. Régression des valeurs mesurées / valeurs TRMM 3B43V7

La comparaison entre les précipitations GPM 3IMERGPMV6 et les précipitations mesurées par les stations à l'échelle annuelle et mensuelle montre que les données sont comparables entre eux. Le coefficient de corrélation dépasse 0.9 dans plusieurs stations (Dar El Arsa, Ain Bittit, Fès, Ifrane, Sidi El Moukhfi, Bab Ouender et Ain Timdrine). Dans la plupart des stations, le coefficient atteint plus de 0.9 à l'exception de quelques-unes qui enregistrent des faibles valeurs.

> A l'échelle annuelle la valeur de corrélation varie entre 0.95 pour les stations d'Ifrane et de Bab Ouender et 0.79 pour les stations d'Aguelmam Sidi Ali et Pont de Mdez.

> A l'échelle mensuelle la valeur de corrélation oscille entre 0.95 pour la station de Dar El Arsa et 0.46 pour la station de Pont de Mdez.

La comparaison entre les précipitations TRMM 3B43V7 et les précipitations mesurées aux stations à l'échelle annuelle et mensuelle montre de bonnes performances. Le coefficient de corrélation R^2 dépasse 0.9 dans plusieurs stations (Dar El Arsa, Ain Bettit, Ifrane, Sidi El Moukhfi et Bab Ouender). Dans la plupart des stations, le coefficient atteint plus de 0.9 à l'exception de quelques-unes qui enregistrent des faibles valeurs.

> A l'échelle annuelle, la valeur de corrélation R^2 varie entre 0.95 pour la station de Bab Ouender et 0.62 pour la station d'Aguelmam Sidi Ali.

> A l'échelle mensuelle la valeur de corrélation R^2 oscille entre 0.94 pour les stations de Dar El Arsa et Ain Bittit et 0.58 pour la station d'Ait Khabach.

Globalement, les produits GPM présentent de meilleurs coefficients de corrélation avec les valeurs enregistrées aux stations par rapport aux précipitations TRMM : en moyenne un R^2 de 0.79 contre 0.71 à l'échelle annuelle et 0.75 contre 0.65 à l'échelle mensuelle. Pour ce qui concerne les valeurs de MAE, NSE, PBIAS et RRMSE sont comparables entre les deux jeux de données. Le premier constat de la comparaison entre les données est qu'il est préférable d'utiliser les produits GPM pour caractériser les précipitations sur le Moyen Atlas. Nous constatons également que les résultats obtenus varient d'une station à l'autre en fonction des conditions topographiques. C'est-à-dire les stations situées dans le Moyen Atlas tabulaire et dans le Rif se

caractérisent par un très bon coefficient de corrélation, par contre les stations situées dans le Moyen Atlas plissé présentent un faible coefficient de corrélation. Ceci soulève le problème de la capacité à spatialiser les précipitations à partir des observations au sol dans des topographies complexes.

3.4. Résultats de la comparaison entre les valeurs du modèle et les valeurs GPM annuelles pour 3 bassins versants du Moyen Atlas

La comparaison entre les données du modèle de quantification des précipitations et les résultats issus des précipitations satellites vont dans le même sens que les observations faites au niveau stationnel. Globalement, à l'échelle du bassin total du Haut Sebou les types de données, GPM et issues du modèle, s'accordent bien avec un R^2 de 0.92 et un biais un peu moins fort qu'en stationnel, de 20 % (fig. 9.16). De la même façon, les résultats pour les oueds Maasser et Zloul, inscrits dans le Moyen Atlas plissé sont moins bons.

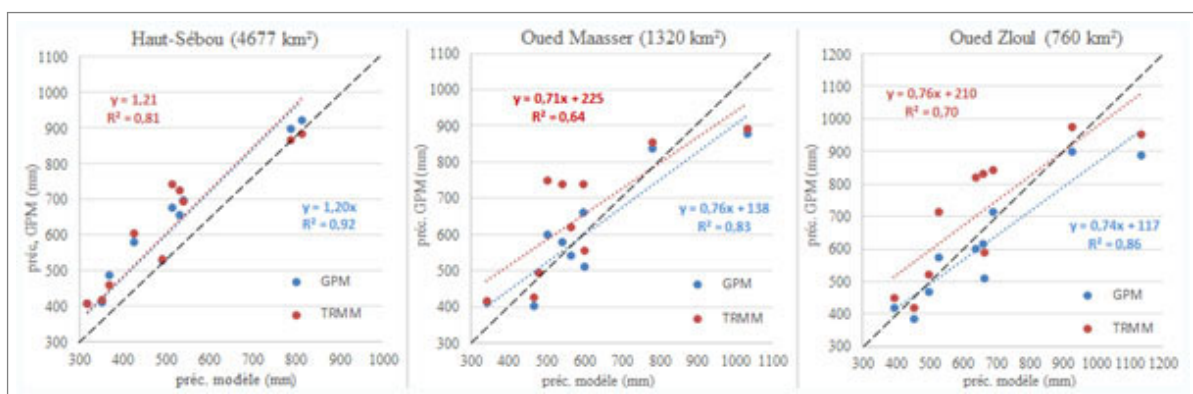


FIGURE 9.16. Régression valeurs modèles / valeurs GPM annuelles pour 3 bassins versants du Moyen Atlas

Conclusion

L'analyse des données pluviométriques sur le Moyen Atlas tabulaire et ses bordures montre que la quantité des précipitations a enregistré une diminution remarquable à partir des années 1980. Ce constat est reflété par les résultats obtenus d'après l'application de plusieurs tests statistiques (CUSUM, IP, segmentation de Hubert). Tous les tests indiquent que la période qui commence de 1980 jusqu'à 2017 est caractérisée par chute brutale des précipitations et une augmentation de nombre des années déficitaires. La spatialisation des précipitations suggère également que le Moyen Atlas et ses bordures ont connu une variation préoccupante des ap-

ports pluviométriques. En parallèle avec la baisse continue des précipitations et la hausse de la température, les étages bioclimatiques ont subi un déplacement important, cela est parfaitement visible sur les cartes issues de l'application du quotient d'Emberger. Le changement dans la répartition des bioclimats implique que les conditions de l'agriculture deviennent de moins en moins favorables.

La comparaison des précipitations mesurées aux stations et celles issues des satellites GPM et TRMM montre une bonne performance entre les deux jeux de données. Mais les produits GPM présentent les meilleurs coefficients de corrélation Pa rapport aux précipitations TRMM. D'après les résultats de corrélation entre les données, nous constatons qu'il est préférable d'utiliser les produits GPM pour la spatialisation des précipitations dans les milieux qui se caractérisent par une faible densité des postes de mesures.

CHAPITRE 10

Chapitre 10 : L'impact des changements climatiques et de la dynamique des surfaces irriguées sur les ressources en eau dans le Moyen Atlas tabulaire

Introduction

Actuellement, les travaux relatifs à l'étude de l'impact combiné des changements climatiques et de l'extension des surfaces irriguées sur les ressources en eau enregistrent une augmentation notable. Ces études ont permis de mieux appréhender les répercussions immédiates et durables des changements globaux et des transformations au niveau d'occupation des sols sur l'environnement et sur les activités anthropiques. Pour répondre aux questions de la durabilité des ressources en eau et des pratiques dépendant de l'eau cette problématique est placée au centre des préoccupations des chercheurs dans les domaines ; du climat, de l'hydrologie et de l'agriculture.

Ce chapitre se focalise sur l'étude des conséquences des changements climatiques et de la dynamique des surfaces agricoles irriguées sur les ressources en eau et sur le système hydro-agricole dans le Moyen Atlas tabulaire. La mise en évidence de la situation des ressources en eau (souterraines et superficielles) est abordée par le suivi de la variation de niveau des lacs, la réalisation des mesures piézométriques et l'analyse des séries des débits des sources et des oueds. En outre, l'étude des changements successifs du système hydro-agricole se base sur les observations directes sur terrain et sur des entretiens réalisés auprès des populations locales.

1. La question de l'impact des CC et de l'extension des surfaces irriguées

Durant les dernières années, les ressources en eau sont soumises à une immense pression dans les différents pays. Cela a conduit à la multiplication des études liées à la problématique de l'eau

afin de comprendre les principaux facteurs qui interviennent dans la dégradation qualitative et quantitative de cet élément vital. Ainsi, les chercheurs ont tenté de développer des modèles hydrologiques et climatiques pour faciliter la quantification des ressources en eau notamment souterraines.

L'essor des études a permis de mettre en évidence les facteurs qui interviennent dans la dégradation des ressources en eaux souterraines, dont les plus importants sont les changements climatiques et les modifications des pratiques d'occupation et d'utilisation des terres. Plusieurs travaux montrent que la dégradation des eaux souterraines est étroitement liée aux changements climatiques (Epting et al., 2021 ; Nistor, 2020 ; Nyembo et al., 2022 ; Secci et al., 2021). D'autres expliquent la dégradation continue des eaux souterraines par la combinaison des changements climatiques observés au cours des dernières décennies et de l'augmentation de la pression des activités anthropiques dues aux changements des pratiques d'occupation des sols (Abera et al., 2019 ; Brunner et al., 2021 ; Ghimire et al., 2021 ; Mendieta-Mendoza et al., 2021 ; Pei et al., 2022 ; Samal et Gedam, 2021 ; Usman et al., 2020 ; Wang et al., 2021 ; Yifru et al., 2021 ; Yue et al., 2020 ; Zellner et al., 2020). Ainsi, l'avancement de la sécheresse de l'été (saison de l'été) constitue un élément important de dégradation des rendements des céréales et par conséquent le déclenchement de l'irrigation des terres agricoles pour pallier ce problème (Peltonen-Sainio et al., 2021 ; Ward, 2022 ; Worqlul et al., 2019). L'extension des terres agricoles irriguées dans un contexte de changement climatique global a conduit à l'accélération de la pression sur les ressources en eaux souterraines et à l'amplification du déficit hydrologique. La pression sur les eaux souterraines a engendré également des impacts néfastes sur le fonctionnement des écosystèmes naturels (Majola et al., 2022) à savoir les lacs et les zones humides d'une manière générale.

Les résultats obtenus d'après les différents scénarios optimistes et/ou pessimistes indiquent une diminution des précipitations, une hausse de la température, une baisse des nappes souterraines et une extension continue des surfaces irriguées comme une forme d'adaptation aux changements climatiques et comme une mesure clé pour améliorer la production les rendements des terres. Face à cette situation inquiétante, les chercheurs à l'échelle nationale qu'international recommandent la multiplication de nombre des travaux relatifs à la quantification,

à la prévision des eaux souterraines et à l'approfondissement des connaissances scientifiques sur la relation entre les changements globaux, la dynamique d'occupation des sols et les ressources en eau, afin de développer des systèmes de gestion et de développement durable des eaux souterraines et des activités humaines relatives à l'eau.

Au Maroc, les effets des changements climatiques et de la pression des activités anthropiques sont observés dans plusieurs régions. Au cours des dernières décennies, le Maroc a enregistré une variabilité climatique très prononcée avec des périodes de sécheresse récurrentes. En parallèle, les pratiques d'occupation et d'utilisation des sols ont connu des transformations importantes dans les grandes plaines et dans les milieux montagnards. Les principales transformations au niveau d'occupation des sols résident dans l'extension des périmètres irrigués et l'amplification des pratiques agricoles basées sur l'irrigation à partir des nappes souterraines, ce qui induit une pression très forte sur les ressources en eau.

La situation préoccupante des ressources en eaux souterraines au Maroc a fait l'objet de nombreuses études ([Aahd et al., 2009](#) ; [Ahmed et al., 2021](#) ; [Bahir et al., 2021, 2020](#) ; [El-Assaoui et al., 2015, 2021](#) ; [Ez-zaouy et al., 2022](#) ; [Hssaisoune et al., 2019](#) ; [Lyazidi et al., 2020](#) ; [Ouhamdouch et al., 2020](#) ; [Seif-Ennasr et al., 2016](#)). Les résultats obtenus indiquent clairement une baisse continue du niveau piézométrique des nappes souterraines sur l'ensemble du territoire marocain (Souss Massa, El Gharb, Rif, Moyen Atlas, ...). Généralement, la dégradation des eaux souterraines varie d'une région à l'autre en fonction du climat, des formations lithologiques et du degré d'exploitation. Dans certains secteurs comme Essaouira, le niveau de la nappe a enregistré en trois décennies une diminution variable entre 5 m et 17 m ([Bahir et al., 2021](#)). Dans la nappe de Berrechid, le niveau piézométrique a enregistré une baisse continue entre 1980 et 2008 et atteint 20 m par endroit ([El-Assaoui et al., 2015](#)).

Selon les prévisions climatiques, le Maroc va enregistrer une baisse continue des précipitations d'ici 2100, avec un pourcentage variable entre 10 % et 30 % et une augmentation de la température ([El-Assaoui et al., 2021](#)). Cela, va conduire à la dégradation des activités basées sur les précipitations notamment l'agriculture en bour et par conséquent, le recours à l'irrigation à partir des nappes souterraines comme une forme d'adaptation aux changements climatiques. D'après les chercheurs, nous constatons que les effets des changements climatiques et de la

pression anthropique sur l'eau sont préoccupants. Cette situation alarmante dans un pays qui souffre déjà d'insécurité hydrique (Seif-Ennasr et al., 2016) nécessite d'augmenter les efforts et d'approfondir des connaissances scientifiques relatives à la relation entre l'eau, les activités anthropiques et les changements climatiques pour proposer des stratégies d'adaptations et des mesures de gestion des ressources en eau avec les scénarios actuels et futurs. Sur le plan scientifique, la plupart des chercheurs au Maroc se concentrent sur l'évaluation qualitative et quantitative de l'eau plutôt que sur le développement des systèmes d'agriculture et d'irrigation, les changements climatiques et l'agriculture (Lrhoul et Turki, 2021).

La réalisation d'une recherche bibliographique exhaustive nous a permis de mettre en évidence que les effets négatifs des changements climatiques et de la pression continue sur les ressources en eau ont conduit au cours des dernières décennies à des situations alarmantes du niveau des nappes souterraines dans les différents pays du monde. Ci-après, une analyse des conséquences des changements climatiques et d'extension des surfaces irriguées sur les ressources en eau et sur le système hydro-agricole dans le Moyen Atlas.

2. Les conséquences des CC et d'extension des surfaces irriguées sur les ressources en eau dans le Moyen Atlas

Pour étudier l'impact des CC et de la pression anthropique sur les ressources en eau nous avons utilisé des données multi-sources et multi-dates, à savoir les séries des mesures issues de l'ABHS (débits des sources et des oueds), le travail de terrain (photos, mesures piézométriques, entretiens auprès des populations) et le traitement d'un nombre important des images satellites multispectrales (Landsat TM, OLI et OLI2) pour mesurer la variation spatiotemporelle des Lacs. Le tableau 10.1 illustre les données utilisées dans ce chapitre. Ainsi, nous avons appliqué plusieurs équations (tableau 8.2, chapitre 8) pour analyser la tendance des séries de débits des sources et des oueds.

2.1. Le niveau piézométrique du Moyen Atlas tabulaire

Dans le Moyen Atlas tabulaire, le niveau piézométrique des nappes souterraines varie d'une région à l'autre en fonction des caractéristiques lithologiques et des altitudes. La carte (fig. 10.1) montre une différence remarquable de niveaux piézométriques entre les basses et les hautes

Données	Période	Source
Q sources l/s	1969 - 2018	ABHS
Q oueds m ³ /s	1956 - 2013	ABHS
Images satellites	1984 - 2020	NASA - CNES
Mesures piézométriques	2012 et 2020	Travail de terrain

TABLEAU 10.1. Données utilisées dans ce chapitre

altitudes. Les niveaux les plus proches au sol se localisent dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer et dans les zones de contact entre le Moyen Atlas tabulaire et la plaine de Saiss. Tandis que les niveaux les plus profonds se situent dans les dépressions d'Imouzzer, de dayet Aoua et de Guigou. Ainsi, la comparaison des mesures piézométriques dans deux zones qui se situent sur des altitudes différentes (dépressions de Guigou et de Laanoucer) indique une forte différence du niveau piézométrique d'une dépression à l'autre (figs. 10.2 et 10.3). Les mesures que nous avons réalisées dans la dépression de Guigou en mars 2017 permettent de mettre en évidence que le niveau piézométrique oscille entre moins de 10 m à plus de 65 m avec une dominance des puits dont le niveau piézométrique est supérieur à 20 m. En revanche, les mesures réalisées par Babali en mai 2017 dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer montrent que le niveau de la nappe est plus proche au sol par rapport à la dépression de Guigou. Le niveau de la nappe dans les puits mesurés varie entre moins de 5 m et plus de 30 m, avec une prédominance des puits où le niveau piézométrique est inférieur à 15 m.

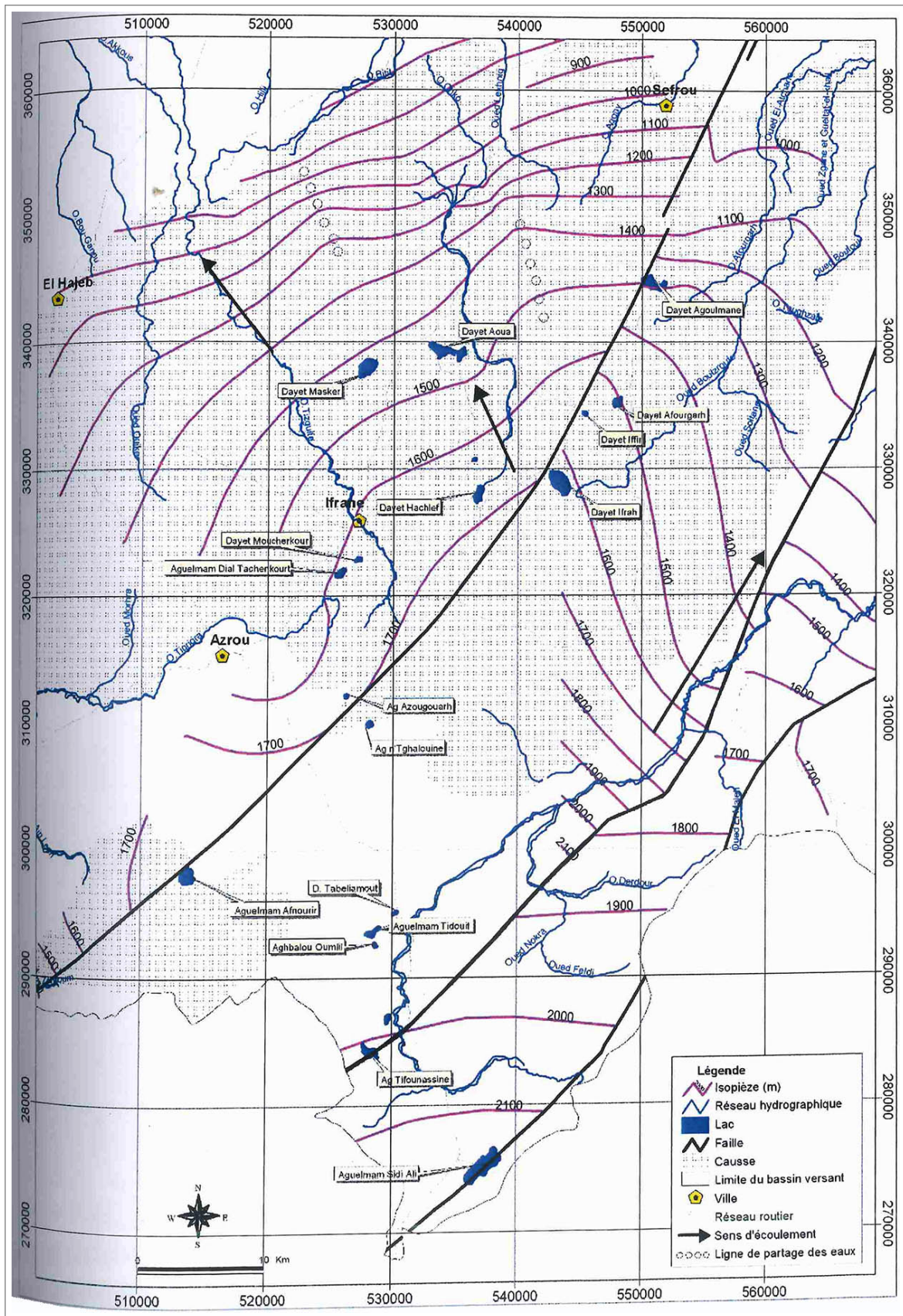


FIGURE 10.1. Carte piézométrique couvrant la région des lacs du Moyen Atlas

ABHS (2010)

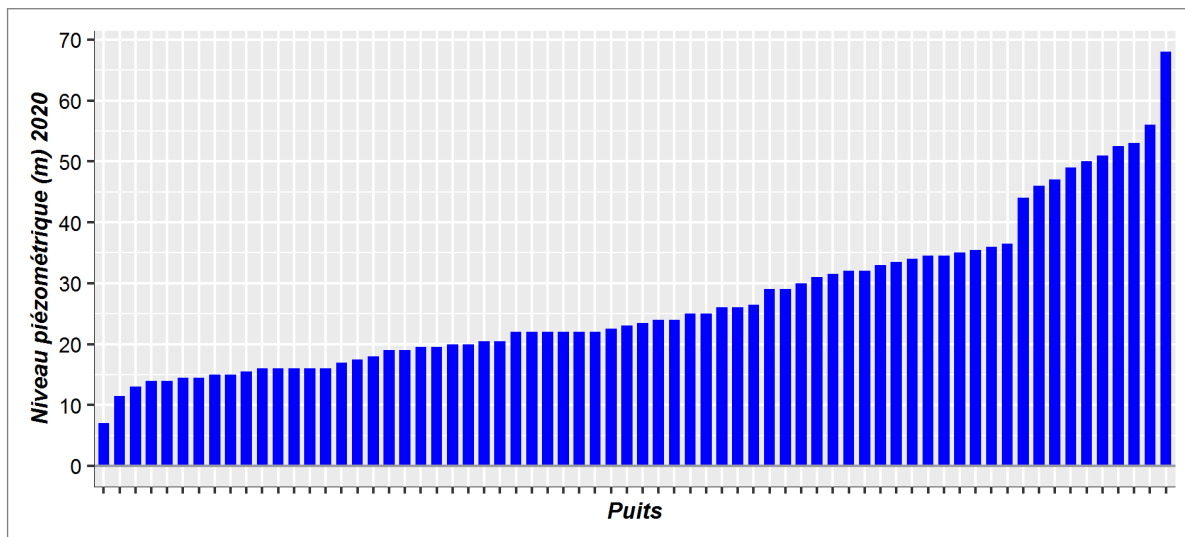


FIGURE 10.2. Niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mars 2020

[El-Bouhali, 2020]

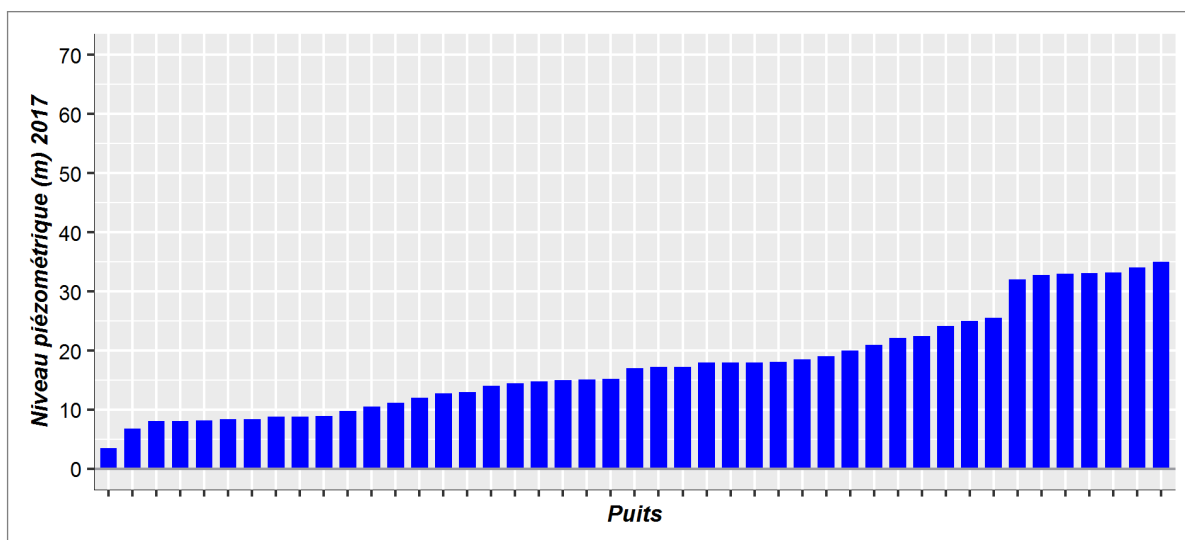
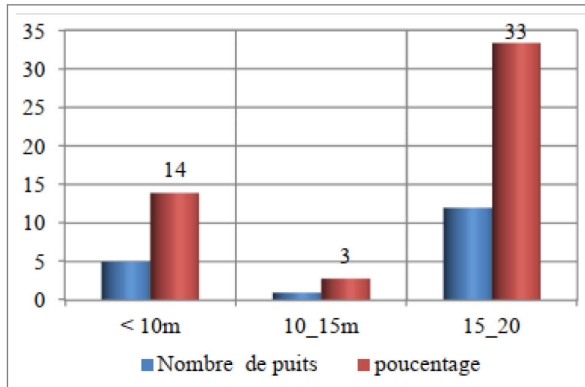


FIGURE 10.3. Niveau piézométrique de la nappe dans la dépression d'Afourgagh en mai 2017

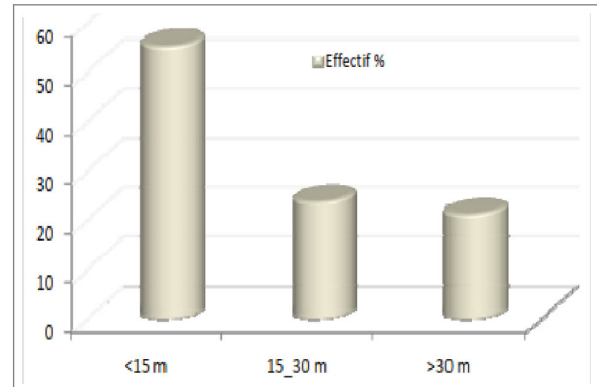
[Babali, 2017]

Sur l'ensemble des dépressions dans le Moyen Atlas, les nappes souterraines enregistrent une baisse de leurs niveaux sous l'effet de la diminution des apports pluviométriques, l'augmentation de la température et l'extension continue des surfaces agricoles irriguées au sein du système traditionnel. Dans la dépression d'Afourgagh, [Amyay et al. \(2000\)](#) ont montré les conséquences de la baisse généralisée de la nappe sur les ressources en eau. Les autres dépressions du Moyen Atlas (dépressions d'Imouzzar, de dayet Aoua, de Guigou) ont enregistré une baisse alarmante des nappes souterraines. Le recreusement des puits par les agriculteurs sur l'ensemble des dépressions témoigne la situation préoccupante des eaux souterraines.

Les enquêtes réalisées par Chrif El Idrissi, 2019 dans la dépression d'Imouzzer (fig. 10.4) et par Qadem, 2015 dans la dépression de Guigou indiquent que les puits sont soumis à des opérations de recreusement. Dans la dépression d'Imouzzer, les agriculteurs ont approfondi leurs puits, dont 33 % d'entre eux ont ajouté entre 15 m et 20 m de profondeur après le premier creusement. Dans la dépression de Guigou, la profondeur ajoutée dépasse 30 m et la plupart des agriculteurs ont ajouté moins de 15 m de profondeur.



Dépression d'Imouzzer



Dépression de Guigou

FIGURE 10.4. Nombre de mètres approfondis dans les puits d'Imouzzer et de Guigou

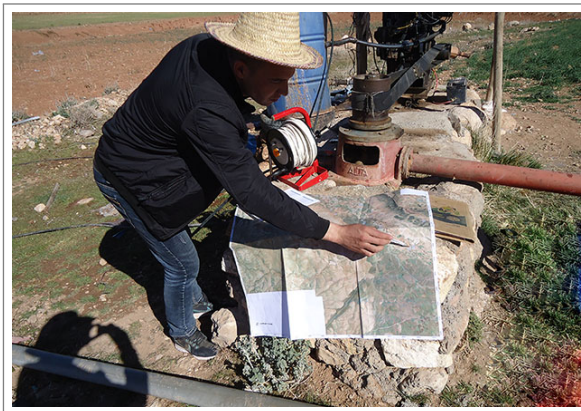


Photo 10.1



Photo 10.2

FIGURE 10.5. Illustration des mesures piézométriques réalisées dans la dépression de Guigou en mars 2020

Dans les dépressions du Moyen Atlas, le suivi de la variation de niveau de la nappe constitue une étape primordiale pour comprendre la pression exercée sur les ressources en eau souterraine. L'accès aux mesures piézométriques réalisées par les services responsables dans les différentes dépressions du Moyen Atlas est très difficile. Pour surmonter ce problème, nous avons réalisé des mesures piézométriques dans la dépression de Guigou (photos 10.1 et 10.2 in fig. 10.5) afin de les comparer avec les mesures de Qadem 2012.

2.2. Une baisse conséquente du niveau piézométrique de la nappe dans la dépression de Guigou

À l'échelle nationale qu'internationale, les ressources en eaux souterraines enregistrent, une baisse alarmante durant les dernières décennies. Dans ce contexte, plusieurs études ont été réalisées (Ahmed et al., 2021 ; Bahir et al., 2020 ; Ez-zaouy et al., 2022 ; Hssaisoune et al., 2019 ; Ouhamdouch et al., 2020) pour montrer les causes et les conséquences de dégradation des eaux souterraines. Généralement, l'unanimité est faite sur la situation actuelle alarmante et les menaces à venir préoccupantes.

La modélisation des eaux souterrains se base sur des méthodes directes et indirectes selon le contexte de l'étude, la disponibilité des données et les outils (El-Assaoui et al., 2021). Il existe des chercheurs qui ont utilisé une seule méthode pour la quantification de la recharge des aquifères (McCallum et al., 2014 ; Walter et al., 2011 ; Weiss et Gvirtzman, 2007) d'autres ils ont comparé plusieurs méthodes pour étudier et quantifier les eaux souterraines (Guardiola-Albert et al., 2015 ; Smith et Pollock, 2012). Dans le cadre des changements en cours dans le climat et d'utilisation des sols, l'étude des eaux souterraines est devenue l'une des questions les plus importantes en hydrogéologie (Gumuła-Kawęcka et al., 2022).

Les résultats obtenus d'après les mesures piézométriques réalisées par Qadem A. 2012 et El-Bouhali A. 2020 sont présentés dans les figures ci-après (figs. 10.6 à 10.11). La comparaison entre les mesures de 2012 et celles de 2020 montre une diminution bien nette de la nappe souterraine de Guigou. La figure 10.6 illustre parfaitement la baisse du niveau piézométrique. En 2012, les mesures obtenues montrent que le niveau piézométrique oscille entre 1.5 m et 56 m. Par contre en 2020 la nappe a enregistré une baisse importante, cette situation est reflétée par la profondeur minimale et maximale du niveau de la nappe qui varie entre 7 m et 68 m. Alors, les valeurs minimales et maximales ont enregistré une augmentation bien évidente entre les deux dates.

La baisse de niveau de la nappe varie d'une zone à l'autre (figs. 10.7 et 10.8). Le niveau piézométrique enregistre une augmentation remarquable à la station d'Ait Khabache et le long de l'oued Guigou, par contre il s'étend à la baisse dans la partie nord et nord-est de la dé-

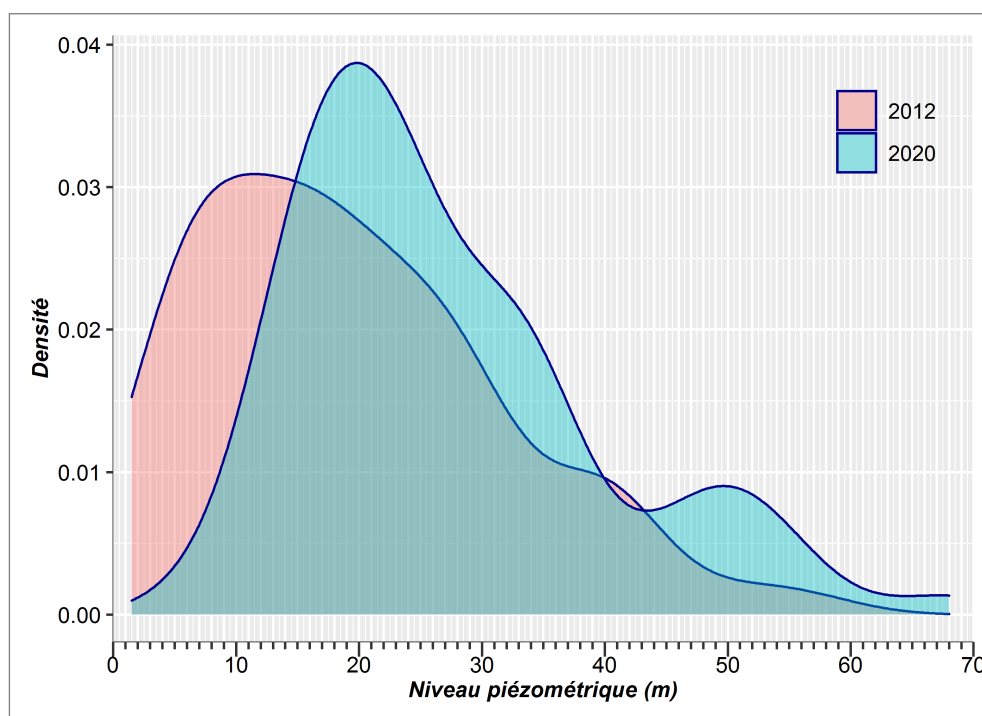


FIGURE 10.6. Distribution gaussienne du niveau piézométrique (m) de la nappe de Guigou [Qadem A. 2012; El-Bouhali A. 2020]

pression. La descente du niveau de la nappe entre 2012 et 2020 a conduit à l'apparition des puits abandonnés dans plusieurs endroits de la dépression (fig. 10.8). En effet, ce phénomène est lié à la baisse de la nappe d'une part, et à l'insuffisance des possibilités économiques des agriculteurs pour recreuser les puits afin d'atteindre le niveau de la nappe d'autre part. Sur la base des mesures de 2012 et 2020, nous avons réalisé des cartes piézométriques (figs. 10.9 et 10.10) sur l'ensemble de la dépression. La spatialisation du niveau piézométrique se base sur les méthodes d'interpolation simples couramment utilisées par les chercheurs (IDW, Spline, kriging). Dans la dépression de Guigou, la méthode Spline est utilisée pour montrer la répartition spatiale du niveau piézométrique. Généralement, la profondeur de la nappe varie selon les endroits. Ainsi, la comparaison entre les deux cartes montre que la nappe de Guigou a enregistré en huit ans un abaissement remarquable, les valeurs maximales et minimales du niveau piézométrique illustrent parfaitement la situation de dégradation actuelle.

La comparaison entre le niveau piézométrique et la profondeur de quelques puits permet de montrer la situation préoccupante de la nappe de Guigou (fig. 10.11). La profondeur des puits dans la dépression oscille entre 140 m et 20 m. Tandis que le niveau de la nappe atteint 68 m dans certains endroits et 7 m dans les zones où le niveau de la nappe est plus proche au sol.

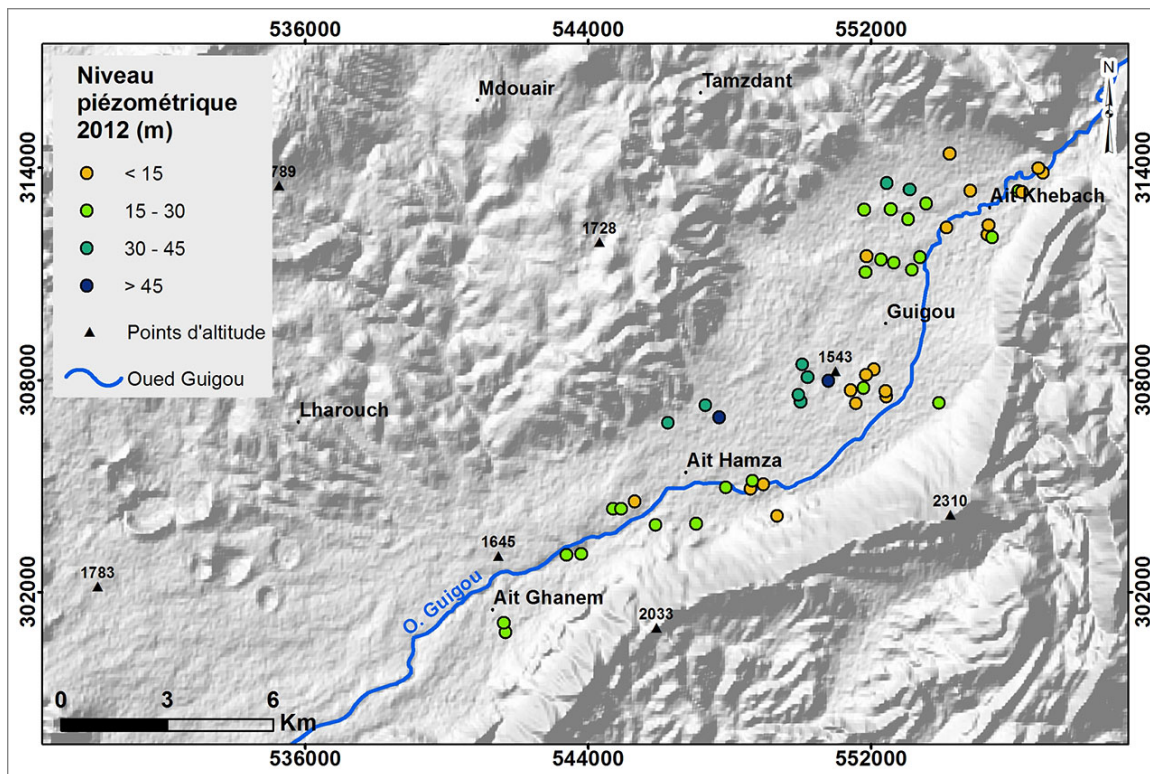


FIGURE 10.7. Répartition du niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mai 2012

[Qadem A. 2012]

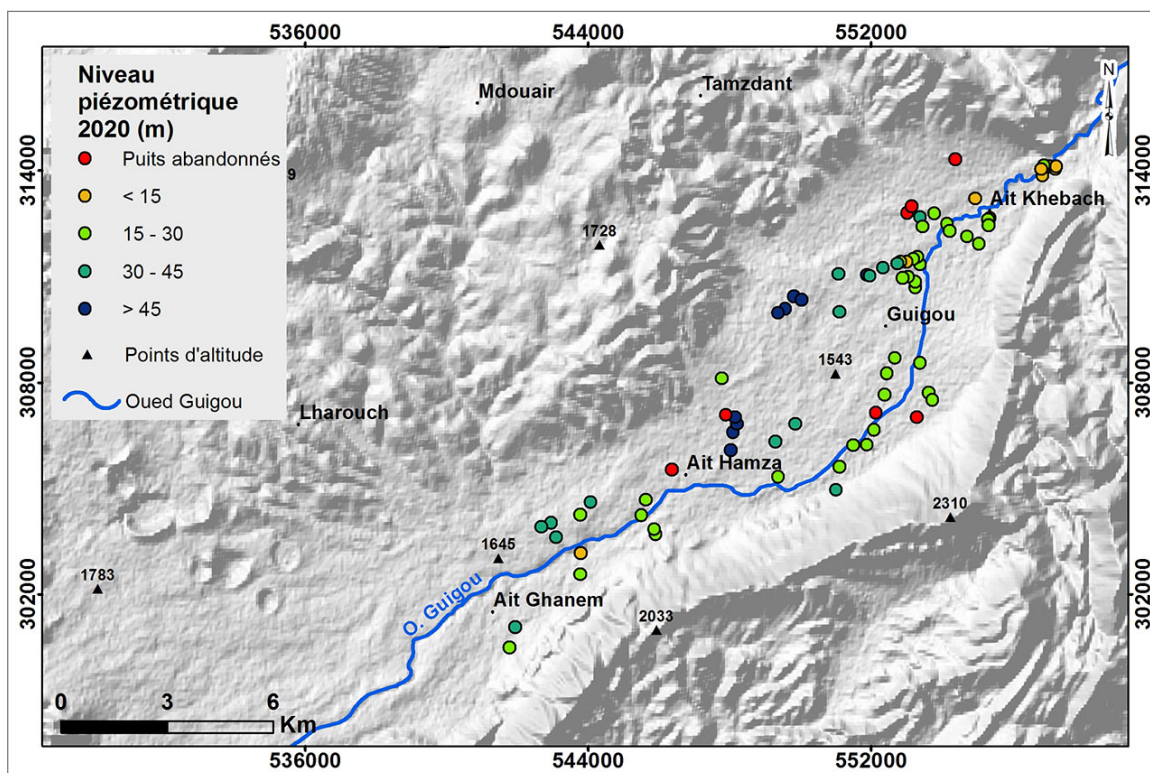


FIGURE 10.8. Répartition du niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mars 2020

[El-Bouhali A. 2020]

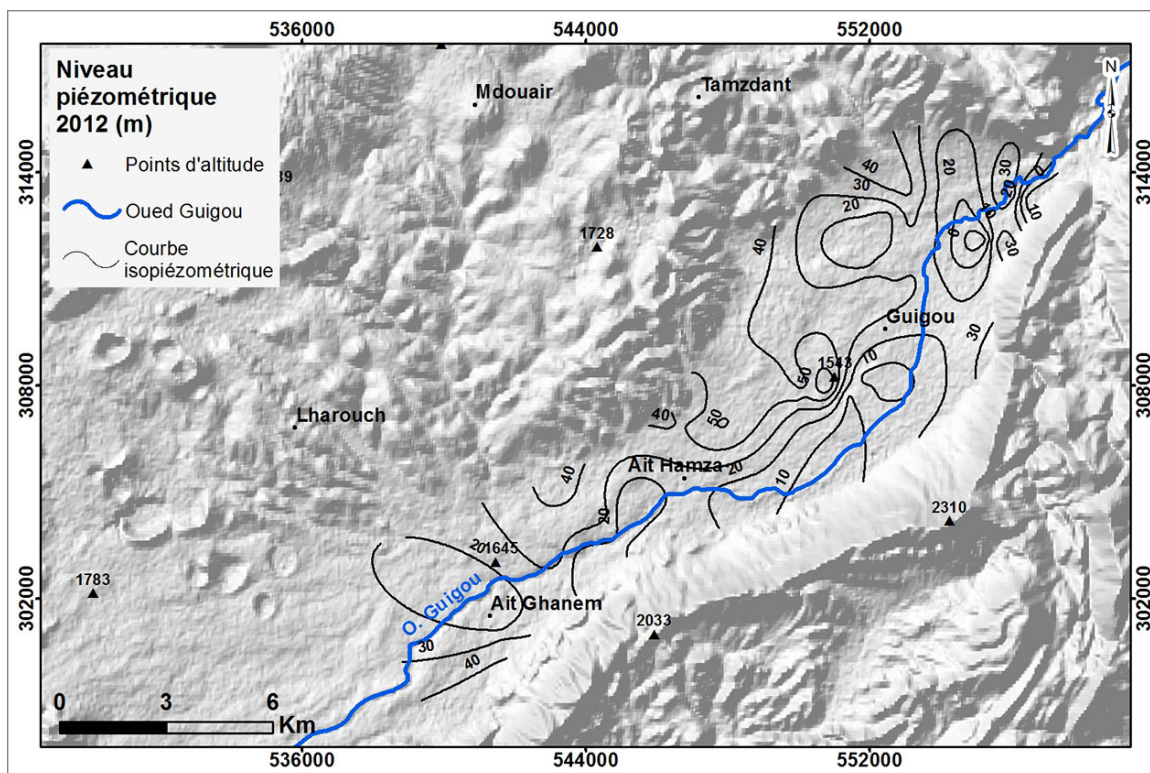


FIGURE 10.9. Spatialisation du niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mai 2012

[Qadem A. 2012]

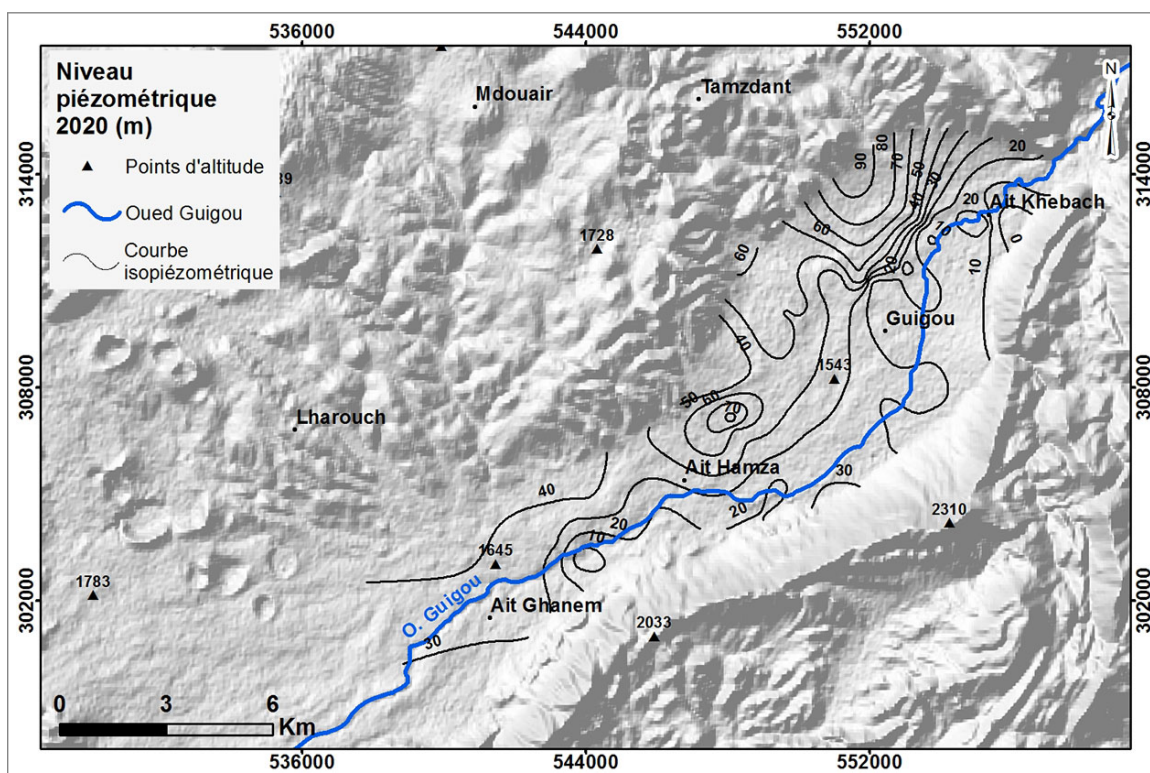


FIGURE 10.10. Spatialisation du niveau piézométrique de la nappe de Guigou en mars 2020

[El-Bouhali A. 2020]

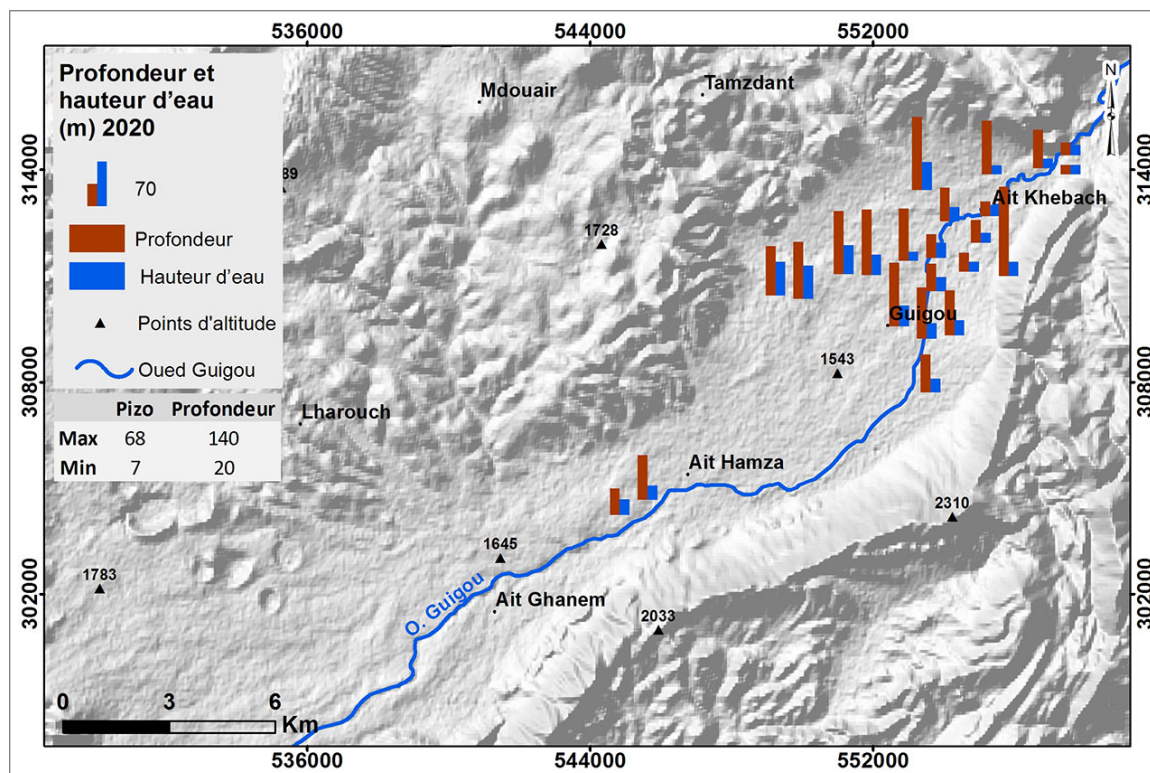


FIGURE 10.11. Comparaison entre le niveau piézométrique et la profondeur des puits dans la plaine de Guigou en mai 2020

En parallèle avec les mesures piézométriques, nous avons réalisé des entretiens auprès des agriculteurs sur la situation actuelle et passé des ressources en eau. Les réponses obtenues d'après les agriculteurs montrent que la plupart des puits dans la dépression de Guigou sont soumis à des opérations de recreusement pour atteindre le niveau de la nappe qui connaît un abaissement continu. Les opérations d'approfondissement des puits dans la dépression de Guigou ont enregistré une augmentation remarquable entre 2000 et 2010 (fig. 10.12). Le tableau 10.2 ci-après présente la variation de la profondeur des puits en trois décennies dans la dépression de Guigou.

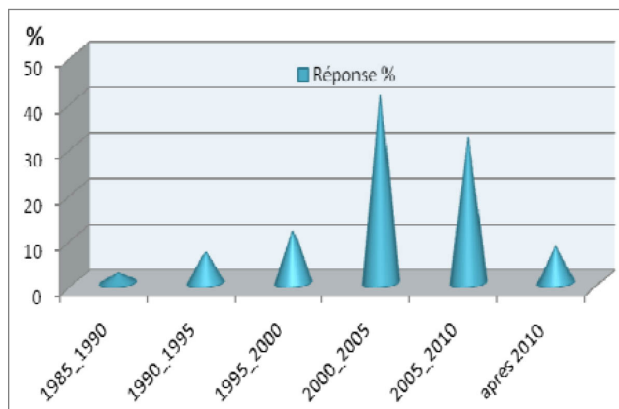


FIGURE 10.12. Date d'approfondissement des puits après le premier creusement

(Qadem, 2015)

Dans cette étude l'approche basée sur les mesures piézométriques montre une descente géné-

rale de la nappe de Guigou entre les deux périodes d'observations (2012 et 2020). En effet, la dépression de Guigou constitue seulement un exemple de dégradation quantitative des eaux souterraines. Les études réalisées dans les différentes nappes à l'échelle nationale indiquent une tendance générale à la baisse des eaux souterraines. Alors, les conséquences de dégradation de la nappe se traduisent localement par la disparition des lacs et la diminution inquiétante des débits des sources et des oueds.

Puits	Puits 1		Puits 2			Puits 3	
Année	1984	2018	1983	2018	1981	2018	
Profondeur	6m	» 69m	12m	» 39m	24m	» 43m	

TABLEAU 10.2. Exemples de surcreusement de puits entre 1981 et 2018 dans la dépression de Guigou

2.3. Une baisse remarquable du niveau des Lacs

Au cours des dernières décennies, l'intensification de l'utilisation des eaux souterraines a contribué à la dégradation des écosystèmes dépendants de leurs eaux (Duran-Llacer et al., 2022). Les aspects de dégradation résident dans la régression progressive de leurs superficies. Avec l'augmentation des effets des changements climatiques et de la pression anthropique, ces systèmes reçoivent plus d'attention (Huntington et al., 2016). Afin de mieux comprendre les impacts de la tendance régressive des eaux souterraines, des études ont été réalisées ces dernières années (Duran-Llacer et al., 2022 ; Dwire et al., 2018 ; Erostate et al., 2020 ; Huntington et al., 2016 ; Kløve et al., 2014 ; Krogulec, 2016, 2018 ; Martínez-Santos et al., 2021 ; Xu et Su, 2019) pour démontrer que les écosystèmes dépendants des eaux souterraines enregistrent une diminution remarquable de la superficie et de la diversité écologique.

À l'échelle du Moyen Atlas, des études ont été réalisées dans différents domaines pour comprendre le fonctionnement hydrologique et hydrogéochimique des lacs et pour montrer leurs réponses aux changements climatiques et à la pression des activités anthropiques (Adalal, 2019 ; Amyay et al., 2000 ; Etebaai et al., 2012 ; Sayad et Chakiri, 2010 ; Sayad et al., 2011). Malgré la différenciation des méthodes utilisées dans les études, le constat général indique que le niveau des lacs a subi des variations mensuelles et annuelles très fortes avec une

tendance à la baisse durant les dernières décennies.

Généralement, les études réalisées montrent que les lacs sont parmi les écosystèmes les plus touchés par la forte diminution des eaux souterraines. Dans ce sens, notre travail vise à suivre l'évolution spatiotemporelle des lacs/dayets entre 1984 et 2022 en se basant sur les mesures élaborées par l'ABHS et le traitement des images satellites multi-dates et multi-sources (Landsat 5, Landsat 8 et Landsat 9).

2.3.1. Variation du niveau des lacs dans le Moyen Atlas tabulaire entre 1984 et 2022

En parallèle avec l'augmentation des surfaces irriguées, la demande en eau d'irrigation s'accroît provoquant une forte pression sur les nappes souterraines du Moyen Atlas tabulaire. Les conséquences des modifications des modes d'occupation et d'utilisation des sols dans un contexte de CC sur les ressources en eau sont frappantes dans notre zone d'étude. L'intensification de l'irrigation et l'évolution continue des volumes extraits ont largement contribué au bouleversement du régime hydrologique. Ainsi, l'assèchement total des lacs reflète la situation critique du niveau de la nappe caractérisée par une forte baisse généralisée.

2.3.1.1. Fluctuations de niveau de dayet Aoua

L'interprétation du diagramme (fig. 10.13) montre que dayet Aoua a enregistré une variation remarquable du bilan hydrique mensuel entre 1980 et 2005. Le niveau du lac diminue légèrement à partir de février pour atteindre la valeur la plus basse en juillet et août. En effet, ce déficit correspond à la période d'augmentation de la température et de la forte pression sur les ressources en eau pour l'irrigation dans les dépressions d'Imouzzet et de dayet Aoua.

Le suivi de la variation de dayet Aoua en 1985 et 2018 à partir des images satellites (figs. 10.14 et 10.15) montre une irrégularité annuelle et mensuelle bien nette de la superficie. Cette dernière varie d'une année à l'autre et d'un mois à l'autre en fonction des conditions climatiques et de la pression anthropique.

En 1985 : se situe à la fin d'une longue période de sécheresse qu'a connu le Maroc, durant cette année la superficie du dayet Aoua a enregistré une variation mensuelle remarquable, mais elle n'est pas arrivée à un assèchement total.

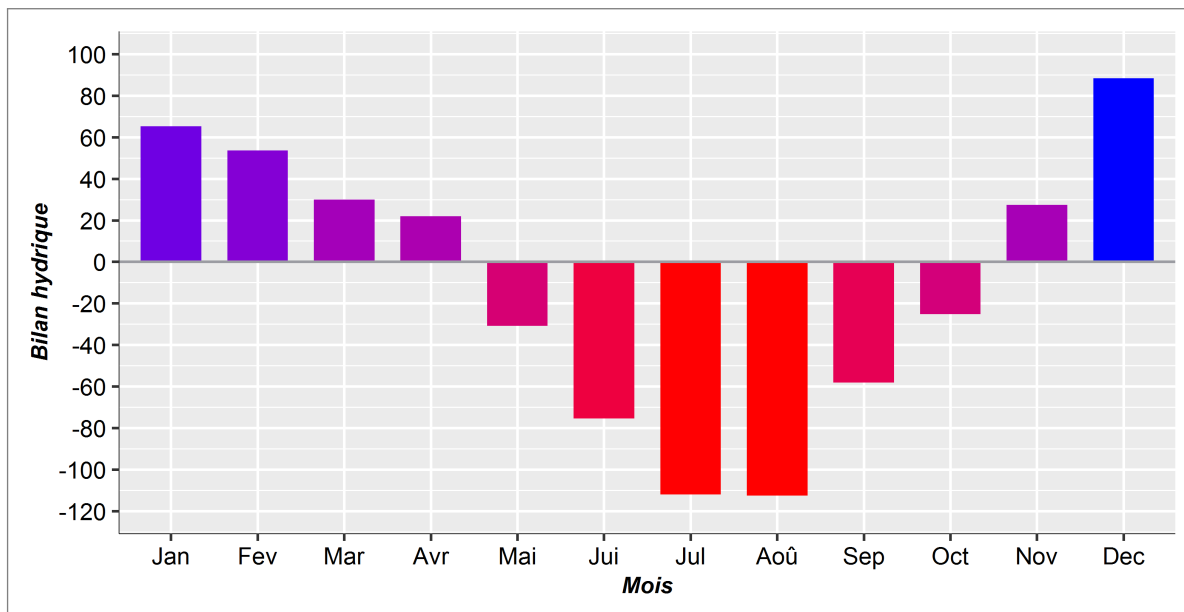


FIGURE 10.13. Bilan hydrique mensuel de Dayet Aoua entre 1980 et 2005 (ABHS)

En 2018 : La superficie de dayet Aoua a atteint un niveau très critique, il s'agit d'une régression inquiétante de son niveau avec un assèchement total durant plusieurs mois de l'année. Cette situation est due à la combinaison du déficit pluviométrique cumulé et à l'extension des surfaces irriguées sur l'ensemble de la dépression et les zones voisines.

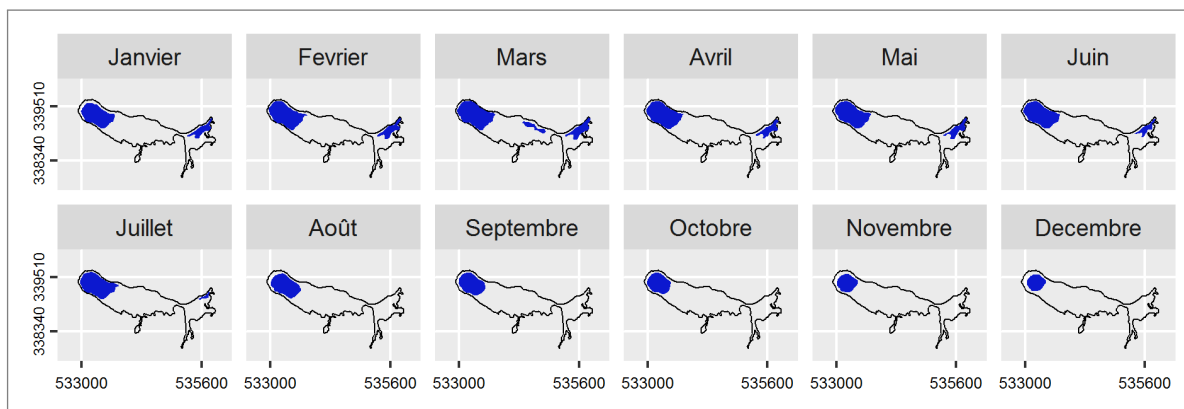


FIGURE 10.14. Variation mensuelle de la superficie de dayet Aoua en 1985 (images Landsat 5)

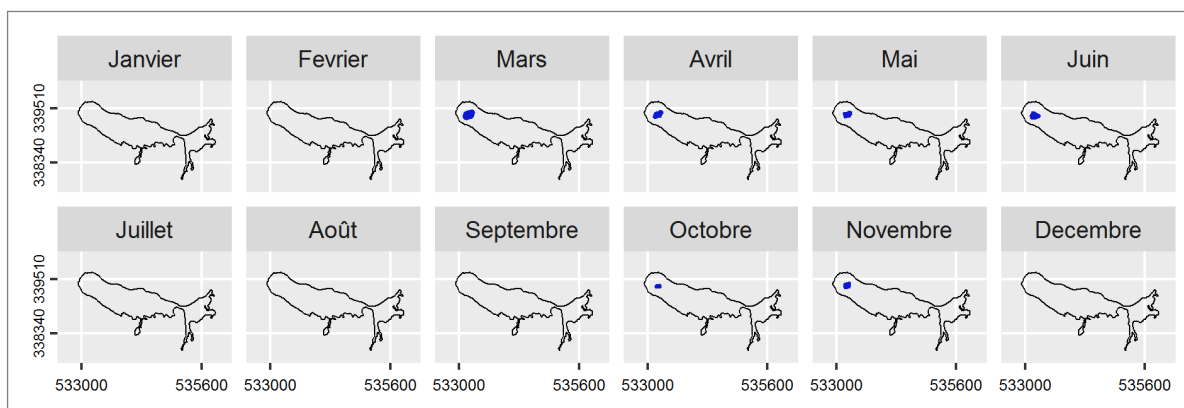


FIGURE 10.15. Variation mensuelle de la superficie de dayet Aoua en 2018 (images Landsat 8)

L'extraction de la superficie de dayet Aoua à partir des images satellites d'août 1984 à août 2022 (fig. 10.16) indique qu'il a enregistré sur une durée de plus de trois décennies des fluctuations bien nette, avec des périodes d'assèchement total (2001, 2002, 2008, 2018 à 2022). Ainsi durant les dernières années le déficit hydrologique du lac a augmenté d'une manière préoccupante. Il s'agit d'un assèchement total du lac sur une longue durée.

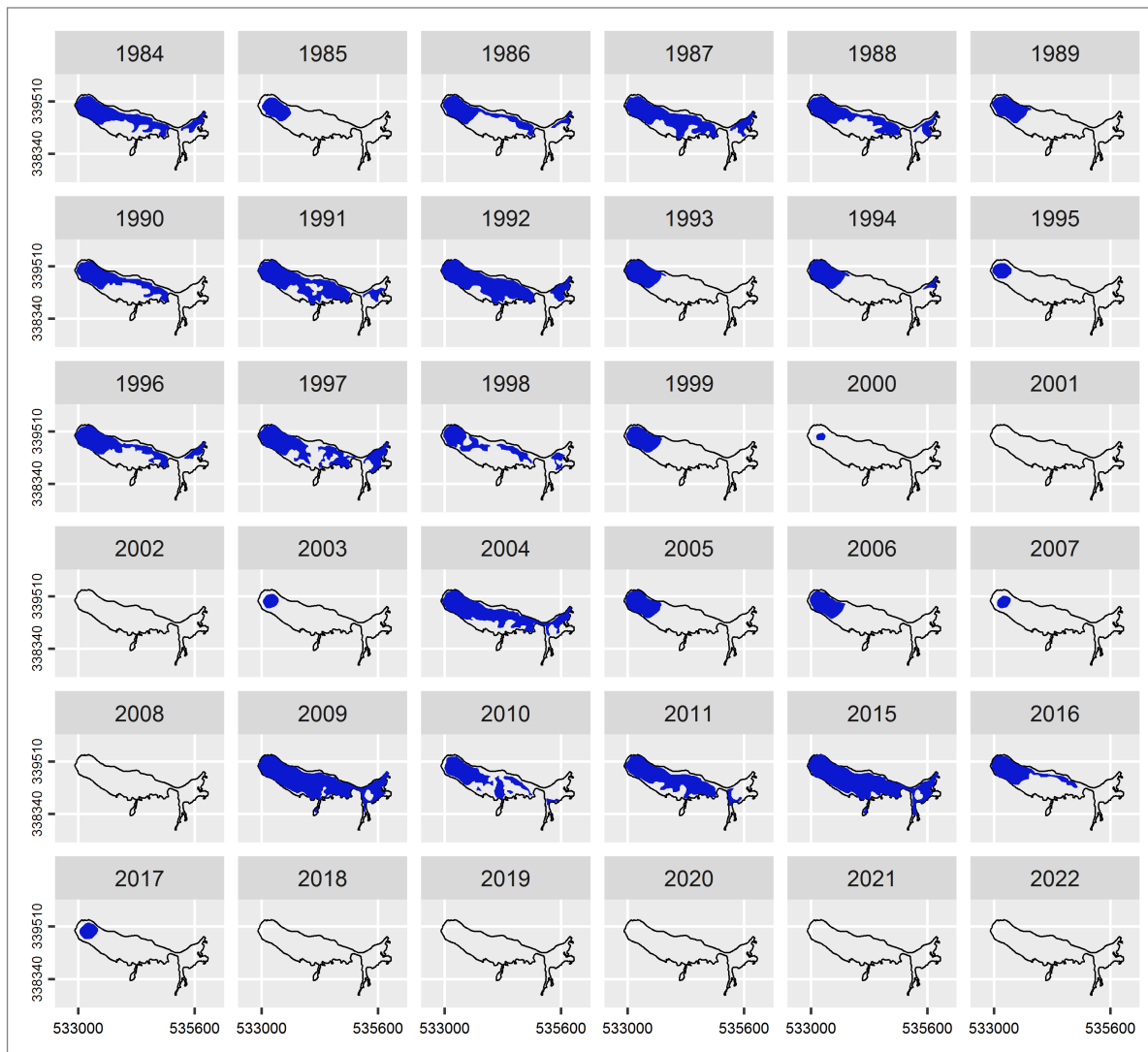


FIGURE 10.16. Variation de la superficie de dayet Aoua entre août 1984 et août 2022

La figure 10.17 indique que dayet Aoua se distingue par une variation rapide de leur superficie. D'une année à l'autre le lac enregistre des fluctuations bien nettes (2003-2004 ; 2008-2009 ; 2015-2016). Il s'agit d'une augmentation et d'une diminution rapide de la superficie (d'environ 0 ha en 2008 à environ 120 ha en 2009). Le passage d'un assèchement au remplissage quasiment total et le contraire se fait dans un temps très court.

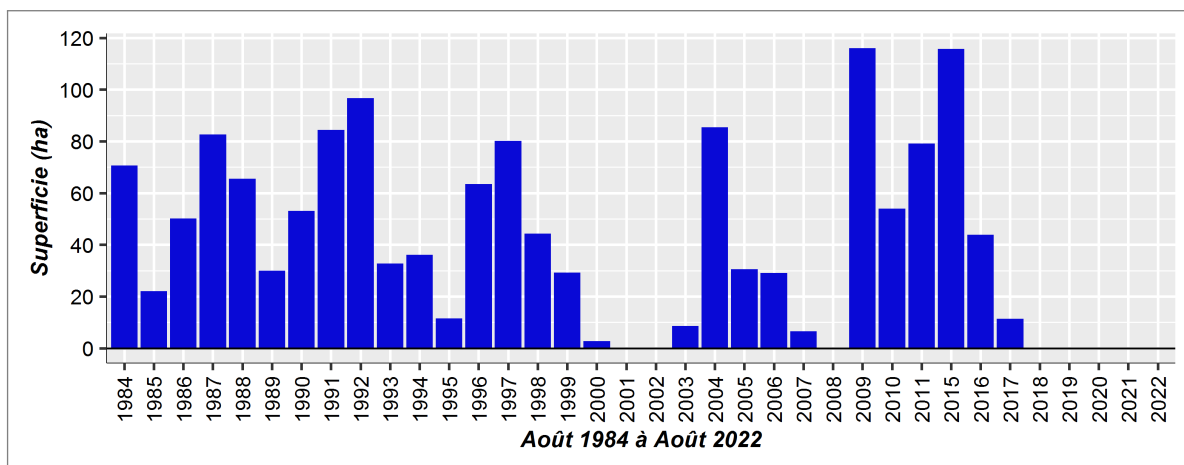


FIGURE 10.17. Variation de la superficie (ha) de dayet Aoua d'août 1984 à août 2022

2.3.1.2. Chute de niveau de dayet Afourgagh

La comparaison des figures 10.18 et 10.19 montre que la superficie de dayet Afourgagh a enregistré une chute brutale entre 1985 et 2018.

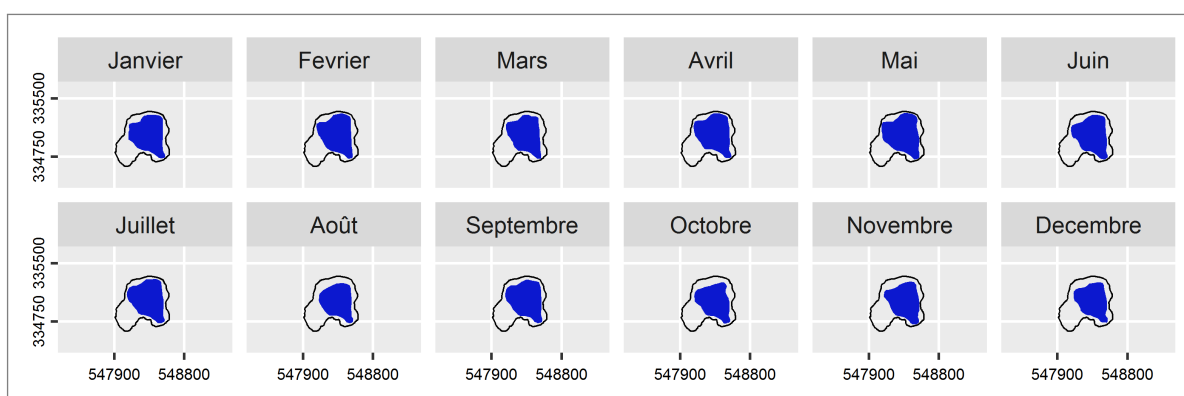


FIGURE 10.18. Variation mensuelle de la superficie de dayet Afourgagh en 1985 (images Landsat 5)

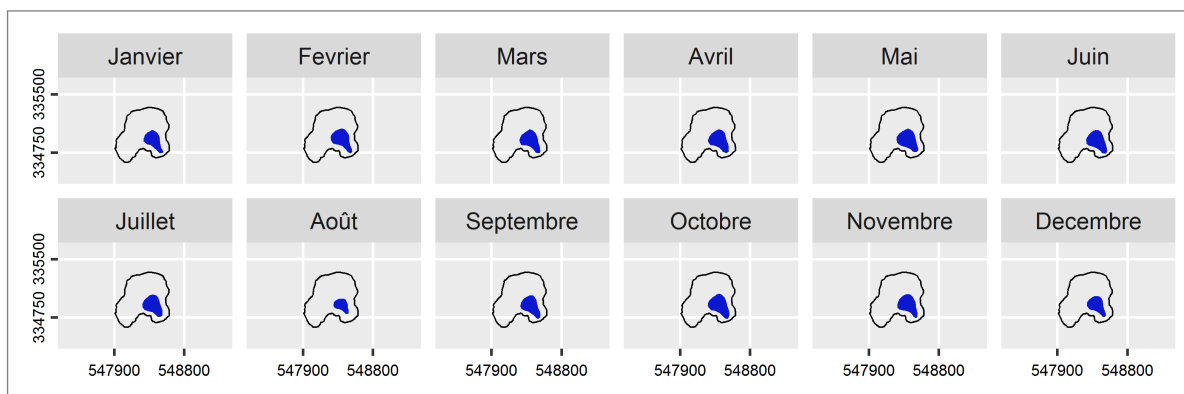


FIGURE 10.19. Variation mensuelle de la superficie de dayet Afourgagh en 2018 (images Landsat 8)

En 1985 : la superficie de dayet Afourgagh a connu une diminution importante par rapport à la situation de 1972 (d'environ 32 ha à 20 ha). Durant toute l'année, la superficie de dayet Afourgagh a enregistré une faible régression notamment en août.

En 2018 : le niveau de dayet Afourgagh a subi une chute remarquable. La régression de la superficie d'environ 20 ha en 1985 à environ 5 ha en 2018 reflète la situation très critique du lac.

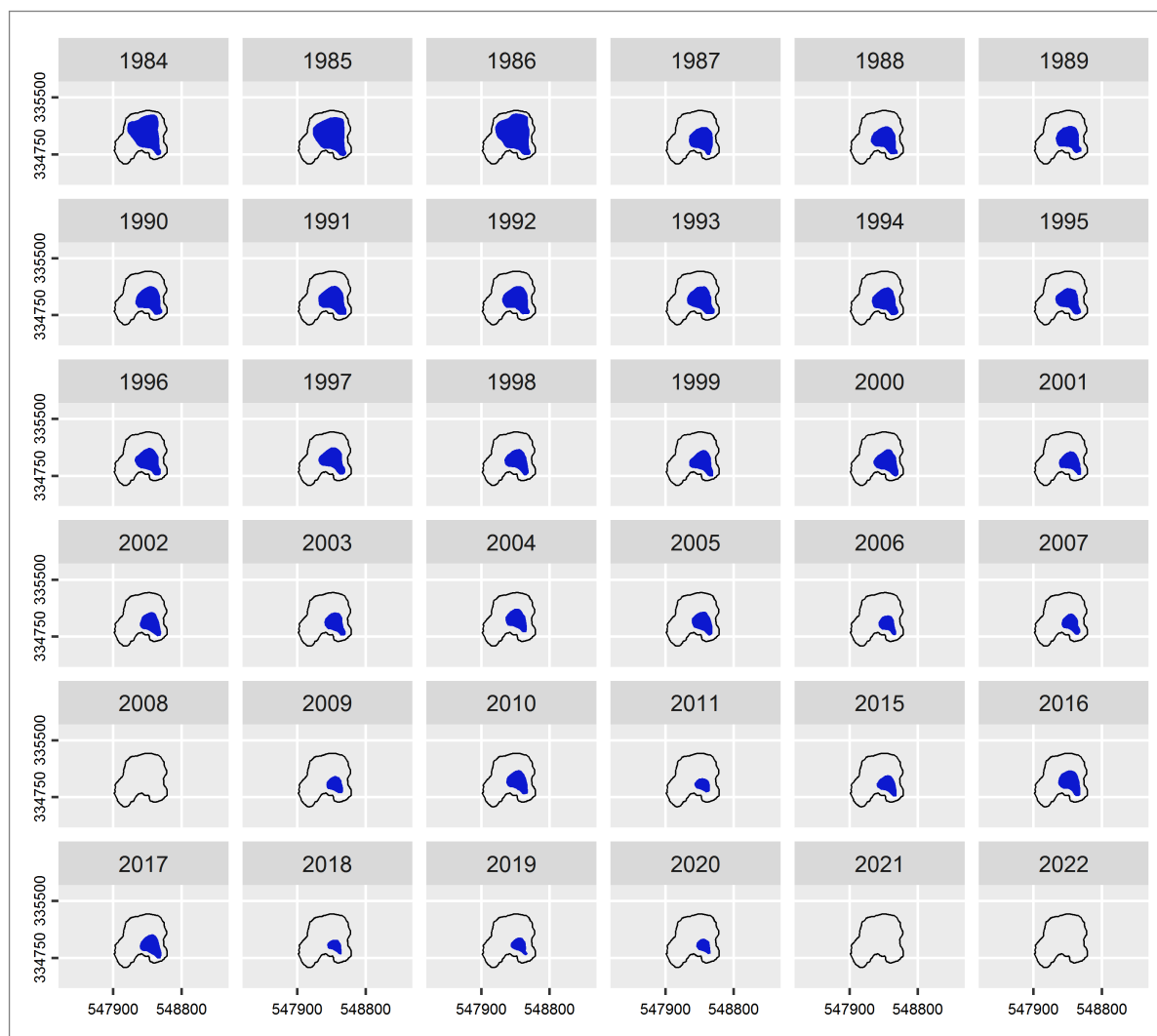


FIGURE 10.20. Variation de la superficie de dayet Ifrah d'août 1984 à août 2022

Le suivi de dayet Afourgagh (fig. 10.20) sur plus de trois décennies (d'août 1984 à août 2022) permet de mettre en lumière les fortes variations de la superficie. Durant les années 1984, 1985 et 1986, la superficie de dayet Afourgagh a connu de faibles variations. Depuis 1987, le lac a enregistré une régression continue de la superficie, avec des périodes d'assèchement total en 2008, 2020 et 2021. Cette situation implique l'ampleur du déficit hydrologique dans les dépressions d'Afourgagh et de Laanoucer notamment durant les dernières années. A partir de 1987 le niveau de dayet Afourgagh a enregistré une diminution importante (fig. 10.21) avec une superficie inférieure à 10 ha sur plus de trois décennies (33 ans).

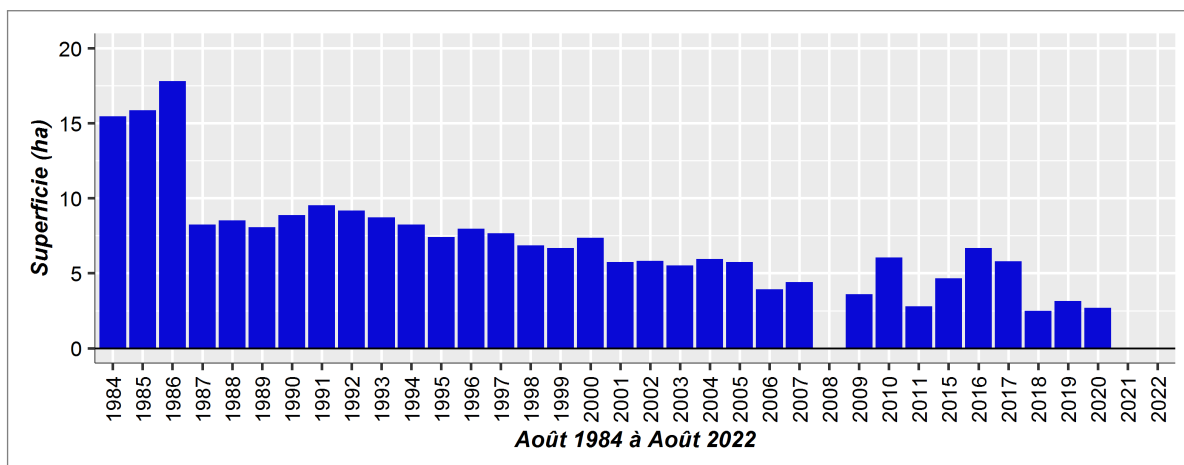


FIGURE 10.21. Chute de la superficie (ha) de dayet Afourgagh d'août 1984 à août 2022

2.3.1.3. Variation de niveau de dayet Ifrah

Entre 1985 et 2018 la superficie de dayet Ifrah a connu une variation importante de la superficie (figs. 10.22 et 10.23). En trois décennies, le lac Ifrah a perdu une superficie d'environ 60 ha (156 ha en 1985 à 95 ha en 2018). En 1985 la superficie de dayet Ifrah a enregistré de faibles variations. Tandis qu'en 2018, la superficie du lac a atteint le niveau le plus bas en août avec une superficie d'environ 95 ha. Cela reflète le rôle de la pression des surfaces irriguées sur les nappes souterraines durant la période estivale.

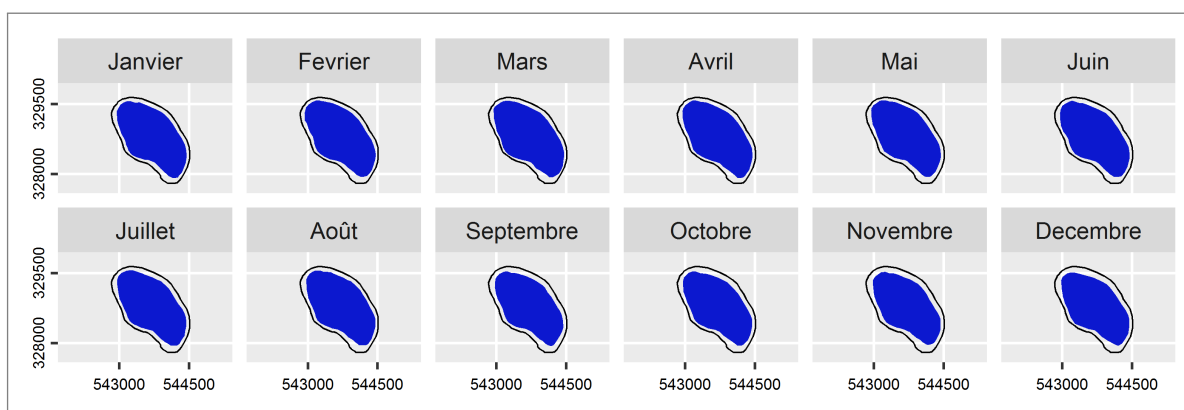


FIGURE 10.22. Variation mensuelle de la superficie de dayet Ifrah en 1985 (images Landsat 5)

La figure 10.25 montre que le lac Ifrah a enregistré entre août 1984 et août 2022 une variation remarquable de la superficie. A partir d'août 1984 on note une tendance à la baisse de la superficie du lac jusqu'à 2008. Durant cette période la superficie a passé d'environ 160 ha à 20 ha. L'augmentation des précipitations (2009-2012) a participé à l'augmentation successive de la superficie du lac Ifrah de 2009 à 2015. Cette période est suivie par une nouvelle tendance du lac à la baisse. La régression alarmante de la superficie de dayet Ifrah (< 20 ha en 2022) indique

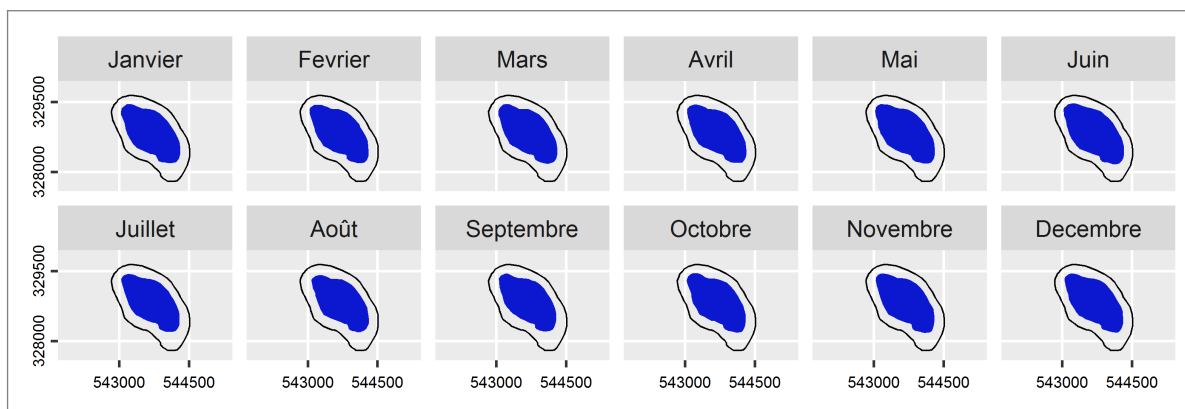


FIGURE 10.23. Variation mensuelle de la superficie de dayet Ifrah en 2018 (images Landsat 5)

la situation très critique de la nappe souterraine durant les dernières années sous l'effet des modifications au niveau des paramètres climatiques et des pratiques d'occupation des sols.

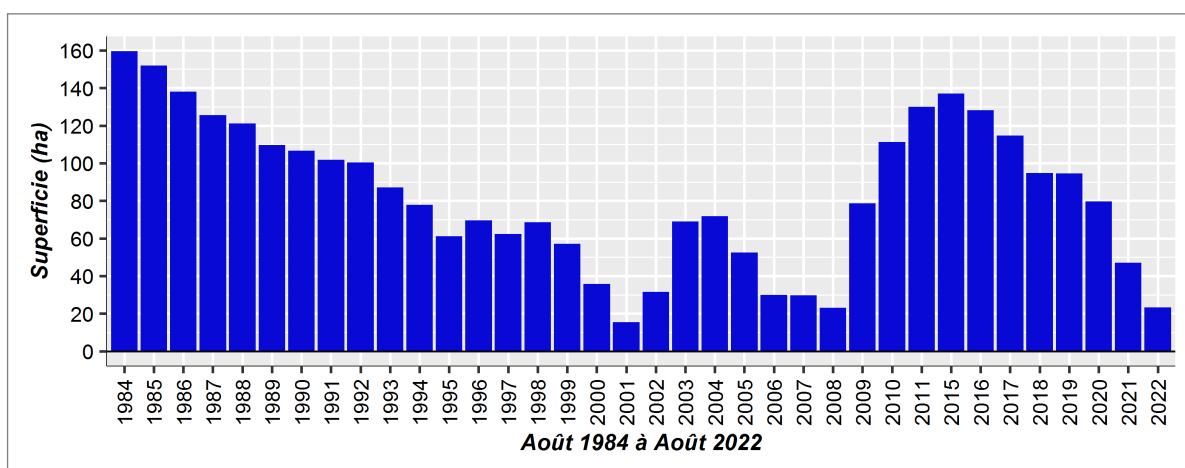


FIGURE 10.24. Variation de la superficie (ha) de dayet Ifrah d'août 1984 à août 2022

L'observation de la figure 10.24 montre que la régression et la progression de la superficie de dayet Ifrah se fait d'une manière lente. Entre 1984 et 2001, le lac a enregistré une diminution continue de la superficie. Il passe d'environ 160 ha en 1984 à une superficie inférieure à 20 ha en 2001.

Globalement, la régression continue du niveau des lacs et la dégradation des zones humides dans le Moyen Atlas reflètent la situation inquiétante des ressources en eaux souterraines. Ainsi, la baisse généralisée du niveau de la nappe a fortement influencé le débit des sources et des oueds.

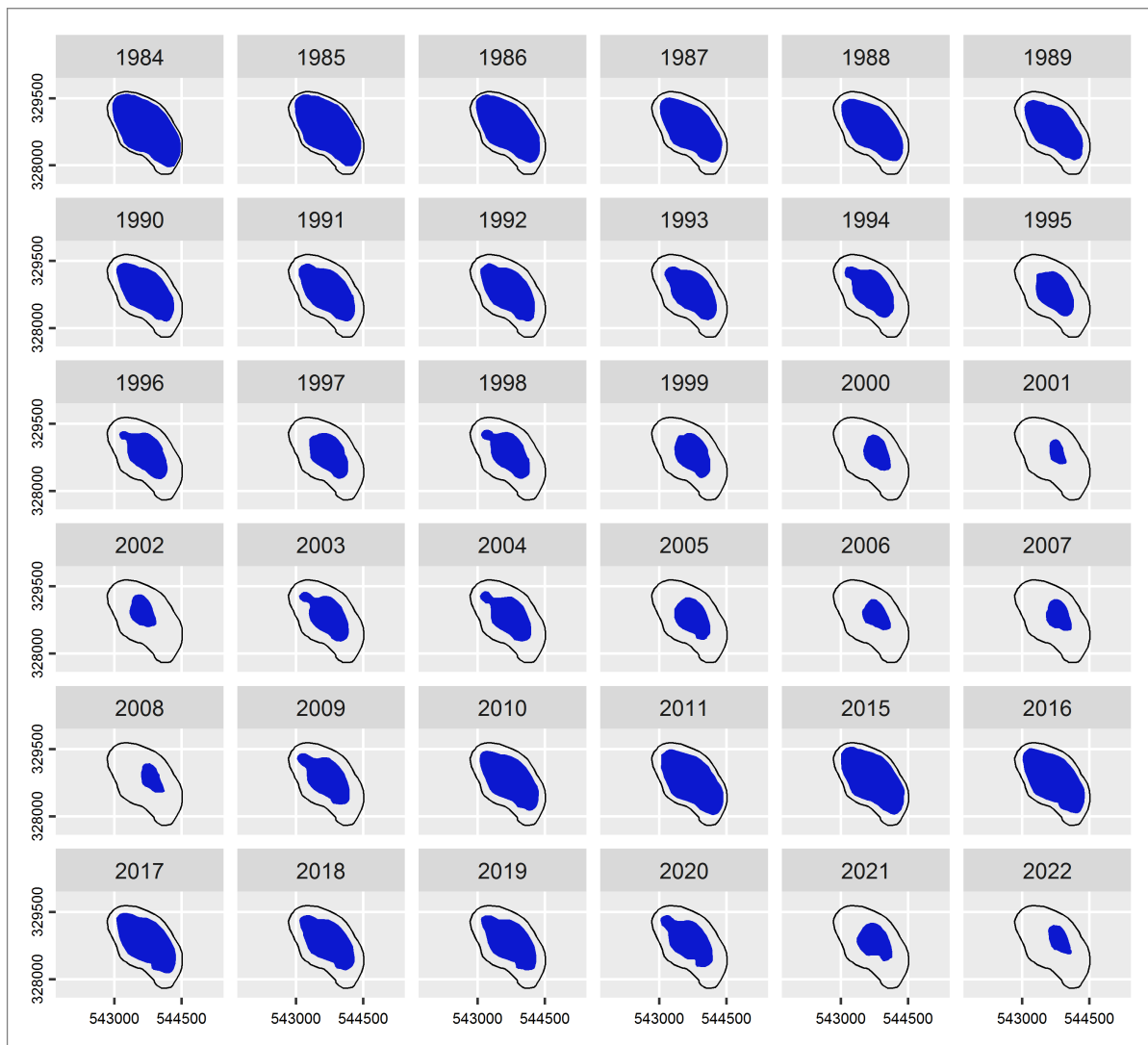


FIGURE 10.25. Variation de la superficie de dayet Ifrah d'août 1984 à août 2022

2.4. Chutes des débits des sources et des oueds

Précédemment, nous avons souligné les principaux aspects de dégradation de la nappe souterraine de Guigou et des lacs dans le Moyen Atlas tabulaire. Ci-après, une analyse des débits des sources et des oueds, afin de mettre en évidence leurs réponses à la tendance climatique actuelle et à la pression anthropique. Pour atteindre ces objectifs, nous avons appliqué plusieurs tests (indice de Nicholson et la méthode de CUSUM) pour détecter les ruptures et la tendance des débits des sources et des oueds.

2.4.1. Débits des sources

L'analyse de la variabilité et la tendance mensuelle des débits de trois sources disponibles (Bittit, Ribaa aval et Ribaa amont) se basent sur les jaugeages réalisés par l'ABHS à partir de

mars 1969 à mai 2018. Les trois sources sont issues directement des formations carbonatées du Lias (Amraoui, 2005) et se situe dans la zone de transition entre le Moyen Atlas tabulaire et la plaine de Saiss. Ces sources enregistrent d'importants changements en termes de qualité des eaux et de volumes débités (Amyay et al., 2015) sous l'effet des conditions climatiques et d'augmentation de la pression des cultures irriguées.

Les émergences du Lias situées dans les bordures du Moyen Atlas (Bittit, Ribaa aval et Ribaa amont) se caractérisent par une hétérogénéité bien claire au niveau des volumes d'eau débités (figs. 10.26 à 10.28). Les débits moyens obtenus d'après l'analyse des données permettent de mettre en évidence de forts contrastes d'une source à l'autre. En effet, sur l'ensemble des séries de jaugeages, le débit moyen dans la source de Bittit atteint 993 l/s suivi par la source de Ribaa amont 529 l/s et Ribaa aval 166 l/s. Ainsi, durant la période qui s'étend de 1969 à 2018 les sources ont subi des fluctuations remarquables des débits enregistrées avec des périodes de tarissement. Ce phénomène est très fréquent dans la source de Ribaa aval notamment à partir des années 80.

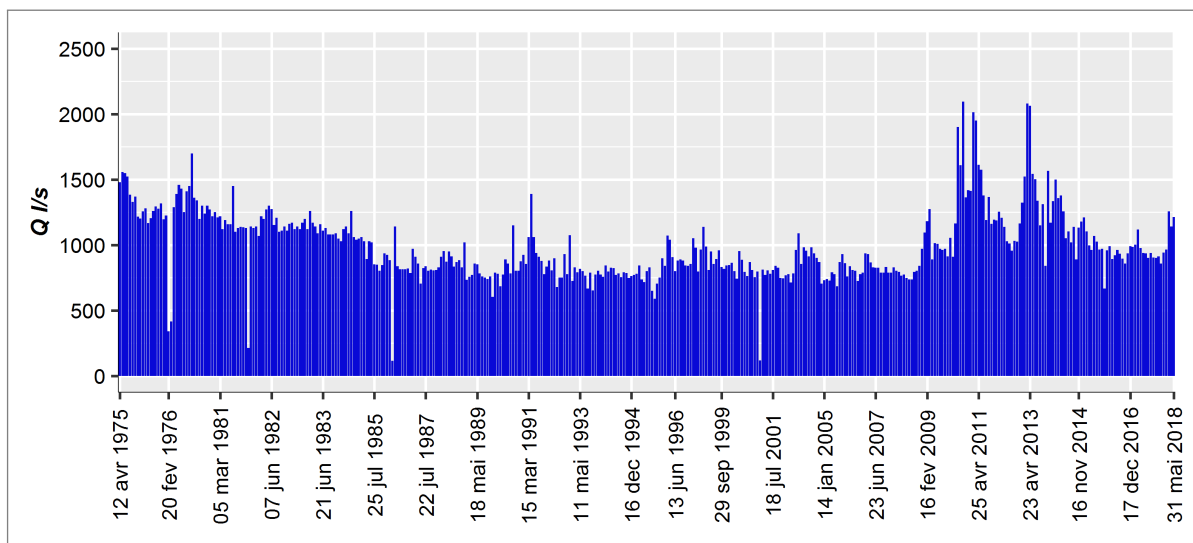


FIGURE 10.26. Variation du débit d'Ain Bittit (octobre 1975 au mai 2018)

Les sources karstiques ont fait l'objet de plusieurs études (Fiorillo, 2009 ; Nerantzaki and Nikolaidis, 2020 ; Çeliker et al., 2021). Ces études a permis de montrer leurs réponses aux changements climatiques et à la pression anthropique. Dans ce contexte, nous allons étudier trois sources situées aux bordures du Moyen Atlas tabulaire.

La tendance évolutive de débits des sources (Bittit, Ribaa aval et Ribaa amont) est illustrée par

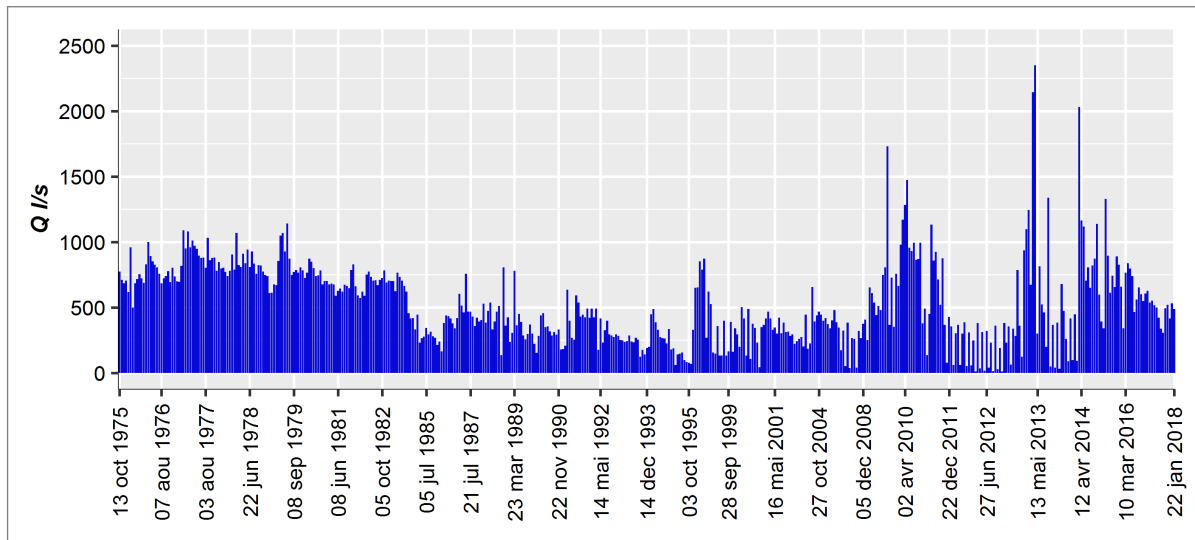


FIGURE 10.27. Variation du débit de Ribaa amont (octobre 1975 au janvier 2018)

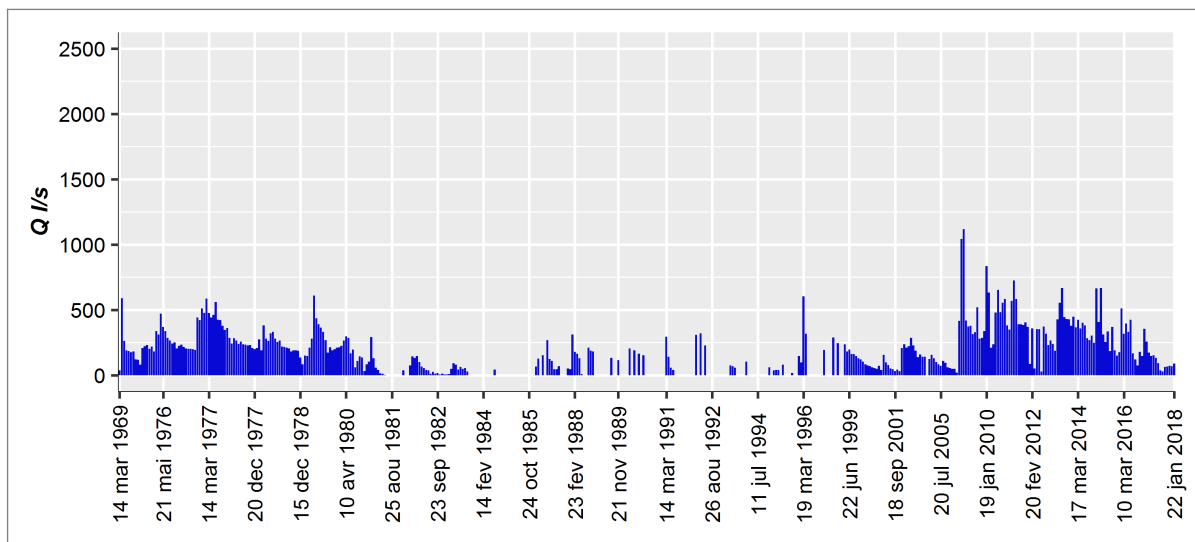


FIGURE 10.28. Variation du débit de Ribaa aval (mars 1969 au janvier 2018)

les figures 10.29 à 10.31. D'après les figures, quatre grandes périodes peuvent être distinguées ;

- 1) la première s'étend à partir de début des mesures jusqu'aux années 80 et se caractérise par une augmentation importante de débits des sources.
- 2) La deuxième commence à partir des années 80 et se distingue par une forte tendance des débits à la baisse où les anomalies négatives atteignent des valeurs maximales sur une longue durée.
- 3) la troisième (2009 – 2016) se caractérise par un accroissement remarquable des débits de sources.
- 4) dans la quatrième (à partir de 2016) période, les débits des sources ont enregistré une tendance à la baisse.

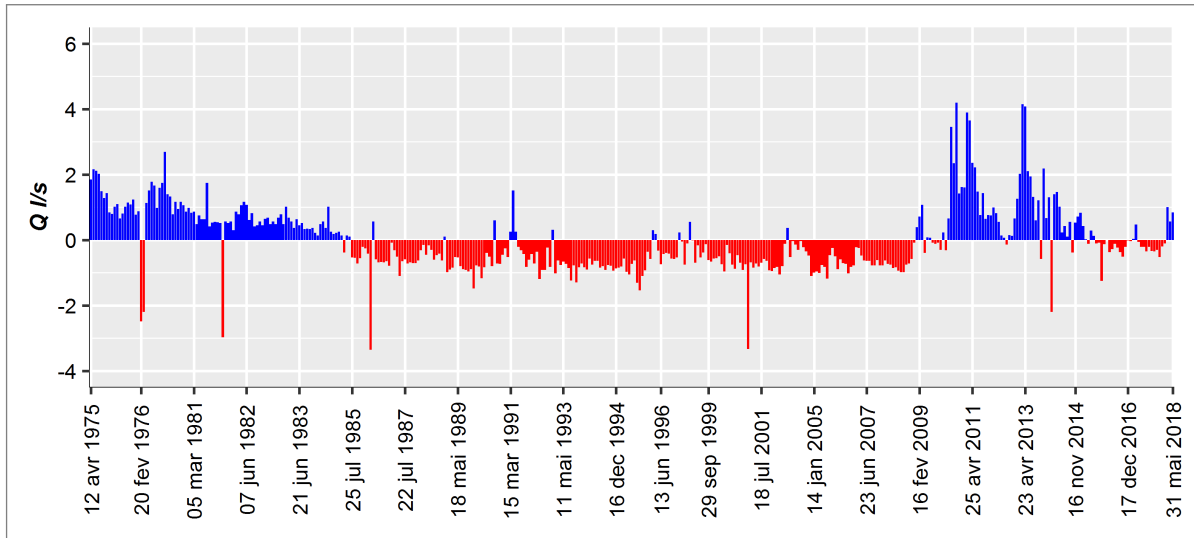


FIGURE 10.29. Anomalies au niveau des débits d'Ain Bittit (mars 1969 au janvier 2018)

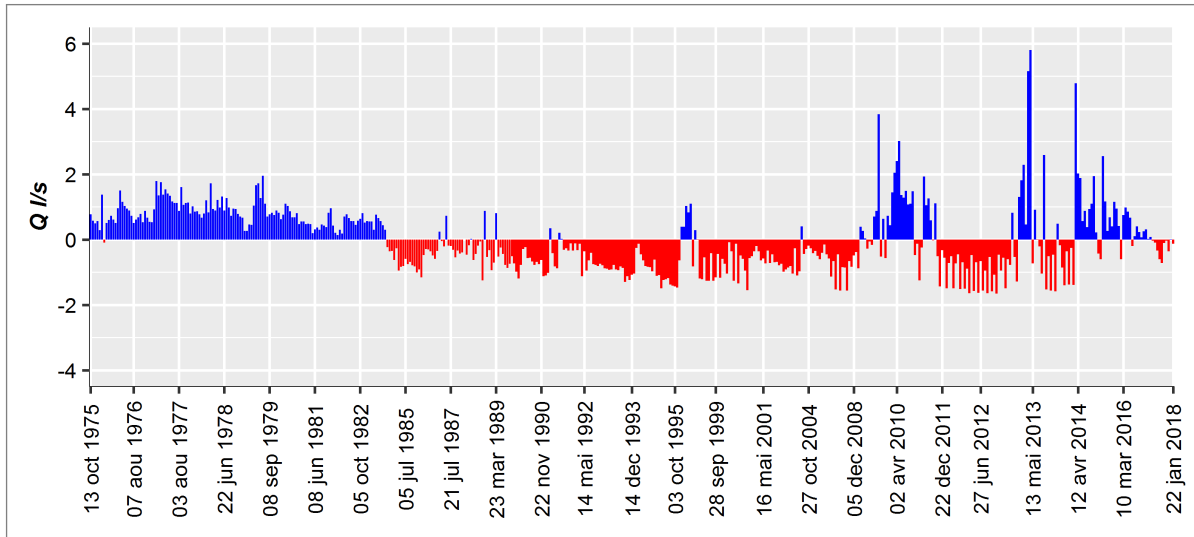


FIGURE 10.30. Anomalies au niveau des débits de Ribaa amont (octobre 1975 au janvier 2018)

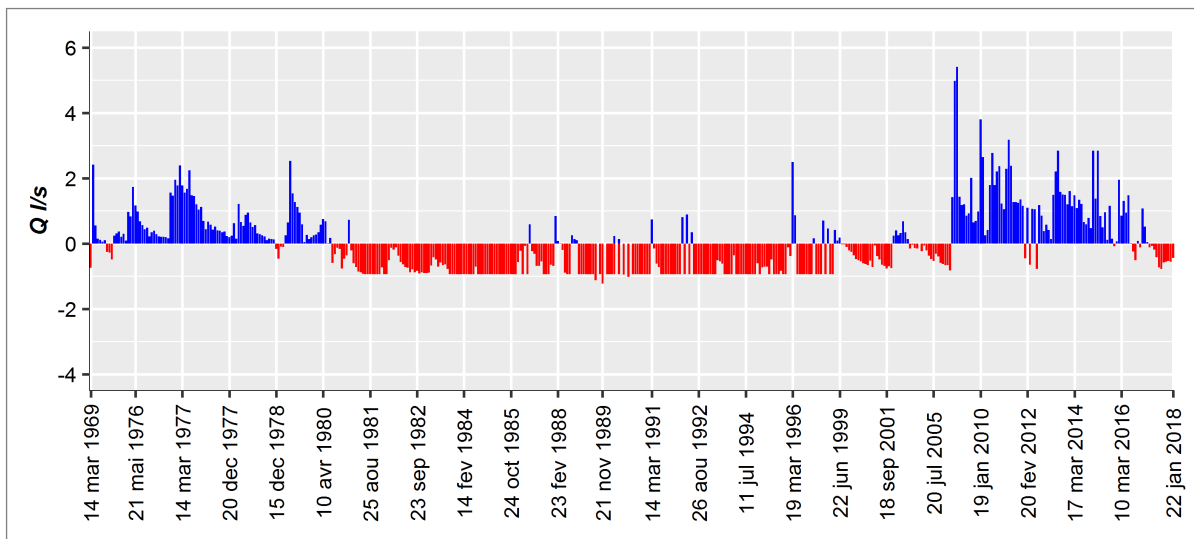


FIGURE 10.31. Anomalies au niveau des débits de Ribaa aval (mars 1969 au janvier 2018)

2.4.2. Débits des oueds

L'étude de la variabilité mensuelle et annuelle des débits entre 1956 et 2013 se base sur le traitement des données de trois stations hydrologiques disponibles.

La figure 10.32 montre une forte variation des débits dans les différentes stations. Ainsi, elle met en lumière un fort contraste saisonnier des débits. Les valeurs les plus faibles se concentrent dans la période estivale, et les plus élevées en mars et avril.

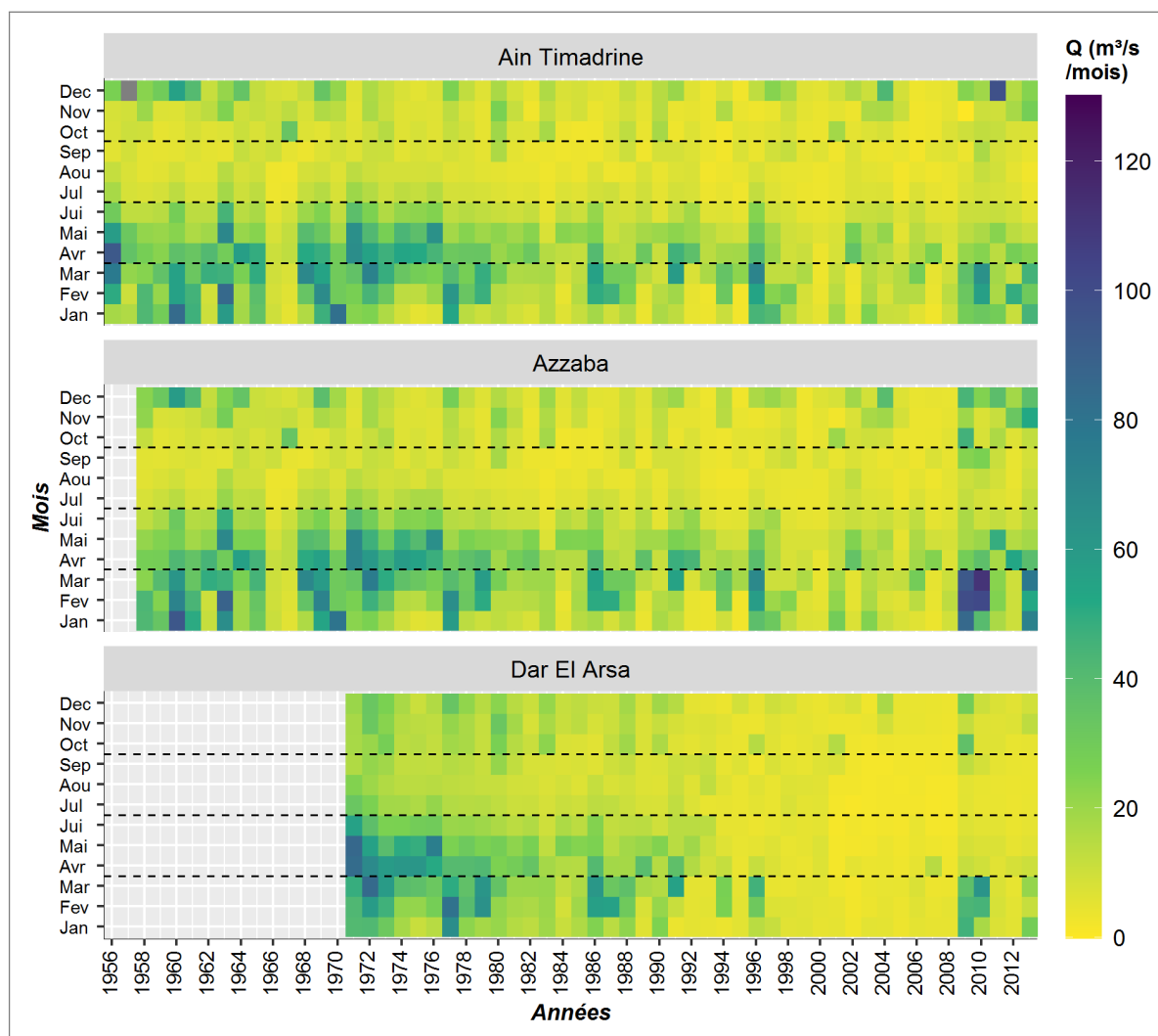


FIGURE 10.32. Caractérisation du débit mensuel (M3/s) entre 1956 et 2013

L'évolution des indices des modules annuels des débits de quatre stations (Azzaba, Ain Timadrine et Dar El Arsa) montre une régression de l'écoulement relativement homogène (fig. 10.33). Il s'agit de la tendance à la diminution à partir des années 80 jusqu'à 2010. Cette période correspond aux longues périodes de sécheresse qu'a connu le Maroc depuis la fin des années 70 et le début des années 80. En revanche, à partir de l'année 2010 le Moyen Atlas a enregistré

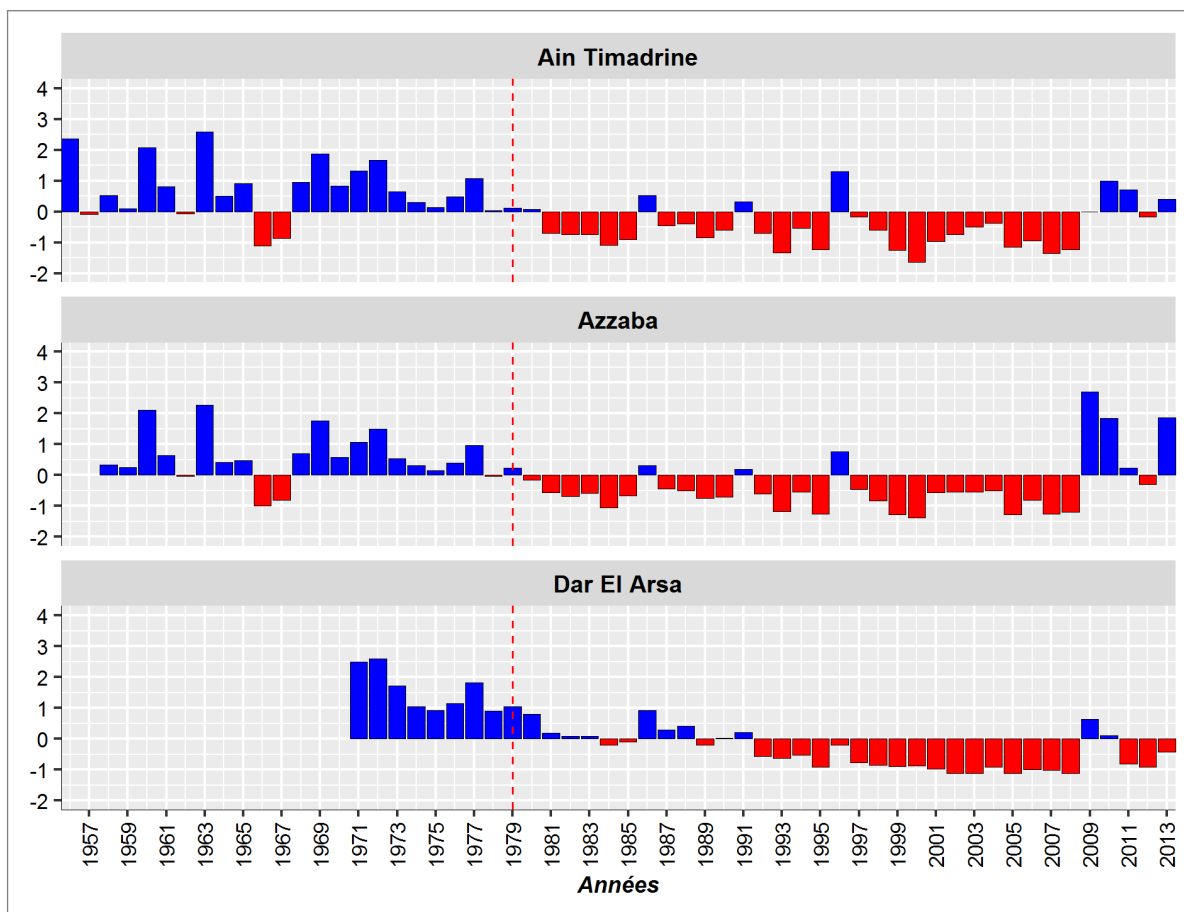


FIGURE 10.33. Évolution interannuelle des modules annuels des débits des stations d'Ain Timadrine, Azzaba et Dar El Hamra (1956 - 2013)

une augmentation remarquable des précipitations, cette augmentation se traduit localement par la tendance des débits à la hausse dans les stations d'Azzaba et Ain Timadrine, par contre au niveau de la station de Dar El Arsa la tendance des débits reste négative à l'exception de quelques années (2009-2010).

Pour détecter les ruptures au niveau des séries des débits des stations d'Azzaba et d'Ain Timadrine nous avons utilisé la méthode de CUSUM. Le courbe C_j (fig. 10.34) met en évidence que les séries se caractérisent par une hétérogénéité remarquable durant la période qui s'étend de 1956 à 2013. Il s'agit de la succession des périodes humides et sèches, généralement trois grandes périodes peuvent être distingué (1956-1979, 1980-2009 et 2010-2013). La comparaison entre les CUSUMs des précipitations et les CUSUMs des débits montre que la tendance des débits varie en fonction des précipitations.

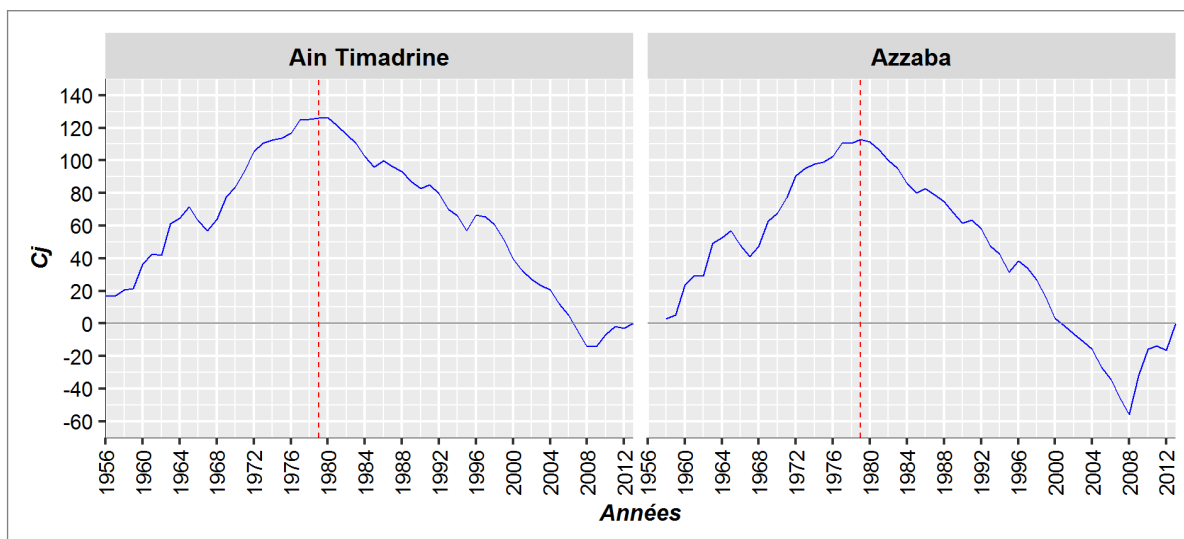


FIGURE 10.34. CUSUM des modules annuels à la station d'Azzaba (1958-2013) et d'Ain Timadrine (1956-2013)

3. Adaptation/réponse du système hydroagricole aux changements climatiques et aux pressions anthropiques

Dans la première partie (chapitre 3), un aperçu sur l'histoire de l'agriculture au Maroc est présenté. Cela nous a permis de comprendre les forces motrices qui ont participé à l'évolution de l'agriculture en générale et de l'agriculture irriguée en particulier. (Jouve, 2006) a indiqué que l'agriculture au Maroc a évolué en fonction des trois temps de l'eau ; l'eau du ciel (temps de l'agriculture pluviale et des petites hydrauliques), l'eau d'Etat (Lancement de la politique des barrages après l'indépendance et la réalisation de grands aménagements hydro-agricoles), l'eau privée (L'essor des pompages privés et le recours massif aux eaux souterraines).

Le recours massif aux eaux souterraines dans un contexte de la tendance du climat vers la sécheresse pour assurer l'irrigation des périmètres irrigués a conduit à une baisse alarmante du niveau des nappes souterraines. En parallèle avec la dégradation des ressources en eau, le système hydroagricole a enregistré des modifications successives. Ces modifications sont observées sur l'ensemble du territoire marocain. Dans ce travail, nous avons focalisé sur la dépression de Guigou située dans le Moyen Atlas pour présenter les grands changements au niveau du système hydroagricole. En effet, plusieurs phases d'évolution peuvent être distinguées.



Photo 10.1 : Seguias aménagées pour l'acheminement des eaux d'irrigation dans la dépression de Guigou



Photo 10.2 : Seguias aménagées pour l'acheminement des eaux d'irrigation dans la dépression de Guigou



Photo 10.3 : Barrage de partage des eaux d'irrigation sur oued Guigou au niveau de Aït Hamza



Photo 10.4 : Point de partage des eaux d'irrigation entre les agriculteurs au sein de la dépression de Guigou

FIGURE 10.35. Canaux d'irrigation à partir d'oued Guigou après l'aménagement des anciennes Seguias

La première phase : jusqu'aux années 1960, la plaine de Guigou a été dominée par la céréaliculture (maïs, orge, blé) extensive qui complète l'activité pastorale. La superficie irriguée à partir d'un réseau traditionnel (des seguias) dérivant de l'oued Guigou et ses sources a été très limitée (Jennan, 1986 ; Loubignac, 1938). Après cette période les populations ont été passées d'une société des transhumants à une société fixée autour des terres de pâturages et des ressources en eau, cette fixation a permis l'apparition des premiers noyaux de sédentarisation et l'aménagement des canaux d'irrigation traditionnelle (photos 10.3, 10.4, 10.5 et 10.6 *in* fig. 10.35) ce qui a favorisé l'augmentation de la superficie des cultures irriguées.

La deuxième phase : Corresponds à la sécheresse qui a affecté le Maroc durant les années

80. L'indigence des écoulements de surface durant la période végétative a contraint les agriculteurs à s'alimenter secondairement à partir de la nappe d'eau souterraine. Cette phase est donc marquée par l'amélioration des techniques d'irrigation. Il s'agit de l'introduction des motopompes (photo 10.7 *in fig. 10.36*), la multiplication des puits et l'utilisation du goutte-à-goutte (photo 10.8 *in fig. 10.36*). Cela a favorisé le développement de nouvelles surfaces irriguées au détriment de terrains de pâturages et terrains de cultures pluviales. Dans cette phase, les motopompes fonctionnent en continu durant toute la durée de l'irrigation.



Photo 10.7 : Utilisation du gaz pour le pompage des eaux souterraines

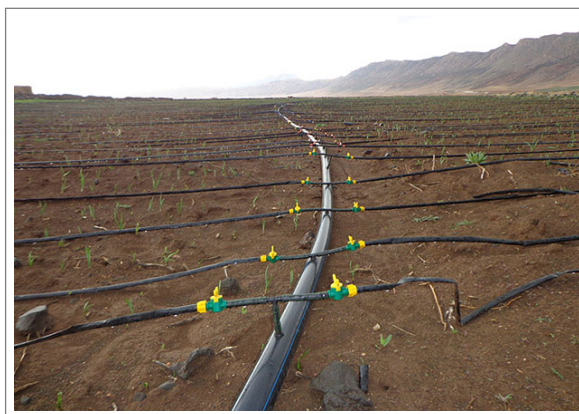


Photo 10.8 : Utilisation du goutte-à-goutte pour l'irrigation des périmètres irrigués

FIGURE 10.36. Techniques d'irrigation dans la plaine de Guigou

La troisième phase d'évolution est caractérisée par une extension remarquable des surfaces irriguées dans les différents endroits de la dépression. Cela a eu pour effet une augmentation accrue de la pression sur les ressources en eau souterraine qui est notable à partir de trois phénomènes. Le premier est la densification des puits par rapport aux deux phases précédentes. Le second, déjà noté dans les années 1990, est le surcreusement de puits existants pour atteindre un niveau piézométrique plus profond. Enfin, le troisième phénomène est l'apparition des bassins (photos 7, 8 et 9) de collecte de l'eau pompée à partir de la nappe vraisemblablement due au fait qu'un nombre de puits sont devenus incapable d'alimenter une pompe pendant une durée suffisante pour l'irrigation.

La troisième phase : depuis récemment, la dépression de Guigou enregistre une extension très remarquable des surfaces irriguées au détriment des terrains de pâturages et des cultures pluviales. Cela a eu pour effet une augmentation accrue de la pression sur les ressources en eau souterraine qui est notable à partir de trois phénomènes. Le premier est la densification

des puits par rapport aux deux phases précédentes. Le second, déjà noté dans les années 1990, est le surcreusement de puits existants pour atteindre un niveau piézométrique plus profond. Enfin, le troisième phénomène est l'apparition des bassins (photos 10.9, 10.10, 10.11 et 10.12 *in fig. 10.37*) de collecte de l'eau pompée à partir de la nappe vraisemblablement due au fait qu'un nombre de puits sont devenus incapables d'alimenter une pompe pendant une durée suffisante pour l'irrigation.

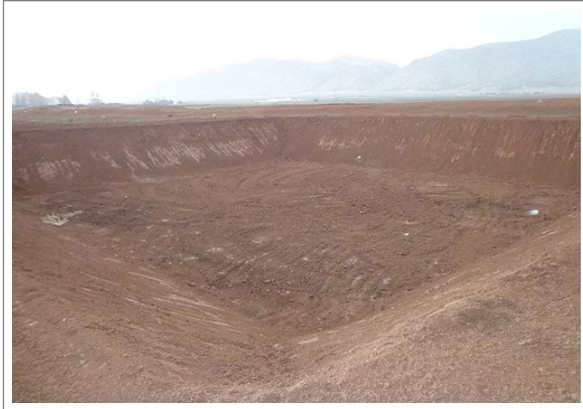


Photo 10.9 : Bassin en cours de la réalisation



Photo 10.10 : Bassins de collecte de l'eau pompée à partir de la nappe

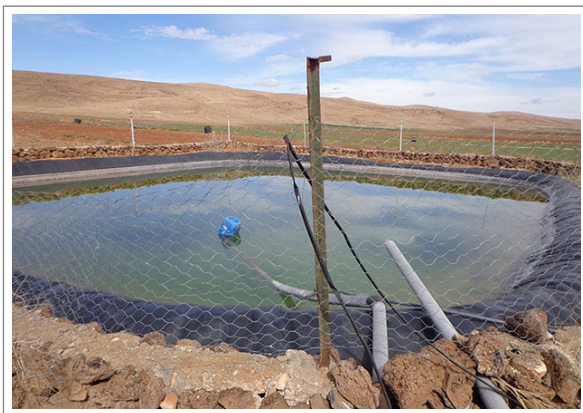


Photo 10.11 : Bassins de collecte de l'eau pompée à partir de la nappe



Photo 10.12 : Tuyaux d'acheminement de l'eau à partir des endroits où le niveau piézométrique est moins profond

FIGURE 10.37. Techniques utilisées par les agriculteurs pour pallier la problématique de dégradation des eaux souterraines dans la dépression de Guigou

Ainsi dans les zones de la dépression qui se distinguent par un niveau piézométrique profond, les agriculteurs utilisent une autre technique pour garantir l'irrigation des cultures. Il s'agit de l'acheminement de l'eau à partir des endroits où le niveau piézométrique est moins profond (photo 10.12 *in fig. 10.37*).

Conclusion

Les conséquences des changements climatiques et des modifications des pratiques agricoles sur les ressources en eau sont observées tant à l'échelle nationale qu'internationale. Les travaux réalisés dans ce domaine montrent la situation actuelle préoccupante des ressources en eau. À l'échelle de la zone d'étude, la réalisation des mesures piézométriques, le suivi du niveau du dayet Aoua à partir des images satellites et l'analyse des séries des débits des sources et des oueds mettent en lumière que cette partie du Maroc s'inscrit dans le contexte de dégradation alarmante des ressources en eau. Localement, cette situation se traduit par une baisse généralisée des nappes souterraines, un assèchement des lacs sur plusieurs années et une chute brutale des débits notamment à partir des années 1980. Cette situation inquiétante a poussé les agriculteurs à s'adapter en sollicitant de façon accrue, les ressources en eau souterraine et le changement successif du système hydro-agricole. Le dernier stade à ce jour dans le mode d'exploitation des nappes s'observe dans les dépressions du Moyen Atlas par la présence de bassins.

Conclusion de la troisième partie

À l'échelle nationale et internationale, les scénarios obtenus par les chercheurs optimistes et/ou pessimistes indiquent une variabilité remarquable du climat. Il s'agit de la diminution des précipitations et l'augmentation de la température. En parallèle avec cette situation inquiétante, les cultures basées sur l'irrigation ont enregistré une extension importante au détriment des prairies naturelles, des terrains de pâturages et des forêts. Les changements successifs au niveau des pratiques agricoles dans un contexte des changements globaux ont conduit à une pression sans précédent sur les ressources en eau. Cette pression se traduit dans plusieurs endroits du monde par une baisse alarmante de niveau des nappes souterraines.

À l'échelle du Moyen Atlas tabulaire, les conséquences de la tendance du climat vers la sécheresse durant les dernières décennies (diminution et variation spatiotemporelle des précipitations, l'augmentation de la température et le déplacement des étages bioclimatiques) et de l'extension des surfaces agricoles irriguées sont observées au niveau des ressources en eau superficielle et souterraine. Les principaux aspects de dégradation des ressources en eau dans

la zone d'étude résident dans la baisse générale de niveau des nappes, l'assèchement total des lacs et la chute brutale des débits des sources et des oueds. Ce déficit hydrologique a provoqué de forts changements du système hydro-agricole, la dernière phase d'évolution est l'apparition des bassins de collecte des eaux souterraines dans plusieurs endroits, car un nombre important des puits sont devenus incapables d'alimenter la pompe pendant une longue durée.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

Des thématiques entremêlées, les ressources en eau, la dynamique d'occupation des sols et les changements climatiques occupent une place hyper importante dans les recherches scientifiques. Les études menées dans ce cadre sont nombreuses et les résultats obtenus dans les différents pays montrent que la perturbation d'un élément influence directement ou indirectement d'autres éléments. En guise d'exemple, la dynamique d'occupation des sols marquée essentiellement par l'extension des périmètres irrigués dans un contexte des changements climatiques a fortement influencé les ressources en eau. Les travaux qui s'intéressent à l'étude des changements globaux ont fait l'objet d'une urgence collaboration internationale des communautés scientifiques depuis la conférence de l'ONU à Stockholm "The Human Environment" en 1972. Ces changements concernent les grandes modifications engendrées par les facteurs naturels et les activités anthropiques (Corgne, 2014). Dans ce contexte, les études enregistrent une augmentation importante durant les dernières afin de comprendre les principaux facteurs interviennent dans la dynamique des milieux naturels et son impact sur les ressources en eau.

Les résultats obtenus par les chercheurs suggèrent une diminution remarquable des précipitations et une tendance à la hausse des températures. En parallèle avec cette situation inquiétante du climat, les pratiques d'occupation des sols enregistrent des transformations radicales dans plusieurs endroits du globe. Il s'agit principalement du remplacement des systèmes traditionnels d'occupations des sols par des systèmes modernes notamment dans le domaine de l'agriculture. Ce développement se traduit par une extension considérable des périmètres irrigués durant les dernières décennies au détriment des terres des cultures pluviales, des forêts et des terres de pâturages. Cette phase a coïncidé avec de longues périodes de sécheresse, ce qui a provoqué une pression très forte sur les ressources en eau et conduit à l'amplification du déficit hydrologique. Face à cette situation préoccupante, les chercheurs et les organisations à l'échelle nationale qu'international, recommandent la multiplication des recherches et à l'approfondissement des connaissances scientifiques relatif à la thématique qui combine les ressources en eau, l'occupation des sols et le climat.

Globalement, l'unanimité se fait par les communautés scientifiques sur les impacts des changements climatiques et des modifications d'utilisation des terres sur les ressources en eau. Les

deux facteurs (climat et occupation des sols) sont considérés comme des principaux moteurs qui interviennent dans la perturbation du cycle hydrologique. Ainsi, les chercheurs ont montré que l'analyse des trois thèmes interdépendants, la couverture terrestre, le climat et l'eau constitue une base solide pour la planification et la réalisation des projets d'aménagement du territoire et pour l'élaboration des stratégies de développement durable des ressources et des activités anthropiques.

Des études ont été réalisées dans ce contexte à des échelles spatiales et temporelles différentes. Dans ce travail, nous avons étudié l'impact des changements climatiques et des modifications d'occupation des sols sur les ressources en eau superficielle et souterraine dans le Moyen Atlas tabulaire. La mise en évidence de la situation actuelle et passée d'occupation des sols, du climat et des ressources en eau a basé sur l'utilisation des données multi-sources et multi-dates à savoir, les images satellites (Landsat, Corona et Sentinel), les séries des données hydro-climatiques et le travail de terrain. Le traitement des différents types de données a appuyé sur l'application d'une méthodologie pluridisciplinaire.

Comme les autres régions montagnardes du bassin méditerranéen, le Moyen Atlas tabulaire a subi des modifications majeures au niveau des structures paysagères et sociales sous l'effet de la combinaison des facteurs naturels et anthropiques. Les principaux aspects de ces modifications sont observés dans plusieurs dépressions intra-montagnardes. Il s'agit principalement de la dégradation progressive des éléments de gestion traditionnelle des terres et la croissance continue des pratiques modernes d'occupation des sols.

Les résultats obtenus d'après le traitement des images satellites montrent que les trois secteurs étudiés (dépressions de Guigou, d'Imouzzer et de dayet Aoua, d'Afourgagh et de Laanoucer) ont fait l'objet d'une dynamique remarquable d'occupation des sols. Celle-ci est marquée essentiellement par l'extension des surfaces irriguées au détriment des terrains de pâturages et les terres de cultures pluviales. Entre 1985 et 2018, la superficie des cultures irriguées (maraîchères et vergers de rosacées) dans les trois dépressions a multiplié par plus de cinq dans les dépressions de Guigou et d'Afourgagh et plus de trois dans les dépressions d'Imouzzer et de dayet Aoua. En parallèle avec les grandes transformations au niveau d'occupation des sols, les milieux montagnards du Moyen Atlas ont enregistré également une dynamique paysagère,

économique et sociale très profonde.

Pour montrer la variabilité et la tendance du climat, nous avons appliqué plusieurs indices statistiques (CUSUM, Segmentation de Hubert et indice de Nicholson). Sur les séries des données climatiques (Précipitations et température) des stations situées dans des endroits différents (Moyen Atlas et Rif). Les résultats obtenus montrent que l'ensemble des stations s'inscrit dans un contexte du changement climatique. À partir des années 80, les stations ont enregistré une tendance globale vers une sécheresse climatique très sévère. Statistiquement, cette situation est traduite par un déficit pluviométrique cumulé et une hausse de la température. Les changements des précipitations et de la température ont conduit au déplacement des étages bioclimatiques calculés par l'indice d'Emberger Q2. Ce changement brutal des paramètres climatiques a participé à la perturbation des systèmes agricoles basés sur les précipitations et a conduit vers l'intensification des pratiques agricoles basées sur l'irrigation.

En parallèle avec le traitement statistique des données climatiques, nous avons spatialisé les précipitations sur l'ensemble du Moyen Atlas entre 1974 et 2017 par l'application du modèle PLUVIA. Les résultats obtenus montrent que les précipitations se caractérisent une variabilité spatiotemporelle remarquable. Ainsi, dans ce travail nous avons confronté les précipitations issues des stations avec celles des satellites GPM et TRMM. La comparaison entre les deux types de données indique une bonne corrélation notamment avec les données du satellite GPM 3IMERGPMV6.

Les modifications successives des pratiques d'occupation des sols dans le Moyen Atlas dans un contexte du changement climatique ont conduit au cours des dernières décennies à une pression sans précédent sur les ressources en eau. Localement se traduit par une baisse généralisée des nappes souterraines, un assèchement total des lacs et une chute brutale des débits des sources et des oueds. Ce déficit hydrologique a conduit au cours du temps à des changements consécutifs au niveau du système hydro-agricole comme forme d'adaptation avec la dégradation continue des ressources en eau. La dernière phase de développement du système d'irrigation observée sur le terrain est l'apparition des bassins de collecte des eaux à partir des nappes souterraines, car dans plusieurs endroits des dépressions les puits sont devenus incapables d'alimenter la pompe pour une longue durée.

Actuellement, dans le Moyen Atlas, la question se pose sur la résilience des pratiques agricoles modernes basées essentiellement sur l'irrigation et leurs capacités d'adaptation aux changements climatiques et à l'amplification continue du déficit hydrologique. Dans ce contexte, les résultats obtenus d'après les futurs scénarios sur la région méditerranéenne indiquent une diminution des précipitations, une hausse de la température (De-Girolamo et al., 2022 ; Gorguner et Kavvas, 2020 ; Trambly et al., 2020), une baisse des nappes souterraines Rocha et al. (2020) et une extension continue des surfaces irriguées au détriment des terres de cultures pluviales, des forêts et des terres de pâturages comme forme d'adaptation aux changements climatiques (Nunes et al., 2017) et comme une mesure clé pour améliorer la production les rendements des terres.

REFERENCES

Références

- Aahd, A., Simonneaux, V., Sadik, V., Brahim, B., Fathallah, S., 2009. Estimation des volumes d'eau pompés dans la nappe pour l'irrigation (plaine du haouz, marrakech, MAROC). comparaison d'une méthode statistique et d'une méthode basée sur l'utilisation de la télédétection. *Revue des sciences de l'eau* 22(1), 1–13. doi :<https://doi.org/10.7202/019820ar>.
- Abd-Elhamid, A.M.I., Eltahan, A.M.H., Mohamed, L.M.E., Hamouda, I.A., 2009. Assessment of the two satellite-based precipitation products TRMM and (RFE) rainfall records using ground based measurements. *Alexandria Engineering Journal* 59, 1049–1058. doi :[Doi .org/10.1016/j.aej.2020.03.035](https://doi.org/10.1016/j.aej.2020.03.035).
- Abdul-Azeez, S., Gnanappazham, L., Muraleedharan, K.R., Revichandran, C., John, S., Seena, G., Jubin, T., 2022. Multi-decadal changes of mangrove forest and its response to the tidal dynamics of thane creek, mumbai. *Journal of Sea Research* 180, 102162. doi :<https://doi.org/10.1016/j.seares.2021.102162>.
- Abera, W., Tamene, L., Abegaz, A., Solomon, D., 2019. Understanding climate and land surface changes impact on water resources using budyko framework and remote sensing data in ethiopia. *Journal of Arid Environments* 167, 56–64. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.04.017>.
- ABHS, 2010. Etude de restauration des lacs naturels du bassin du sebou. Mission I situation actuelle des lacs , 143 P.
- Achhal, A., Akabli, A., Barbero, M., Benabid, A., MHirit, O., Peyre, C., Quézel, P., Rivas-Martinez, S., 1979. À propos de la valeur bioclimatique et dynamique de quelques essences forestières au MAROC. *Ecologia mediterranea* 5, 211–249. doi :<https://doi.org/10.3406/ecmed.1979.960>.
- Adallal, R., 2019. Variabilité environnementale des lacs du MOYEN ATLAS marocain : fonctionnement hydrogéochimique, hydrologique et réponse au changement climatique. Thèse de doctorat. Université d'Aix-Marseille et Université Cadi Ayyad de Marrakech , 212 p.
- Ademe, D., Ziatchik, B.F., Tesfaye, K., Simane, B., Alemayehu, G., Adgo, E., 2020. Climate trends and variability at adaptation scale : Patterns and perceptions in an agricultural region of the ethiopian highlands. *Weather and Climate Extremes* 29, 100263. doi :<https://doi.org/10.1016/j.wace.2020.100263>.
- Ahmadi, K., Kalantar, B., Saeidi, V., Harandi, E.K.G., Janizadeh, S., Ueda, N., 2020. Comparison of machine learning methods for mapping the stand characteristics of temperate forests using multi-spectral sentinel-2 data. *Remote Sens* 12, 3019. doi :<https://doi.org/10.3390/rs12183019>.
- Ahmed, M., Aqnouy, M., Stitou-El-Messari, J., 2021. Sustainability of morocco's groundwater resources in response to natural and anthropogenic forces. *Journal of Hydrology* 603, 126866. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126866>.

- Ait-Hamza, M., Popp, H., 2005. Pour une nouvelle perception des montagnes marocaines. Actes du 7ème colloque Maroc-Allemand Rabat 2004, publications de la faculté des lettres et des sciences humaines de Rabat. Série colloques et séminaires 119, 13–14.
- Akdim, B., Sabaoui, A., Amyay, M., Laaouane, M., Gille, E., Obda, K.H., 2011. Influences hydro karstiques du système sourcier aïn sebou-timedrine-ouamender sur l'hydrologie de l'oued sebou (MOYEN ATLAS, MAROC). *Zeitschrift für Geomorphologie* 56, 2, 165–181. doi :DOI : 10 . 1127 / 0372 - 8854 / 2011 / 0063.
- Akesbi, N., 2005. Evolution et perspectives de l'agriculture marocaine. Rapport, groupe thématique «Croissance économique et développement humain», 50 ans de développement humain et perspectives 2025 , 114 p.
- Alamou, E.A., Quenum, G.D.L.D., Lawin, E.A., Badou, D.F., Afouda, A.A., 2016. Variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le bassin de l'ouémé, bénin. *Afrique Science* 12(3), 315–328.
- Alexandridis, T.K., Zalidis, G.C., Silleos, N.G., 2008. Mapping irrigated area in mediterranean basins using low cost satellite earth observation. *Comput. Electron. Agr* 64, 93–103. doi :https://doi.org/10.1016/j.compag.2008.04.001.
- Alhaskeer, Z., 2012. Analyse cartographique de la structure des paysages de vallées : évaluation de la dynamique des paysages de vallées du bassin versant de la maine à partir de la télédétection et de sig. géographie. Université du Maine , 520 p.
- Altmaier, A., Kany, C., 2002. Digital surface model generation from corona satellite images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 56, 221–235. doi :https://doi.org/10.1016/S0924-2716(02)00046-1.
- Amani, M., Salehi, B., Mahdavi, S., Brisco, B., 2018. Spectral analysis of wetlands using multi-source optical satellite imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 144, 119–136. doi :https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.005.
- Amraoui, F., 2005. Contribution à la connaissance des aquifères karstiques : cas du lias de la plaine du sais et du cause moyen atlasique tabulaire (MAROC). thèse de doctorat d'Etat, Université Hassan II Ain Chock faculté des Sciences. Casablanca , 237 p.
- Amyay, M., Ghaouti, S., Obda, K., Zhimi, M., 2015. Impact des mutations de l'occupation du sol dans le MOYEN ATLAS sur la turbidité des eaux de la source de bittit. Actes du Colloque international, Eau et Climat : Regards croisés Nord/Sud, Fès (MAROC) , 107–118.
- Amyay, M., Laaouane, M., Akdim, B., 2000. La pression anthropique sur les ressources en eau souterraine dans le MOYEN ATLAS. exemple de la dépression d'afourgagh. *Mosella*, T.XXV 3-4, 341–351.
- Amyay, M., Nouaceur, Z., Tribak, A., Okba, K., Taous, A., 2012. Caractérisation des événements pluviométriques extrêmes dans le MOYEN ATLAS et ses marges. 25ème Colloque de l'AIC. Grenoble , 75–80.

- Andersen, G.L., 2006. How to detect desert trees using corona images : Discovering historical ecological data. *Journal of Arid Environments* 65, 491–511. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.07.010>.
- Arvor, D., Dubreuil, V., Ronchail, J., Simões-Penello-Meirelles, M., 2008. Apport des données TRMM 3b42 a l'étude des précipitations au mato grosso. *Climatologie* 5, 49–69. doi :<https://doi.org/10.4267/climatologie.746>.
- Asseman, E.A., Kouame, F.K., Djagoua, E.V., Affian, K., Jourda, J., Adja, M., Lasm, T., Biemi, J., 2013. Étude de l'impact des variabilités climatiques sur les ressources hydriques d'un milieu tropical humide : cas du département de bongouanou (est de la côte d'ivoire). *Revue des sciences de l'eau* 26 (3), 247–261.
- Badidi, B., 1995. La révolution des vergers de rosacées dans le moyen-atlas. thèse de doctorat, Faculté des Lettres et Sciences Humaines, Limoges , 448 p.
- Badidi, B., 1999. Le MOYEN ATLAS central à l'ère de l'arboriculture l'épanouissement d'une production moderne dans un milieu rural traditionnel. *Cahiers du CREAD* 48 (2), 37–55.
- Baghdadi, N., Mallet, C., Zribi, M., 2018. Qgis and applications in agriculture and forest. *ISTE Ltd* 2, 353 p.
- Baghdadi, N., Zribi, M., 2017. Observation des surfaces continentales par télédétection optique techniques et méthodes. *ISTE Ltd* 1, 365 p.
- Bahir, M., Ouhamdouch, S., Ouazar, D., 2021. An assessment of the changes in the behavior of the groundwater resources in arid environment with global warming in morocco. *Groundwater for Sustainable Development* 12, 100541. doi :<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100541>.
- Bahir, M., Ouhamdouch, S., Ouazar, D., El-Moçayd, N., 2020. Climate change effect on groundwater characteristics within semi-arid zones from western morocco. *Groundwater for Sustainable Development* 11, 100380. doi :<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100380>.
- Banque-Mondiale, 1992. Projet de développement agricole du moyen-atlas central (rapport d'achèvement de projet) , 39 p.
- Barakat, F., Handoufe, A., 1997. La sécheresse agricole au MAROC. sustainability of water resources under increasing uncertainty. *IAHS* 240, 31–41.
- Bekkari, L., 2009. Dynamiques institutionnelles des systèmes d'irrigation communautaires au MOYEN ATLAS (MAROC). de la communauté à l'association des irrigants. Thèse de la Faculté des sciences économiques, sociales et politiques, presses universitaires de Louvain , 293 p.
- Bekkari, L., Kadiri, Z., Faysse, F., 2008. Appropriations du cadre de l'association des usagers des eaux agricoles par les irrigants au MAROC. analyse comparative de cas au MOYEN ATLAS et MOYEN SEBOU. Troisième atelier régional du projet Sirma, Nabeul Tunisie. *Cirad* , 8 p.

- Belenok, V., Noszczyk, T., Hebryn-Baidy, L., Kryachok, S., 2021. Investigating anthropogenically transformed landscapes with remote sensing. *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 24, 100635. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100635>.
- Belgiu, M., Csillik, O., 2018. Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis. *Remote Sensing of Environment* 204, 509–523. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2017.10.005>.
- Belgiu, M., Drăguț, L., 2016. Random forest in remote sensing : A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 114, 24–31. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.01>.
- Beltrame, C., Perennou, C., Guelmami, A., 2015. Évolution de l'occupation du sol dans les zones humides littorales du bassin méditerranéen de 1975 à 2005. *Méditerranée* 125, 97–111. doi :<https://doi.org/10.4000/mediterranee.8046>.
- Benabid, A., 1988. Contribution à l'étude des groupements non forestiers du MOYEN ATLAS central (MAROC). *Bull.Inst. Sei., Rabat* 12, 79–98.
- Benabid, A., 2000. Flore et écosystèmes du MAROC : évolution et préservation de la biodiversité. *Ibis Press* , 360 p.
- Bentayeb, A., Leclerc, C., 1977. Le MOYEN ATLAS, le causse moyen atlasique, ressources en eau du MAROC tome 3 domaines atlasique et sud atlasique. *Service géologique du MAROC, Rabat* , 37–65.
- Berthelie, P., Lipchitz, A., 2005. Quel rôle joue l'agriculture dans la croissance et le développement ? *Revue Tiers Monde* 183, 603–624. doi :[DOI10.3917/rtm.183.0603](https://doi.org/10.3917/rtm.183.0603).
- Bertrand, G., 1978. Le paysage entre la nature et la société. *Revue géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest, fascicule 2. Géosystème et aménagement* 49, 239–258.
- Bhandari, A., Phinn, S., Gill, T., 2012. Preparing landsat image time series (lits) for monitoring changes in vegetation phenology in queensland, australia. *Remote Sens* 4 (6), 1856–1886. doi :<https://doi.org/10.3390/rs4061856>.
- Bhatnagar, S., Gill, L., Regan, S., Naughton, O., ans S Waldren, P.J., Ghosh, B., 2020. Mapping vegetation communities inside wetlands using sentinel-2 imagery in ireland. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 88, 102083. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102083>.
- Bian, J., Lia, A., Leia, G., Zhanga, Z., Nana, X., 2020. Global high-resolution mountain green cover index mapping based on landsat images and google earth engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 162, 63–76. doi :<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.02.011>.
- Blaschke, T., 2010. Object based image analysis for remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65, 2–16. doi :<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2009.06.004>.

- Boumir, K., 1990. Paléoenvironnements de dépôt et transformations post-sédimentaires des sables fauves du bassin du saïs (MAROC). Thèse de doctorat, université Nancy I, 180 p.
- Bretreger, D., Yeo, I.Y., Hancock, G., Willgoose, G., 2020. Monitoring irrigation using landsat observations and climate data over regional scales in the murray-darling basin. *Journal of Hydrology* 590, 125356. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydro1.2020.125356>.
- Brunet-Moret, Y., 1971. Etude de l'homogénéité de séries chronologiques de précipitations annuelles par la méthode des doubles masses. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol VIII* (4), 3–31.
- Brunner, P., Hunkeler, D., Rössler, O., Holzkämper, A., Cochand, F., et al, 2021. Cross-sphere modelling to evaluate impacts of climate and land management changes on groundwater resources. *Science of the Total Environment* 798, 148759. doi :<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148759>.
- Carle, G., 1925. Notes sur l'agriculture au MAROC. *Revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale*, 5, bulletin 45 31, 338–343.
- Celier, J., 1927. La transhumance dans le MOYEN ATLAS. *Hesperis*, 67 p.
- Chamayou, J., Combe, M., Genetier, B., Leclerc, C., 1975. Le bassin de meknés-fès, ressources en eau du MAROC. *Notes et Mémoires Service Géologique du MAROC Tome II*, 41–71.
- Chance, E.W., Cobourn, K.M., Thomas, V.A., 2018. Trend detection for the extent of irrigated agriculture in idaho's snake river plain, 1984–2016. *Remote Sens* 10 (1), 145. doi :<https://doi.org/10.3390/rs10010145>.
- Chang, Y., Kaufmann, R.K., Sik-Kim, C., Miller, J.I., Park, J.Y., Park, S., 2020. Evaluating trends in time series of distributions : A spatial fingerprint of human effects on climate. *Journal of Econometrics* 214, 274–294. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jeconom.2019.05.014>.
- Charre, J., de Saintignon, M.F., 1997. Le climat, l'eau et les hommes. Ouvrage en l'honneur de Jean Mounier. *Presses Universitaires de Rennes*, 65–85.
- Charrière, A., Ouarhache, D., El-Arabi, H., 2011. Le MOYEN ATLAS, notes et mémoires du service géologique n° 559. éditions du service géologique du Maroc Rabat 4, 7–107.
- Charrière, A., 1990. Héritage hercynien et évolution géodynamique alpine d'une chaîne intercontinentale : le MOYEN ATLAS au sud-est de fès (maroc). Thèse d'Etat, Université de Toulouse III, 589 p.
- Chaves, M.E.D., Picoli, M.C.A., Sanches, I.D., 2020. Recent applications of landsat 8/oli and sentinel-2/msi for land use and land cover mapping : A systematic review. *Remote Sens* 12, 3062. doi :<https://doi.org/10.3390/rs12183062>.

- Chen, Y., Luo, M., Xu, L., Zhou, X., Ren, J., Zhou, J., 2018. Object-based random forest classification of land cover from remotely sensed imagery for industrial and mining reclamation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-3*, 199–206. doi :<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-199-2018>.
- Chilasse, L., 2004. Les peuplements d'oiseaux d'eaux des lacs du MOYEN ATLAS : organisation spatio-temporelle et application à la typologie et à l'évaluation patrimoniale des sites. Thèse de doctorat d'état des Sciences Biologiques. Université Moulay Ismail, Faculté des Sciences, Meknès .
- Choukri, F., Raclot, D., Naimi, M., Chikhaoui, M., Nunes, J.P., Huard, F., Herivaux, C., Sabir, M., Pepin, Y., 2020. Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern morocco. *International Soil and Water Conservation Research* 8, 141e153. doi :<https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.03.003>.
- Churches, C.E., Wampler, P.J., Sun, W., Smith, A.J., 2014. Evaluation of forest cover estimates for haiti using supervised classification of landsat data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 30, 203–216. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.020>.
- Claval, P., 2013. Le rôle du terrain en géographie. *Confins* 17, 1–29. doi :DOI : 10.4000/confins.8373.
- Cohen, J.A., 1960. Coefficient of agreement for nominal scales. *educational and psychological measurement* XX, 37–46.
- Colo, G., 1961. Contribution à l'étude du jurassique du MOYEN ATLAS septentrional. *Notes, Mem. Serv. Géol, Rabat-Maroc* 119, 721–733.
- Congedo, L., 2021. Semi-automatic classification plugin : A python tool for the download and processing of remote sensing images in qgis. *Journal of Open Source Software* 6(64), 3172. doi :<https://doi.org/10.21105/joss.03172>.
- Corgne, S., 2004. Modélisation prédictive de l'occupation des sols en contexte agricole intensif : application à la couverture hivernale des sols en bretagne. Université Rennes2 , 230 p.
- Corgne, S., 2014. Étude des changements d'occupation et d'usage des sols en contexte agricole par télédétection et fusion d'informations. Université Rennes2 , 137 p.
- Cornet, Y., Fitschy, C., Gobbato, O., Erpicum, M., 2005. Modélisation de la distribution spatiale des précipitations en sicile. *Bulletin de la Société géographique de Liège* , 11–26.
- Cornillon, P.A., Hengartner, N., Lober, E.M., Rouvière, L., 2019. Régression avec r. 2ème édition. Editeur EDP Sciences , 384 p.

- Correia, R., Duarte, L., Teodoro, A.C., Monteiro, A., 2018. Processing image to geographical information systems (pi2gis)-a learning tool for qgis. *Educ. Sci* 8, 83. doi :doi :10.3390/educsci8020083.
- Czekajlo, A., Coops, N.C., Wulder, M.A., Hermosilla, T., White, J.C., van-den Boschand, M., 2021. Mapping dynamic peri-urban land use transitions across canada using landsat time series : Spatial and temporal trends and associations with socio-demographic factors. *Computers, Environment and Urban Systems* 88, 101653. doi :https://doi.org/10.1016/j.compenurbsys.2021.101653.
- Dad, J.M., Muslim, M., Rashid, I., Rashid, I., Reshi, Z.A., 2021. Time series analysis of climate variability and trends in kashmir himalaya. *Ecological Indicators* 126, 107690. doi :https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107690.
- Daget, P., 1977. Le bioclimat méditerranéen : analyse des formes climatiques par le système d'emberger. *Vegetatio* 34 (2), 87–103.
- De-Girolamo, A.M., Barca, E., Leone, M., Lo-Porto, A., 2022. Impact of long-term climate change on flow regime in a mediterranean basin. *Journal of Hydrology : Regional Studies* 41, 101061. doi :https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101061.
- Deines, J.M., Kendall, A.D., Crowley, M.A., Rapp, J., Cardille, J.A., Hyndman, D.W., 2019. Mapping three decades of annual irrigation across the us high plains aquifer using landsat and google earth engine. *Remote Sensing of Environment* 233, 111400. doi :https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111400.
- Delannoy, H., Lecompte, M., Romane, F., 1979. Géographie des températures quotidiennes dans le moyen-atlas et ses bordures : Analyse multivariée et situations atmosphériques. *L'Espace géographique* 8 (1), 25–41.
- Delgado-Artés, R., Garófano-Gómez, V., Oliver-Villanueva, J.V., Rojas-Briales, E., 2022. Land use/cover change analysis in the mediterranean region : a regional case study of forest evolution in castelló (spain) over 50 years. *Land Use Policy* 114, 105967. doi :https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105967.
- Denoix, S., 1999. Nicolas michel, une économie de subsistances. le MAROC précolonial, ifao, le caire, 1997. *Revue des mondes musulmans et de la Méditerranée* , 87–88doi :https://doi.org/10.4000/remmm.2371.
- Detriche, S., 2007. Evolution d'un système lacustre karstique au cours de la période historique d'après l'étude des archives sédimentaires : la dayet afourgagh (MOYEN-ATLAS, MAROC). Thèse de doctorat, Université de Tours , 388 p.
- Devos, A., Benjellel, M., Nejari, A., 2000. Les ressources en eau et leurs utilisations dans la plaine de guigou (MOYEN ATLAS, MAROC). *Mosella T.XXV*, n° 3-4, 327–339.

- Devos, A., Nejjari, A., 1998. La sécheresse hydrologique récente dans le bassin supérieur du sebou (MOYEN ATLAS). Rapport AUPELF-UREF , 57 p.
- Djebou, C.D.S., Conger, S., Szogi, A.A., Stone, K.C., Martin, J.H., 2021. Seasonal precipitation pattern analysis for decision support of agricultural irrigation management in louisiana, usa. *Agricultural Water Management* 254, 106970. doi :<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2021.106970>.
- Driouech, F., 2010. Distribution des précipitations hivernales sur le MAROC dans le cadre d'un changement climatique : descente d'échelle et incertitudes. Thèse de doctorat. Université Toulouse , 164 p.
- Drogue, G., Humbert, J., Deraisme, J., Mahr, N., Freslon, N., 2002. A statistical-topographic model using an omnidirectional parameterization of the relief for mapping orographic rainfall. *Int. J. Climatol* 22, 599–613. doi :DOI : 10.1002/joc.671.
- Dubois, C., Avignon, M., Escudier, P., 2014. Observer la terre depuis l'espace : Enjeux des données spatiales pour la société. Ed. Dunod , 256 p.
- Duran-Llacer, I., Arumí, J.L., Arriagada, L., Aguayo, M., Rojas, O., González-Rodríguez, L., Rodríguez-López, L., Martínez-Retureta, R., Oyarzún, R., Singh, S.K., 2022. A new method to map groundwater-dependent ecosystem zones in semi-arid environments : A case study in chile. *Science of the Total Environment* 816, 151528. doi :<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151528>.
- Dutrieux, L.P., Jakovac, C.C., Latifah, S.H., Kooistra, L., 2016. Reconstructing land use history from landsat time-series case study of a swidden agriculture system in brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 47, 112–124. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2015.11.018>.
- Dwire, K.A., Mellmann-Brown, S., Gurrieri, J.T., 2018. Potential effects of climate change on riparian areas, wetlands, and groundwater dependent ecosystems in the blue mountains, oregon, usa. *Climate Services* 10, 44–52. doi :<https://doi.org/10.1016/j.cliser.2017.10.002>.
- El-Assaoui, N., Amraoui, F., El-Mansouri, B., 2015. Modélisation numérique de l'effet des changements climatiques sur la nappe de berrechid (MAROC). *European Scientific Journal* 11 (23), 218–239.
- El-Assaoui, N., Sadok, A., Merimi, I., 2021. Impacts of climate change on moroccan's groundwater resources : State of art and development prospects. *Materials Today : Proceedings* 45, 7690–7696. doi :<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.220>.
- El-Bouhali, A., Amyay, M., Lebaut, S., El Ouazani Ech-Chahdi, Kh., Gille, E., 2021d. La pression de la dynamique des cultures irriguées sur les ressources en eau dans la plaine de guigou, MOYEN ATLAS-MAROC. Actes du colloque International sur la dynamique de l'environnement et les risques naturels en milieux méditerranéens. Oujda , 197–202.

- El-Bouhali, A., Amyay, M., Lebaut, S., Gille, E., El Ouazani Ech-Chahdi, Kh., Cotonnec, A., 2021a. Cartographie et quantification des surfaces irriguées par télédétection dans les dépressions d'imouzar et dayet aoua (MOYEN ATLAS tabulaire). In les ressources en eau dans un contexte de variabilité climatique : gestion, mutations et enjeux de durabilité. Pubs, FLS Ibn Zohr, Agadir , 17 – 30.
- El-Bouhali, A., Cotonnec, A., Lebaut, S., Amyay, M., Thomas, A., El Ouazani Ech-Chahdi, Kh., Laouanne, M., Gille, E., 2023. Remote sensing monitoring of irrigated areas from 1972 to 2018 in the GUIGOU plain, (MIDDLE ATLAS, MOROCCO). *Journal Of Water And Land Development* 56 (I-III), 249–261. doi :DOI : 10 . 24425 / jwld . 2023 . 143766.
- El-Bouhali, A., Lebaut, S., Amyay, M., El Ouazani Ech-Chahdi, Kh., Gille, E., Cotonnec, A., 2021e. L'im-pact combiné des déficits pluviométriques cumules et de l'extension des cultures irriguées sur les ressources en eau dans la dépression de guigou (MOYEN ATLAS - MAROC). Actes du colloque interna-tional, changement climatique, potentialités territoriales et justice environnementale. Fès, 283–299.
- El-Bouhali, A., Lebaut, S., Amyay, M., Qadem, A., Gille, E., Cotonnec, A., 2021c. Evaluation du contexte bioclimatique récent des périmètres irrigués du MOYEN ATLAS et ses bordures (MAROC) à partir du quotient pluviothermique d'emberger. Actes du 34ème colloque de l'AIC, Mohammedia - MAROC , 176–181.
- El-Bouhali, A., Lebaut, S., Qadem, A., Amyay, M., Gille, E., Cotonnec, A., 2020. Evaluation des produits TRMM et GPM à partir d'observations aux stations et de résultats d'un modèle de quantification spatiale des précipitations sur le MOYEN ATLAS, MAROC. Actes du 33ème colloque de l'AIC, Rennes , 259–264.
- El-Fellah-Idrissi, B., Cherai, B., Hinaje, S., , Mehdi, K., 2017. La variabilité climatique et son influence sur les ressources en eau dans la partie septentrionale du MOYEN ATLAS marocain : cas des causes de sefrou et de l'anoceur. *Larhyss Journal* , 155 –179.
- El-Ghomari, K., 2016. La politique et les bienfaits des barrages au MAROC. présentation du directeur des Aménagements Hydrauliques , 50 p.
- El-Hendawy, S., Al-Suhaibani, N.A., Hassan, W.M., Dewir, Y.H., Elsayed, S., Al-Ashkarand, I., Abdella, K.A., Schmidhalter, U., 2019. Evaluation of wavelengths and spectral reflectance indices for high-throughput assessment of growth, water relations and ion contents of wheat irrigated with saline water. *Agricultural Water Managemen* 212, 358–377. doi :https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.09.009.
- El-Jazouli, A., Barakat, A., Khellouk, R., Rais, J., El-Baghdadi, M., 2019. Remote sensing and gis techniques for prediction of land use land cover change effects on soil erosion in the high basin of the oum er rbia river (morocco). *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 13, 361–374. doi :https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.12.004.
- El-Jihad, M.D., 2016. Changement climatique et développement rural dans les montagnes du moyen-atlas et leurs bordures (MAROC). *Journal of Alpine Research, Revue de géographie alpine* , 1–18.

- El-Khyari, T., Amin, S., 1987. Agriculture au MAROC. Fenixx Réédition Numérique (Editions Okad) , 520 p.
- Emberger, L., 1938. Contribution à la connaissance des cèdres et en particulier du deodar et du cèdre de l'atlas. revue de botanique appliquée et d'agriculture coloniale. 18 année bulletin 198, 77-92. doi :<https://doi.org/10.3406/jatba.1938.5828>.
- Emberger, L., 1939. Aperçu général sur la végétation du MAROC. commentaire de la carte phytogéographique du MAROC 1 : 1500000. Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes Rübel in Zürich 14, 40-157. doi :<http://doi.org/10.5169/seals-307291>.
- Emberger, L., 1955. Une classification biogéographique des climats. Rec. Trav. Lab. Bot. Zool. Fac. Sc de Montpellier 7 , 3-43.
- Ennaji, M., 1992. Crises de subsistances, endettement de la paysannerie et transformations sociales. le cas du MAROC au xixe siècle. Édition. Aix-en-Provence : Institut de recherches et d'études sur les mondes arabes et musulmans , 25-48.
- Epting, J., Michel, A., Affolter, A., Huggenberger, P., 2021. Climate change effects on groundwater recharge and temperatures in swiss alluvial aquifers. Journal of Hydrology 11, 100071. doi :<https://doi.org/10.1016/j.hydroa.2020.100071>.
- Erostate, M., Huneau, F., Garel, E., Ghiotti, S., Vystavna, Y., Garrido, M., Pasqualini, V., 2020. Groundwater dependent ecosystems in coastal mediterranean regions : Characterization, challenges and management for their protection. Water Research 172, 115461. doi :<https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115461>.
- Etebaai, I., Damnati, B., Raddad, H., Benhardouz, H., Benhardouz, O., Miche, H., Taieb, M., 2012. Impacts climatiques et anthropiques sur le fonctionnement hydrogéochimique du lac ifrah (MOYEN ATLAS marocain). Journal des Sciences Hydrologiques 57 (3), 547-561. doi :<https://doi.org/10.1080/02626667.2012.660158>.
- Ez-zaouy, Y., Bouchaou, L., Saad, A., Hssaisoune, M., Brouziyne, Y., Dhiba, D., Chehbouni, A., 2022. Morocco's coastal aquifers : Recent observations, evolution and perspectives towards sustainability. Environmental Pollution 293, 118498. doi :<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118498>.
- Ezzine, H., Bouziane, A., Ouazar, D., 2014. Seasonal comparisons of meteorological and agricultural drought indices in morocco using open short time-series data. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 26, 36-48. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2013.05.005>.
- Fang, J., Yangb, W., Luanc, Y., Dud, J., Lina, A., Zhao, L., 2019. Evaluation of the TRMM 3b42 and GPM IMERG products for extreme precipitation analysis over china. Atmospheric Research 223, 24-38. doi :<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.03.001>.

- Fassi, D., 1999. Les formations superficielles du saïs de fès et de meknès. Edition du service géologique, Rabat , 401 p.
- Fedan, B., 1978. Etude structurale d'une portion de l'accident nord moyen atlasique dans la région au sw de boulemane, MOYEN ATLAS central, MAROC. Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat 2, 87–96.
- Fiorillo, F., 2009. Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment. *Journal of Hydrology*. 373 , 290–301doi :doi : 10 . 1016 / j . jhydrol . 2009 . 04 . 034.
- Firdawcy, L., Lomri, A., 2000. MAROC, in agricultures familiales et développement rural en méditerranée. Editions, Karthala et éditions du CIHEAM , 397–448.
- Fossou, R.M.N., Soro, N., Traore, V.B., Lasm, T., Sambou, S., Soro, T., Orou, R.K., Cisse, M.T., Kane, A., 2014. Variabilité climatique et son incidence sur les ressources en eaux de surface : cas des stations de bocanda et de dimbokro, centre-est de la côte d'ivoire en afrique de l'ouest. *Afrique Science* 10(4), 118–134.
- François, D., Humbert, J., 2000. Quantification spatiale des précipitations. applications au nord-est de la france. *Revue Géographique de l'Est* 40 / 1-2. doi :https://doi.org/10.4000/rge.4159.
- Ftaïta, T., 2006. Structures politiques et irrigation dans le MAROC précolonial et colonial, le cas des oasis de la tribu arabe des oulad jerrar. *Socio-anthropologie* , 17–18.
- Gausson, H., 1954. Théorie et classification des climats et microclimats. Actes VII Congr. Int. Bot. Paris , 125–130.
- Gbohouiab, Y.P., Paturel, J.E., Tazen, F., Mounirou, L.A., Yonaba, R., Karambiri, H., Yacouba, H., 2021. Impacts of climate and environmental changes on water resources : A multi-scale study based on nakanb'e nested watersheds in west african sahel. *Journal of Hydrology : Regional Studies* 35, 100828. doi :https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100828.
- GCOS, 2016. The global observing system for climate : implementation needs. global climate observing system implementation plan , 341 p.
- Ghimire, U., Shrestha, S., Neupane, S., Mohanasundaram, S., Lorphensri, O., 2021. Climate and land-use change impacts on spatiotemporal variations in groundwater recharge : A case study of the bangkok area, thailand. *Science of the Total Environment* 792, 148370. doi :https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148370.
- GIEC, 2019. Réchauffement planétaire de 1,5°C. Rapport spécial du GIEC , 110 p.
- Gille, E., Nejari, A., Francois, D., 2000. Le lac aguelmam sidi ali (MOYEN ATLAS marocain) : un évaporamètre naturel. *Mosella*, T.XXV 3-4, 37–54.
- Goldewijk, K.K., Beusen, A., Doelman, J., Stehfest, E., 2017. Anthropogenic land use estimates for the holocene – hyde 3.2. *Earth Syst. Sci. Data* 9, 927–953. doi :https://doi.org/10.5194/essd-9-927-2017.

- Goldewijk, K.K., 2001. Estimation global land use change over the past 300 years : the hyde database. *Glob. Biogeochem. Cycle* 15 (2), 417–434. doi :<https://doi.org/10.1029/1999GB001232>.
- Goossens, R., De-Wulf, A., Bourgeois, J., Gheyle, W., Willems, T., 2006. Satellite imagery and archaeology : the example of corona in the altai mountains. *Journal of Archaeological Science* 33, 745–755. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.10.010>.
- Gorguner, M., Kavvas, M.L., 2020. Modeling impacts of future climate change on reservoir storages and irrigation water demands in a mediterranean basin. *Science of the Total Environment* 748, 141246. doi :<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141246>.
- Goussot, E., Brou, Y.T., Laouina, A., Chaker, M., Emran, A., Machouri, N., Mahe, G., Sfa, M., Tra-Bi, Z.A., 2014. Dynamique de l'occupation du sol et statistiques agricoles sur le bassin versant du bouregreg au MAROC. *European Journal of Scientific Research* 126 (2), 191–205.
- Gressin, A., 2014. Mise à jour d'une base de données d'occupation du sol à grande échelle en milieux naturels à partir d'une image satellite thr. Thèse de doctorat. Université Paris-Descartes , 266 p.
- Grosse, G., Schirrmeyer, L., Kunitsky, V.V., Hubberten, H.W., 2005. The use of corona images in remote sensing of periglacial geomorphology : An illustration from the ne siberian coast. *Permafrost and Periglac. Process* 16, 163–172. doi :<https://doi.org/10.1002/ppp.509>.
- Grove, M., 2021. Climatic change and climatic variability : An objective decomposition. *Quaternary Science Reviews* 271, 107196. doi :<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2021.107196>.
- Guardiola-Albert, C., Martos-Rosillo, S., Pardo-Iguzquiza, E., Duran-Valsero, J.J., Pedrera, A., Jimenez-Gavilan, P., Baena, C.L., 2015. Comparison of recharge estimation methods during a wet period in a karst aquifer. *Groundwater* 53 (6), 885–895. doi :[doi : 10.1111/gwat.12310](https://doi.org/10.1111/gwat.12310).
- Gumula-Kawęcka, A., Jaworska-Szulc, B., Szymkiewicz, A., Gorczewska-Langner, W., Pruszkowska-Caceres, M., Angulo-Jaramillo, R., Simunek, J., 2022. Estimation of groundwater recharge in a shallow sandy aquifer using unsaturated zone modeling and water table fluctuation method. *Journal of Hydrology* 605, 127283. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127283>.
- Hemmerling, J., Pflugmacher, D., Hostert, P., 2021. Mapping temperate forest tree species using dense sentinel-2 time series. *Remote Sensing of Environment* 267, 112743. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112743>.
- Herrnegger, M., Senoner, T., Nachtnebel, H.P., 2018. Adjustment of spatio-temporal precipitation patterns in a high alpine environment. *Journal of Hydrology* 556, 913–921. doi :[http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.068](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.04.068).
- Hou, A.Y., Kakar, R.K., Neeck, S., Azarbarzin, A.A., Kummerow, C.D., Kojima, M., Oki, R., Nakamura, K., Iguchi, T., 2014. The global precipitation measurement mission. *Bull. Am. Meteorol. Soc* 95. doi :[701âĀ722](https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00272.1).

- Hssaisoune, M., Bouchaou, L., Matsumoto, T., Araguas, L., Kraml, M., Aggarwal, P., 2019. New evidences on groundwater dynamics from the souss-massa system (morocco) : Insights gained from dissolved noble gases. *Applied Geochemistry* 109, 104395. doi :<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104395>.
- Htitiou, A., Boudhar, A., Lebrini, Y., Hadria, R., Lionboui, H., Elmansouri, L., Tychon, B., Benabdelouahab, T., 2019. The performance of random forest classification based on phenological metrics derived from sentinel-2 and landsat 8 to map crop cover in an irrigated semi-arid region. *Remote Sens. Earth Syst. Sci* 2, 208–224. doi :<https://doi.org/10.1007/s41976-019-00023-9>.
- Hubert, P., Carbonnel, J.P., Chaouche, A., 1989. Segmentation des séries hydrométéorologiques. application a des séries de précipitations et de débits de l 'afrique de l'ouest. *J. Hydrol* 10, 349–367.
- Hubert-Moy, L., 2004. Occupation du sol et télédétection : de l'inventaire à la modélisation prédictive. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches, Université de Rennes 2 , 333 p.
- Huffman, G.J., Bolvin, D.T., Nelkin, E.J., Wolff, D.B., Adler, R.F., Gu, G., Hong, Y., Bowman, K.P., Stocker, E.F., 2007. The TRMM multisatellite precipitation analysis (tmpa). quasi-global, multiyear, combined-sensor precipitation estimates at fine scales. *Journal of Hydrometeorology* 8, 38–55. doi :<https://doi.org/10.1175/JHM560.1>.
- Humbert, J., Perrin, J.L., 1993. Précipitations et relief. le cas du versant oriental des hautes-vosges. *in* l'Eau, la Terre et les Hommes, Presses Universitaires de Nancy , 147–154.
- Huntington, J., McGwire, K., Morton, C., Snyder, K., Peterson, S., Erickson, T., Niswonger, R., Carroll, R., Smith, G., Allen, R., 2016. Assessing the role of climate and resource management on groundwater dependent ecosystem changes in arid environments with the landsat archive. *Remote Sensing of Environment* 185, 186–197. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.004>.
- Hurtt, G.C., Chini, L., Sahajpal, R., Froking, S., Bodirsky, B.L., Katherine-Calvin, K., et al, 2020. Harmonization of global land use change and management for the period 850–2100 (luh2) for cmip6. *Geosci. Model Dev* 13, 5425–5464. doi :<https://doi.org/10.5194/gmd-13-5425-2020>.
- Idbraim, S., 2009. Méthodes d'extraction de l'information spatiale et de classification en imagerie de télédétection : Applications à la cartographie thématique de la région d'agadir (MAROC). Thèse de doctorat. Université Toulouse III - Paul Sabatier , 149 p.
- Ihuoma, S.O., Madramootoo, C.A., Kalacska, M., 2021. Integration of satellite imagery and in situ soil moisture data for estimating irrigation water requirements. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 102, 102396. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102396>.
- IPCC, 2007. Climate change 2007 : Synthesis report. contribution of working groups i, ii and iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [core writing team, pachauri, r.k and reisinger, a. IPCC, Geneva, Switzerland 104 p.

- IPCC, 2013. Climate change 2013 : The physical science basis. contribution of working group i to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [stocker, t.f., d. Qin, g.-k. Plattner, m. Tignor, s.k. Allen, j. Boschung, a. Nauels, y. Xia, v. Bex and p.m. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA , 1535 p.
- Jennan, L., 1986. Mutations récentes des campagnes du MOYEN ATLAS et de ses bordures. revue Méditerranée, troisième série, tome. Villes et campagnes au MAROC 59 (4), 49–62.
- Jennan, L., 1996. L'évolution des structures socio-spatiales du moyen-atlas central : 1e cas du pays amekla (sefrou). Revue de géographie alpine 84 (4), 61–74.
- Jennan, L., 2004. Le MOYEN ATLAS central et ses bordures, mutations récentes et dynamiques rurales. Eds. Al Jawahir , 706 p.
- Jiménez-Olivencia, Y., Ibáñez-Jiménez, A., Porcel-Rodríguez, L., Zimmerer, K., 2021. Land use change dynamics in euro-mediterranean mountain regions : Driving forces and consequences for the landscape. Land Use Policy 109, 105721. doi :<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105721>.
- Jouve, A.M., 2002. 50 ans d'agriculture marocaine. CIHEAM-IAMM , 24 p.
- Jouve, A.M., 2006. Les trois temps de l'eau au MAROC. l'eau du ciel, l'eau d'état, l'eau privée. L'Harmattan, Confluences Méditerranée , 51–61doi :DOI 10.3917/come.058.0051.
- Joyce, R.J., Janowiak, J.E., Arkin, P.A., Xie, P., 2004. Cmorph : A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution. Journal of Hydrometeorology 5, 487–503. doi :[https://doi.org/10.1175/1525-7541\(2004\)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2).
- Kertész, A., Nagy, L.A., Balázs, B., 2019. Effect of land use change on ecosystem services in lake balaton catchment. Land Use Policy 80, 430–438. doi :<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.04.005>.
- Khatami, R., Mountrakis, G., Stehman, S.V., 2016. A meta-analysis of remote sensing research on supervised pixel-based land-cover image classification processes : General guidelines for practitioners and future research. RS of Environment 177, 89–100. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.028>.
- Khrouz, D., 1992. La politique agricole du MAROC indépendant. Éd. Aix-en-Provence : Institut de recherches et d'études sur les mondes arabes et musulmans , 111–136.
- Kløve, B., Ala-Aho, P., Bertrand, G., Gurdak, J.J., Kupfersberger, H., Kværner, J., et al, 2014. Climate change impacts on groundwater and dependent ecosystems. Journal of Hydrology 518, 250–266. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydro.2013.06.037>.

- Kollert, A., Bremer, M., Löw, M., Rutzinger, M., 2021. Exploring the potential of land surface phenology and seasonal cloud free composites of one year of sentinel-2 imagery for tree species mapping in a mountainous region. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 94, 102208. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102208>.
- Kouassi, A.M., Kouamé, K.F., Koffi, Y.B., Dje, K.B., Paturel, J.E., Oulare, S., 2010. Analyse de la variabilité climatique et de ses influences sur les régimes pluviométriques saisonniers en afrique de l'ouest : cas du bassin versant du n'zi (bandama) en côte d'ivoire. *Cybergeo* , 1–29doi :<https://doi.org/10.4000/cybergeo.23388>.
- Krogulec, E., 2016. Hydrogeological study of groundwater-dependent ecosystems—an overview of selected methods. *Ecohydrology and Hydrobiology* 16, 185–193. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2016.03.002>.
- Krogulec, E., 2018. Evaluating the risk of groundwater drought in groundwater-dependent ecosystems in the central part of the vistula river valley, poland. *Ecohydrology and Hydrobiology* 18, 82–91. doi :<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2017.11.003>.
- Kumar-Sharma, A., Hubert-Moy, L., Buvaneshwari, S., Sekhar, M., Ruiz, L., Bandyopadhyay, S., Corgne, S., 2018. Irrigation history estimation using multitemporal satellite images : Application to an intensive groundwater irrigated agricultural watershed in india. *Remote Sensing* 10, 893. doi :<https://doi.org/10.3390/rs10060893>.
- Labhar, M., 1998. Les milieux forestiers et pré-forestiers du MOYEN ATLAS central nord occidental : Approche géographique, phytoécologique et dynamique. Thèse de Doctorat, Université libre de Bruxelles , 404 p.
- Labhar, M., Lebaut, S., 2012. Les cédraies du MOYEN ATLAS central (MAROC) : structure et dynamique actuelle. *Revue AFN MAROC* 6-8, 1–18.
- Labouesse, F., 1986. L'agriculture marocaine au début des années 80 : situation et perspectives. méditerranée. *Villes et campagnes au MAROC* 59 (4), 93–101.
- Lamb, P.J., 1982. Persistence of subsaharian drought. *Nature* 299 (8), 46–47. doi :<https://doi.org/10.1038/299046a0>.
- Landis, J.R., Koch, G.G., 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 1, 159–174. doi :<https://doi.org/10.2307/2529310>.
- Le-Chatelier, A., 1902. Notes sur les villes et tribus du MAROC en 1890, sahel, gharb, haouz fès, sais, haouz meknès, djebala. Ed Angers, Gallica , 117 p.
- Le-Coz, L., 1968. Le troisième âge agraire du MAROC. *Annales de Géographie* 77 (422), 385–413.
- Le-Houérou, H.N., 1989. Classification écoclimatique des zones arides (s.l.) de l'afrique du nord. *Ecologia mediterranea* 15 (3-4), 95–144. doi :[doi:https://doi.org/10.3406/ecmed.1989.1643](https://doi.org/10.3406/ecmed.1989.1643).

- Lebaut, S., 2000. L'apport de l'analyse et de la modélisation hydrologiques de bassins versants dans la connaissance du fonctionnement d'un aquifère : les grès d'ardenne-luxembourg. Thèse de doctorat de l'université de Metz , 304 p.
- Lecompte, M., 1986. Biogéographie de la montagne marocaine : le MOYEN ATLAS central. mémoires et documents de géographie. Edition du CNR , 209 p.
- Lemmen, C., 2009. World distribution of land cover changes during pre- and protohistoric times and estimation of induced carbon releases, *geomorphologie. relief, processus, environnement* 15 (4), 303–312. doi :<https://doi.org/10.4000/geomorphologie.7756>.
- Lettenmaier, D.P., 1976. Detection of trends in water quality data from records with dependent observations. *Water resources research* 12 (5), 1037–1046. doi :<https://doi.org/10.1029/WR012i005p01037>.
- Lhotellier, R., 2015. Spatialisation de la température minimale de l'air à l'échelle quotidienne sur 4 départements alpins français. *Climatologie* 3, 55–69.
- Li, D., Christakos, G., Ding, X., Wu, J., 2018. Adequacy of TRMM satellite rainfall data in driving the swat modeling of tiaoxi catchment (taihu lake basin, china). *Journal of Hydrology* 556, 1139–1152. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.01.006>.
- Li, Y., Niu, Z., 2022. Systematic method for mapping fine-resolution water cover types in china based on time series sentinel-1 and 2 images. *International Journal of Applied Earth Observations and Geoinformation* 106, 102656. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102656>.
- Liu, D., Toman, E., Fuller, Z., Chen, G., Londo, A., Zhang, X., 2018. Integration of historical map and aerial imagery to characterize long-term land-use change and landscape dynamics : An object-based analysis via random forests. *Ecological Indicators* 9, 595–605. doi :<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.004>.
- Loubignac, V., 1938. Le régime des eaux, le nantissement et la prescription chez les ait youssi du guigou. *Hesperis* XXV, 251–264.
- Louis, G., 1912. La géologie du MAROC et la genèse de ses grandes chaines. *Annales de Géographie* 21 (116), 130–158.
- Lrhoul, H., Turki, N.E.A.H., 2021. Mapping of water research in morocco : A scientometric analysis. *Materials Today : Proceedings* 45, 7321–7328. doi :<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1222>.
- m Lucas, E.W., Sousa, F.A.S., Silva, F.D.S., Rocha-Júnior, R.L., Pinto, D.D.C., Silva, V.P.R., 2021. Trends in climate extreme indices assessed in the xingu river basin - brazilian amazon. *Weather and Climate Extremes* 31, 100306. doi :<https://doi.org/10.1016/j.wace.2021.100306>.

- Lyazidi, R., Abdelbaset-Hessane, M., Filali-Moutei, J., Bahir, M., 2020. Developing a methodology for estimating the groundwater levels of coastal aquifers in the gareb-bourag plains, morocco embedding the visual modflow techniques in groundwater modeling system. *Groundwater for Sustainable Development* 11, 100471. doi :<https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100471>.
- López-Serrano, P.M., Corral-Rivas, J.J., Díaz-Varela, R.A., Álvarez González, J.G., López-Sánchez, C.A., 2016. Evaluation of radiometric and atmospheric correction algorithms for aboveground forest biomass estimation using landsat 5 tm data. *Remote Sens* 8(5), 369. doi :<https://doi.org/10.3390/rs8050369>.
- Majola, K., Xu, Y., Kanyerere, T., 2022. Review : Assessment of climate change impacts on groundwater-dependent ecosystems in transboundary aquifer settings with reference to the tuli-karoo transboundary aquifer. *Ecohydrology and Hydrobiology* 22, 126–140. doi :<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2021.08.013>.
- Mao, D., Wang, Z., Du, B., Li, L., Tian, Y., Jia, M., Zeng, Y., Song, K., Jiang, M., Wang, Y., 2020. National wetland mapping in china : A new product resulting from object based and hierarchical classification of landsat 8 oli images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 164, 11–25. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.01.020>.
- Marand, C., Zumstein, J.F., 1990. La modélisation des précipitations moyennes annuelles appliquée au massif vosgien. *Hydrologie continentale* 5 (1), 29–39.
- Marcel, A., 1933. L'évolution de l'agriculture européenne au MAROC. *Annales de Géographie* 42 (236), 175–185.
- Marega, O., Fall, J.L.S.E.A., Andrieu, J., 2021. Cartographie par télédétection des variations spatio-temporelles de la couverture végétale spontanée face à la variabilité pluviométrique au sahel : approche multiscale. *Physio-Géo* 16, 1–28. doi :<https://doi.org/10.4000/physio-geo.11977>.
- Marinval, P., 2001. Les débuts de l'agriculture au MAROC : premières données. In *Horizons Maghrébins - Le droit à la mémoire, paysages et jardins des Méditerranéens* 45, 31–33.
- Martin, J., 1981. Le MOYEN ATLAS central : Etude géomorphologique. *Notes et mémoires du service géologique* 258 Bis, 447 p.
- Martínez-Santos, P., Díaz-Alcaide, S., la Hera-Portillo, A.D., Gomez-Escalonilla, V., 2021. Mapping groundwater-dependent ecosystems by means of multi-layer supervised classification. *Journal of Hydrology* 603, 126873. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126873>.
- Maselli, F., Battista, P., Chiesi, M., Rapi, B., Angeli, L., Fibbi, L., Magno, R., Gozzini, B., 2020. Use of sentinel-2 msi data to monitor crop irrigation in mediterranean areas. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 93, 102216. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102216>.

- Masiliunas, D., Tsendbazar, N.E., Herold, M., Lesiv, M., Buchhorn, M., Verbesselt, J., 2021. Global land characterisation using land cover fractions at 100 m resolution. *Remote Sensing of Environment* 259, 112409. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112409>.
- Maxwell, S.K., Sylvester, K.M., 2012. Identification of “ever-cropped” land (1984-2010) using landsat annual maximum ndvi image composites : Southwestern kansas case study. *Remote Sensing of Environment* 121, 186–195. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.01.022>.
- Mazoz, L., 2015. Régimes pluvio-hydrologiques du haut sebou (MAROC) et incidences des situations climatiques a risques dans le bassin. Thèse de Doctorat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, Maroc , 253 p.
- McCallum, A.M., Andersen, S.A., Acworth, R.I., 2014. A new method for estimating recharge to unconfined aquifers using differential river gauging. *Groundwater* 52 (2), 291–297. doi :doi : 10.1111/gwat.12046.
- Mendieta-Mendoza, A., Hanson, R.T., Renteria-Villalobos, M., 2021. Potential adverse impacts on vulnerability and availability of groundwater from climate-change and land use. *Journal of Hydrology* 594, 125978. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.125978>.
- Michard, A., 1976. *Éléments de géologie marocaine. Notes Et Mémoires Du Service Géologique, Editions Du Service Géologique Du Maroc* Rabat 252.
- Michot, V., Vila, D., Arvor, D., Corpetti, T., Ronchail, J., Funatsu, B.M., Dubreuil, V., 2018. Performance of TRMM TMPA 3b42 v7 in replicating daily rainfall and regional rainfall regimes in the amazon basin (1998–2013). *Remote Sens* 10, 1879. doi :doi : 10.3390/rs10121879.
- Mihai, B., Nistor, C., Toma, L., Săvulescu, I., 2016. High resolution landscape change analysis with corona kh-4b imagery. a case study from iron gates reservoir area. *Procedia Environmental Sciences* 32, 200–210.
- Milewski, A., Elkadiri, R., Durham, M., 2015. Assessment and comparison of tmpa satellite precipitation products in varying climatic and topographic regimes in morocco. *Remote Sens* 7(5), 5697–5717. doi :<https://doi.org/10.3390/rs70505697>.
- Mohajane, M., Essahlaoui, A., Oudija, F., Hafyani, M., Cláudia-Teodoro, A., 2017. Mapping forest species in the central middle atlas of morocco (azrou forest) through remote sensing techniques. *ISPRS Int. J. Geo-Inf* 6, 275. doi :<https://doi.org/10.3390/ijgi6090275>.
- Mokhtari, N., Mrabet, R., Lebailly, P., Bock, L., 2013. Spatialisation des bioclimats, de l’aridité et des étages de végétation du MAROC. *Rev. Mar. Sci. Agron. Vét* 2 (1), 50–66.
- Morrison, K.D., Hammer, E., Boles, O., Madella, M., Whitehouse, N., Gaillard, M.J., et al, 2021. Mapping past human land use using archaeological data : A new classification for global land use synthesis and data harmonization. *PLoS ONE* 16(4), e0246662. doi :<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246662>.

- Mouliéras, A., 1899. Le MAROC inconnu étude géographique et sociologique, deuxième partie : exploration des djbala (MAROC septentrional). Editions Augusting Challamel. Paris , 814 p.
- Mountrakis, G., Im, J., Ogole, C., 2011. Support vector machines in remote sensing : A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 66, 247–259. doi :<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2010.11.001>.
- Mudelsee, M., 2019. Trend analysis of climate time series : A review of methods. *Earth-Science Reviews* 190, 310–322. doi :<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.12.005>.
- Nalau, J., BrodieVerrall, B., 2021. Mapping the evolution and current trends in climate change adaptation science. *Climate Risk Management* 32, 100290. doi :<https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100290>.
- Nasser-Mohamed-Eid, A., Olatubara, C.O., Ewemoje, T.A., Talaat-El-Hennawy, M., Farouk, H., 2020. Inland wetland time-series digital change detection based on savi and ndwi indecies : Wadi el-ryan lakes, egypt. *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 19, 100347. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100347>.
- Nejjari, A., 2002. La sécheresse, l'eau et l'homme dans le bassin versant du haut sebou (moyen atlas septentrional-MAROC). Thèse de Doctorat de l'Université de Metz , 304 p.
- Nejjari, A., Gille, E., Francois, D., 2000. Les longues chroniques pluviométriques et la caractérisation de la sécheresse récente au nord du MOYEN ATLAS (MAROC). *Mosella XXV* (3-4), 37–53.
- Nerantzaki, S.D., Nikolaidis, N.P., 2020. The response of three mediterranean karst springs to drought and the impact of climate change. *Journal of Hydrology* 591, 125296. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydro1.2020.125296>.
- Nicholson, S.E., Funk, C., Fink, A.H., 2018. Rainfall over the african continent from the 19th through the 21st century. *Global and Planetary Change* 165, 114–127. doi :<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.12.014>.
- Nicholson, S.E., Kim, J., Hoopingarner, J., 1988. Atlas of african rainfall and its interannual variability. Édit. Department of Meteorology. Florida State University Tallahassee, Floride, USA , 237 p.
- Nicod, J., 1997. Karsts et fonctionnement hydrologique dans le HAUT ATLAS central calcaire et sur la bordure MOYEN ATLAS méridional. *Annales de Géographie* 106 (597), 536–538.
- Nistor, M.M., 2020. Groundwater vulnerability in europe under climate change. *Quaternary International* 547, 185–196. doi :<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.04.012>.
- NOAA, 2022. National centers for environmental information, climate at a glance : Global time series. published. Retrieved on January 31, 2022 from <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/>.
- Noufé, D., Lidon, B., Mahé, G., Servat, E., Yao, T.B., Zueli, K.B., Chaléard, J.L., 2011. Variabilité climatique et production de maïs en culture pluviale dans l'est ivoirien. *Hydrological Sciences Journal* 56 (1), 152–167.

- Nunes, J.P., Jacinto, R., Keizer, J.J., 2017. Combined impacts of climate and socio-economic scenarios on irrigation water availability for a dry mediterranean reservoir. *Science of the Total Environment* 584–585, 219–233. doi :<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.131>.
- Nyembo, L.O., Larbi, I., Mwabumba, M., Selemani, J.R., Dotse, S.Q., Limantol, A.M., Bessah, E., 2022. Impact of climate change on groundwater recharge in the lake manyara catchment, tanzania. *Scientific African* 15, e01072. doi :<https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2021.e01072>.
- Nzuza, P., Ramoelo, A., Odindi, J., Mwenge-Kahinda, J., Madonsela, S., 2021. Predicting land degradation using sentinel-2 and environmental variables in the lepellane catchment of the greater sekhukhune district, south africa. *Physics and Chemistry of the Earth* 124, 102931. doi :<https://doi.org/10.1016/j.pce.2020.102931>.
- Obda, K., 2004. Indigences extrêmes des écoulements des oueds méditerranéens : cas des oueds nekor au rif et du haut sebou au MOYEN ATLAS. Thèse de Doctorat d'Etat, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Fès, Maroc , 422 p.
- Obda, K., Gille, E., Akdim, B., 2000. Application de la méthodologie des profils hydrologiques dans la gestion des ressources en eau : cas des oueds zoul (MOYEN ATLAS septentrional) et nekor (rif central). *Mosella XXV* (3-4), 109–120.
- Obodai, J., Adjei, K.A., Odai, S.N., Lumor, M., 2019. Land use/land cover dynamics using landsat data in a gold mining basin-the ankobra, ghana. *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 13, 247–256. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.10.007>.
- Oreggioni, G.D., Ferrario, F.M., Crippa, M., Muntean, M., Schaaf, E., Guizzardi, D., Solazzo, E., Duerr, M., Perry, M., Vignati, E., 2021. Climate change in a changing world : Socio-economic and technological transitions, regulatory frameworks and trends on global greenhouse gas emissions from edgar v.5.0. *Global Environmental Change* 70, 102350. doi :<https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2021.102350>.
- Ouatiki, H., Boudhar, A., Trambly, Y., Jarlan, L., Benabdelouhab, T., Hanich, L., El-Meslouhi, M.R., Chehbouni, A., 2017. Evaluation of TRMM 3b42 v7 rainfall product over the oum er rbia watershed in morocco. *Climate* 5 (1), 1. doi :[doi : 10.3390/cli5010001](https://doi.org/10.3390/cli5010001).
- Ouhamdouch, S., Bahir, M., Ouazar, D., 2020. Climate change impact assessment on a carbonate aquifer under semi-arid climate : example of the cenomanian-turonian aquifer within meskala-ouazzi region (essaouira basin, morocco). *Arabian Journal of Geosciences* 13, 1–15. doi :<https://doi.org/10.1007/s12517-020-5180->.
- Ouzemou, J.E., El-Harti, A., Lhissou, R., El-Moujahid, A., Bouch, N., El-Ouazzani, R., Bachaoui, E., El-Ghmari, A., 2018. Crop type mapping from pansharpened landsat 8 ndvi data : A case of a highly fragmented and intensive agricultural system. *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 11, 94–103. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2018.05.002>.

- Ozdogan, M., Yang, Y., Allez, G., Cervantes, C., 2010. Remote sensing of irrigated agriculture : Opportunities and challenges. *Remote Sensing* 2, 2274–2304. doi :<https://doi.org/10.3390/rs2092274>.
- Pageot, Y., Baup, F., Inglada, J., Baghdadi, N., Demarez, V., 2020. Detection of irrigated and rainfed crops in temperate areas using sentinel-1 and sentinel-2 time series. *Remote Sens* 12, 3044. doi :<http://dx.doi.org/10.3390/rs12183044>.
- Pei, H., Liu, M., Shen, Y., Xu, K., Zhang, H., Li, Y., Luo, J., 2022. Quantifying impacts of climate dynamics and land-use changes on water yield service in the agro-pastoral ecotone of northern china. *Science of the Total Environment* 809, 151153. doi :<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151153>.
- Pelletier, C., 2017. Cartographie de l'occupation des sols à partir de séries temporelles d'images satellitaires à hautes résolutions identification et traitement des données mal étiquetées. interfaces continentales, environnement. Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) , 292 p.
- Pelletier, C., Valeroa, S., Inglada, J., Champion, N., Dedieu, G., 2016. Assessing the robustness of random forests to map land cover with high resolution satellite image time series over large areas. *Remote Sensing of Environment* 187, 156–168. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.010>.
- Peltonen-Sainio, P., Juvonen, J., Korhonen, N., Parkkila, P., Sorvali, J., Gregow, H., Peltonen-Sainio, P., 2021. Climate change, precipitation shifts and early summer drought : An irrigation tipping point for finnish farmers? *Climate Risk Management* 33, 100334. doi :<https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100334>.
- Pervez, M.D.S., Budde, M., James-Rowland, J., 2014. Mapping irrigated areas in afghanistan over the past decade using modis ndvi. *Remote Sensing of Environment* 149, 155–165. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.04.008>.
- Pique, A., 1994. Géologie du MAROC : les domaines régionaux et leur évolution structurale. Imprimerie El Maarif Al Jadida – Rabat .
- Pirasteh, S., Zenner, E.K., Mafi-Gholami, D., Jaafari, A., Nouri-Kamari, A., Liu, G., Zhu, Q., Li, J., 2021. Modeling mangrove responses to multi-decadal climate change and anthropogenic impacts using a long-term time series of satellite imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 102, 102390. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102390>.
- Prieto-Amparan, J.A., Villarreal-Guerrero, F., Martinez-Salvador, M., Manjarrez-Domínguez, C., Santellano-Estrada, E., Pinedo-Alvarez, A., 2018. Atmospheric and radiometric correction algorithms for the multitemporal assessment of grasslands productivity. *Remote Sens* 10 (2), 219. doi :<https://doi.org/10.3390/rs10020219>.

- Puertas, R., Marti, L., 2021. International ranking of climate change action : An analysis using the indicators from the climate change performance index. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 148, 111316. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111316>.
- Pujos, A., 1966. Les milieux de la cédraie marocaine. Étude d'une classification des cédraies du MOYEN ATLAS et du RIF en fonction du sol et du climat et de la régénération naturelle actuelle dans ces peuplements. *Annales de la Recherche Forestière au Maroc* 8, 1-283.
- Qadem, A., 2015. Quantification, modélisation et gestion de la ressource en eau dans le bassin versant du haut sebou (MAROC). thèse de doctorat de l'Université Sidi Mohamed Ben Abdelah et l'Université de Lorraine , 358 p.
- Quintas-Soriano, C., Buerkert, A., Plieninger, T., 2022. Effects of land abandonment on nature contributions to people and good quality of life components in the mediterranean region : A review. *Land Use Policy* 116, 106053. doi :<https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2022.106053>.
- Rahman, M.D.N., Rony, M.R.H., Akter-Jannat, F., 2021. Spatiotemporal evaluation of drought trend during 1979–2019 in seven climatic zones of bangladesh. *Heliyon* 7, e08249. doi :<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08249>.
- Rana, V.K., Venkata-Suryanarayana, T.M., 2020. Performance evaluation of MLE, RF and SVM classification algorithms for watershed scale land use/land cover mapping using sentinel 2 bands. *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 19, 100351. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100351>.
- Rehman, R., El-Gebeily, M., 2009. A study of saudi climatic parameters using climatic predictability indices. *Chaos Solitons and Fractals* 41(3), 1055–1069. doi :<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2008.04.032>.
- Ren, J., Shao, Y., Wan, H., Xie, Y., Campos, A., 2021. A two-step mapping of irrigated corn with multi-temporal modis and landsat analysis ready data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 176, 69–82. doi :<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.04.007>.
- Rendenieks, Z., Nita, M.D., Nikodemus, O., Radeloff, V.C., 2020. Half a century of forest cover change along the latvian-russian border captured by object-based image analysis of corona and landsat tm/oli data. *Remote Sensing of Environment* 249, 112010. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112010>.
- Rhanem, M., 2011. Aridification du climat régional et remontée de la limite inférieure du cèdre de l'atlas (*cedrus atlantica manetti*) aux confins de la plaine de midelt (MIDELT, MAROC). *Physio-Géo* 5, 143–165. doi :<https://doi.org/10.4000/physio-geo.1983>.
- Rhyma, P.P., Norizah, K., Hamdan, O., Faridah-Hanum, I., Zulfa, A.W., 2020. Integration of normalised different vegetation index and soil adjusted vegetation index for mangrove vegetation delineation. *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 17, 100280. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100280>.

- Robert, E., Merlet, S., Auda, Y., Gangneron, F., Hiernaux, P., 2017. Dynamique de l'occupation du sol en milieu agro-pastoral dans la commune de djougou au Bénin à partir d'images Landsat acquises entre 1984 et 2012 : une approche régressive associant télédétection et enquêtes de terrain. *Photo interprétation européen journal of applied remote sensing* 53, 1ère trimestre 2018, éditions ESKA, 2–16.
- Rocha, J., Carvalho-Santos, C., Diogo, P., Beça, P., Keizer, J., Nunes, J.P., 2020. Impacts of climate change on reservoir water availability, quality and irrigation needs in a water scarce Mediterranean region (southern Portugal). *Science of the Total Environment* 736, 139477. doi :<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139477>.
- Rodrigues, M., Santana, P., Rocha, A., 2020. Modelling climate change impacts on attributable-related deaths and demographic changes in the largest metropolitan area in Portugal : A time-series analysis. *Environmental Research* 190, 109998. doi :<https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109998>.
- Rodriguez-Galiano, V.F., Ghimire, B., Rogan, J., Chica-Olmo, M., Rigol-Sanchez, J.P., 2012. An assessment of the effectiveness of a random forest classifier for land-cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 67, 93–104. doi :<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2011.11.002>.
- Roetter, R.P., Van-Keulen, H., Kuiper, M., Verhagen, J., Van-Laar, H.H., 2007. *Science for agriculture and rural development in low-income countries*. Pub. Springer , 241 p.
- Ruiz, I., Almagro, M., de Jalón, S.G., del Mar-Solà, M., José-Sanz, M., 2020. Assessment of sustainable land management practices in Mediterranean rural regions. *Journal of Environmental Management* 276, 111293. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111293>.
- Saadi, S., Simonneaux, V., Boulet, G., Raimbault, B., Mougnot, B., Fanise, P., Ayari, H., Lili-Chabaane, Z., 2015. Monitoring irrigation consumption using high resolution NDVI image time series : Calibration and validation in the Kairouan plain (Tunisia). *Remote Sens* 7, 13005–13028. doi :<http://dx.doi.org/10.3390/rs71013005>.
- Sabaoui, A., 1998. Rôles des inversions dans l'évolution Mésocénozoïque du Moyen-Atlas septentrional (MAROC). l'exemple de la transversale el menzel- ribat al khayr- bou iblane. Thèse de doctorat d'Etat, Univ. Mohamed V. Rabat , 432 p.
- Sabaoui, A., Obda, K., Laaouane, M., 2009. Potentialités géologiques du développement local du MOYEN ATLAS septentrional : structures, paysages et histoire géologique. *Geomaghreb* 5, 9–39.
- Saleem, A., Corner, R., Awange, J., 2018. On the possibility of using Corona and Landsat data for evaluating and mapping long-term LULC : Case study of Iraqi Kurdistan. *Applied Geography* 90, 145–154. doi :<https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.12.007>.

- Samal, D.R., Gedam, S., 2021. Assessing the impacts of land use and land cover change on water resources in the upper bhima river basin, india. *Environmental Challenges* 5, 100251. doi :<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100251>.
- Sary, M., Akdim, B., 2000. La sécheresse hydrologique recente dans le bassin du haut sebou (MOYEN ATLAS, MAROC). *Mosella* T.XXV, n° 3-4, 71–84.
- Sauvage, C., 1962. Le coefficient pluviométrique d'emberger, sa signification et son utilisation au MAROC. *Société des sciences naturelles et physiques du Maroc, comptes rendus des séances mensuelles* 5-6, 101–102.
- Sayad, A., Chakiri, S., 2010. Impact de l'évolution du climat sur le niveau de dayet aoua dans le MOYEN ATLAS marocain. *Sécheresse* 21 (4), 245–251. doi :[doi : 10.1684/sec.2010.0252](https://doi.org/10.1684/sec.2010.0252).
- Sayad, A., Chakiri, S., Martin, C., Bejjaji, Z., Charfaoui, H., 2011. Effet des conditions climatiques sur le niveau du lac sidi ali (MOYEN ATLAS, MAROC). *Physio-géo* 5, 251–268. doi :<https://doi.org/10.4000/physio-geo.2145>.
- Sayemuzzaman, M., Jha, M.K., 2014. Seasonal and annual precipitation time series trend analysis in north carolina, united states. *Atmospheric Research* 137, 183–194. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.10.012>.
- Sebbar, A., Hsaine, M., Fougrache, H., Saloui, A., Badri, W., 2020. Impact du changement climatique sur la région montagneuse du MOYEN ATLAS AU MAROC. *Actes du XXXIIIème colloque de l'AIC, Rennes*, 619–624.
- Secci, D., Tanda, M.G., Marco-D'Oria, M., Todaro, V., Fagandini, C., 2021. Impacts of climate change on groundwater droughts by means of standardized indices and regional climate models. *Journal of Hydrology* 603, 127154. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127154>.
- Seif-Ennasr, M., Zaaboul, R., Hirich, A., Caroletti, G.N., Bouchaou, L., El-Morjani, Z.E.A., et al, 2016. Climate change and adaptive water management measures in chtouka aït baha region (morocco). *Science of the Total Environment* 573, 862–875. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.170>.
- Sghir, S., 2002. L'aménagement hydro-agricole en doukkala : Impacts sur l'organisation socio-économique et spatiale. *Université Paul Verlaine - Metz, France*, 284 p.
- Shimelis, B., Tena, A., Broder, J.M., Assefa, M.M., 2015. Performance of high resolution satellite rainfall products over data scarce parts of eastern ethiopia. *Remote Sens* 7, 11639–11663. doi :[doi : 10.3390/rs70911639](https://doi.org/10.3390/rs70911639).
- Shimoda, S., Kanno, H., Hirota, T., 2018. Time series analysis of temperature and rainfall-based weather aggregation reveals significant correlations between climate turning points and potato (*solanum tuberosum* l) yield trends in japan. *Agricultural and Forest Meteorology* 263, 147–155. doi :<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.08.005>.

- Skofronick-Jackson, G., Kirschbaum, D., Walter-Petersen, W., Huffman, G., Kidd, C., Stocker, E., Kakar, R., 2018. The global precipitation measurement (GPM) mission's scientific achievements and societal contributions : reviewing four years of advanced rain and snow observations. *Quarterly journal of the royal meteorological society* 144 (1), 27–48. doi :<https://doi.org/10.1002/qj.3313>.
- Smith, A.J., Pollock, D.W., 2012. Assessment of managed aquifer recharge potential using ensembles of local models. *GROUND WATER* 50 (1), 133–143. doi :[doi : 10 . 1111 / j . 1745 - 6584 . 2011 . 00808 . x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2011.00808.x).
- Smyth, T.A.G., Wilson, R., Rooney, P., Yates, K.L., 2022. Extent, accuracy and repeatability of bare sand and vegetation cover in dunes mapped from aerial imagery is highly variable. *Aeolian Research* 100799, 56. doi :<https://doi.org/10.1016/j.aeolia.2022.100799>.
- Song, D.X., Huang, C., Sexton, J.O., Channan, S., Feng, M., Townshend, J.R., 2015. Use of landsat and corona data for mapping forest cover change from the mid-1960s to 2000s : Case studies from the eastern united states and central brazil. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 103, 81–92. doi :<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.005>.
- Soriano-Gonzalez, J., Angelats, E., Martínez-Eixarch, M., Alcaraz, C., 2022. Monitoring rice crop and yield estimation with sentinel-2 data. *Field Crops Research* 281, 108507. doi :<https://doi.org/10.1016/j.fcr.2022.108507>.
- Soro, G., Ahoussi, E.K., Kouadio, E.K., Soro, T.D., Oulare, S., Saley, M.B., Soro, N., Biemi, J., 2014. Apport de la télédétection à la cartographie de l'évolution spatio-temporelle de la dynamique de l'occupation du sol dans la région des lacs (centre de la côte d'ivoire). *Afrique Science* 10, 146–160.
- Soro, T.D., Soro, N., Oga, Y.M.S., Lasm, L., Soro, G., Ahoussi, K.E., Biémi, J., 2011. La variabilité climatique et son impact sur les ressources en eau dans le degré carré de grand-lahou (sud-ouest de la côte d'ivoire). *Physio-Géo* 5 (1), 55–73. doi :<https://doi.org/10.4000/physio-geo.1581>.
- Steinhausen, M.J., Wagner, P.D., Narasimhan, B., Waske, B., 2018. Combining sentinel-1 and sentinel-2 data for improved land use and land cover mapping of monsoon regions. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf* 73, 595–604. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.08.011>.
- Stour, L., Agoumi, A., 2008. Sécheresse climatique au MAROC durant les dernières décennies. *Hydroécol. Appl* 16, 215–232. doi :<http://dx.doi.org/10.1051/hydro/2009003>.
- Tag, B., 1996. Les potentialités de développement du moyen-atlas oriental et leur appréciation par les acteurs locaux. *Revue de géographie alpine* 84 (4), 51–60.
- Tag, B., Loew, G., 2000. Eau, aménagement et société dans la cuvette de skoura (bassin du haut sebou, MAROC) un aménagement non accepté par les populations est voué à l'échec. *Mosella XXV* (3-4), 263–270.

- Taltasse, P., 1953. Recherches géologiques et hydrogéologiques dans le bassin lacustre de fès-mèknes. Ed Félix Mancho, Rabat , 300 p.
- Termier, H., 1937. Etudes géologiques sur le MAROC central et le moyen-atlas septentrional. *Revue de géographie alpine* 25 (3), 525–529.
- Thenkabail, P.S., Dheeravath, V., Biradar, C.M., Gangalakunta, O.R.P., Noojipady, P., Gurappa, C., Velpuri, M., Gumma, M., Li, Y., 2009. Irrigated area maps and statistics of india using remote sensing and national statistics. *Remote Sensing* 1, 50–67. doi :<https://doi.org/10.3390/rs1020050>.
- Thenkabail, P.S., Schull, M., Turrall, H., 2005. Ganges and indus river basin land use/land cover (lulc) and irrigated area mapping using continuous streams of modis data. *Remote Sens. Environ* 95, 317–341. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.018>.
- Thompson, R., 1999. A time-series analysis of the changing seasonality of precipitation in the british isles and neighbouring areas. *Journal of Hydrology* 224, 169–183. doi :[https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(99\)00129-8](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(99)00129-8).
- Till, C., 1986. L'influence des facteurs écologiques sur l'épaisseur des cernes du cèdre de l'atlas (*cedrus atlantica* (end.) carrière) au MAROC. *Ecologia mediterranea* 12 (3-4), 33–47. doi :<https://doi.org/10.3406/ecmed.1986.1172>.
- Tomaz, C., Alegria, C., Canavarro-Teixeira, J.M.M.M., 2013. Land cover change and afforestation of marginal and abandoned agricultural land : A 10 year analysis in a mediterranean region. *Forest Ecology and Management* 308, 40–49. doi :<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.07.044>.
- Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S.M., Volaire, F., et al., 2020. Challenges for drought assessment in the mediterranean region under future climate scenarios. *Earth-Science Reviews* 210, 103348. doi :<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348>.
- Tramblay, Y., Thiemi, V., Dezetter, A., Hanich, L., 2016. Evaluation of satellite-based rainfall products for hydrological modelling in morocco. *Hydrological Sciences Journal* 61 (14), 2509–2519. doi :<https://doi.org/10.1080/02626667.2016.1154149>.
- Usman, M., Qamar, M.U., Rike-Becker, R., Zaman, M., Conrad, C., Salim, S., 2020. Numerical modelling and remote sensing based approaches for investigating groundwater dynamics under changing land-use and climate in the agricultural region of pakistan. *Journal of Hydrology* 581, 124408. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124408>.
- Vannier, C., 2011. Observation et modélisation spatiale de pratiques agricoles territorialisées à partir de données de télédétection : application au paysage bocager. *Histoire. Université Rennes2* , 312 p.
- Vatin, J.C., 1982. Introduction générale. appréhensions et compréhension du maghreb précolonial (et colonial). *Revue de l'Occident musulman et de la Méditerranée* 33, 7–32.

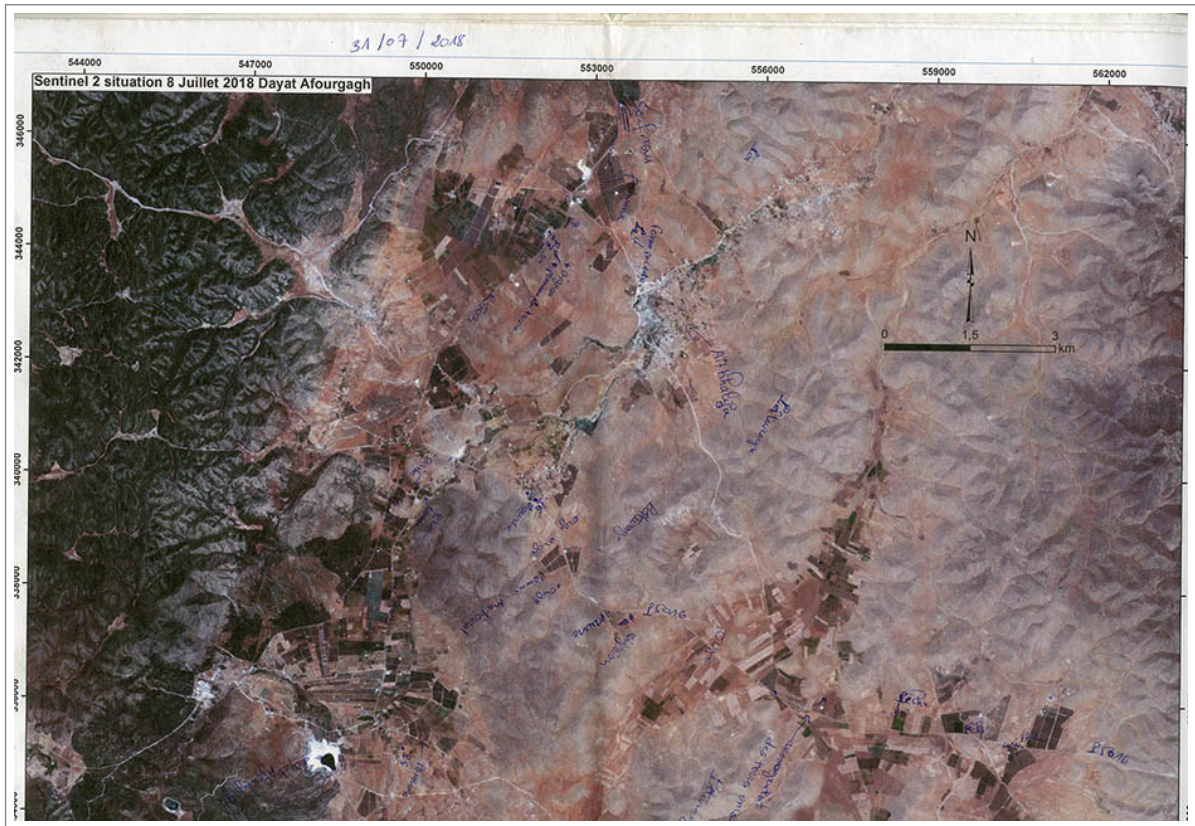
- Verne, J., 2012. Le terrain, c'est moi? reflections on the emergence of the field in translocal research. *Annales de géographie* 687 (68), 561–582. doi :DOI10 . 3917/ag . 687 . 0561.
- Vicente-Serrano, S.M., Pérez-Cabello, F., Lasanta, T., 2008. Assessment of radiometric correction techniques in analyzing vegetation variability and change using time series of landsat images. *Remote Sensing of Environment* 112, 3916–3934. doi :https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.06.011.
- Vieira, M.A., Maggio, A.R., Rennó, C.D., Atzberger, C., Aguiar, D.A., Mello, M.P., 2012. Object based image analysis and data mining applied to a remotely sensed landsat time-series to map sugarcane over large areas. *Remote Sensing of Environment* 123, 553–562. doi :https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.04.011.
- Vogels, M.F.A., de Jong, S.M., Sterk, G., Addink, E.A., 2019. Mapping irrigated agriculture in complex landscapes using spot6 imagery and object-based image analysis – a case study in the central rift valley, ethiopia. *Int J Appl Earth Obs Geoinformation* 75, 118–129. doi :https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.07.019.
- Vu, T.T., Kiesel, J., Guse, B., Fohrer, N., 2019. Analysis of the occurrence, robustness and characteristics of abrupt changes in streamflow time series under future climate change. *Climate Risk Management* 26, 100198. doi :https://doi.org/10.1016/j.crm.2019.100198.
- Walter, G.R., Necsoiu, M., McGinnis, R., 2011. Estimating aquifer channel recharge using optical data interpretation. *GROUND WATER* 50 (1), 68–76. doi :doi : 10 . 1111/j . 1745 - 6584 . 2011 . 00815 . x .
- Wang, J., Xiao, X., Liu, L., Wu, X., Qin, Y., Steiner, J.L., Dong, J., 2020. Mapping sugarcane plantation dynamics in guangxi, china, by time series sentinel-1, sentinel-2 and landsat images. *Remote Sensing of Environment* 247, 11195. doi :https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111951.
- Wang, Q., Shi, W., Li, Z., Atkinson, P.M., 2016. Fusion of sentinel-2 images. *Remote Sensing of Environment* 187, 241–252. doi :https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.030.
- Wang, W., Chen, Y., Wang, W., Jiang, J., Cai, M., Xu, Y., 2021. Evolution characteristics of groundwater and its response to climate and land-cover changes in the oasis of dried-up river in tarim basin. *Journal of Hydrology* 594, 125644. doi :https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125644.
- Wang, X., Ding, Y., Zhao, C., Wang, J., 2018. Validation of TRMM 3b42v7 rainfall product under complex topographic and climatic conditions over hexi region in the northwest arid region of china. *Water* 10 (8), 1006. doi :https://doi.org/10.3390/w10081006.
- Wang, Z., Zhong, R., Lai, C., Chen, J., 2017. Evaluation of the GPM IMERG satellite-based precipitation products and the hydrological utility. *Atmospheric Research* 196, 151–163. doi :http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2017.06.020.

- Ward, F.A., 2022. Enhancing climate resilience of irrigated agriculture : A review. *Journal of Environmental Management* 302, 114032. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.114032>.
- Weiss, M., Gvirtzman, H., 2007. Estimating ground water recharge using flow models of perched karstic aquifers. *GROUND WATER* 45 (6), 761–773. doi :[doi :10.1111/j.1745-6584.2007.00360.x](https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2007.00360.x).
- Worqlul, A.W., Dile, Y.T., Jeong, J., Adimassu, Z., Lefore, N., Gerik, T., Srinivasan, R., Clarke, N., 2019. Effect of climate change on land suitability for surface irrigation and irrigation potential of the shallow groundwater in ghana. *Computers and Electronics in Agriculture* 157, 110–125. doi :<https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.12.040>.
- Wu, H., Yong, B., Shen, Z., Qi, W., 2021a. Comprehensive error analysis of satellite precipitation estimates based on fengyun-2 and GPM over chinese mainland. *Atmospheric Research* 263, 105805. doi :<https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105805>.
- Wu, N., Liu, A., Ye, R., Yu, D., Du, W., Chaolumeng, Q., Liu, G., Yu, S., 2021b. Quantitative analysis of relative impacts of climate change and human activities on xilingol grassland in recent 40 years. *Global Ecology and Conservation* 32, e01884. doi :<https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01884>.
- Xie, Y., Lark, T.J., 2021. Mapping annual irrigation from landsat imagery and environmental variables across the conterminous united states. *Remote Sensing of Environment* 260, 112445. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112445>.
- Xie, Y., Lark, T.J., Brown, J.F., Gibbs, H.K., 2019. Mapping irrigated cropland extent across the conterminous united states at 30 m resolution using a semi-automatic training approach on google earth engine. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 155, 136–149. doi :<https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.07.005>.
- Xiong, Q., Xiao, Y., Liang, P., Li, L., Zhang, L., Ting-Li, T., Pan, K., Liu, C., 2021. Trends in climate change and human interventions indicate grassland productivity on the qinghai–tibetan plateau from 1980 to 2015. *Ecological Indicators* 129, 108010. doi :<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108010>.
- Xu, D., Geng, Q., Jin, C., Xu, Z., Xu, X., 2020. Tree line identification and dynamics under climate change in wuyishan national park based on landsat images. *Remote Sens* 12, 2890. doi :<https://dx.doi.org/10.3390/rs12182890>.
- Xu, L., Herold, M., Tsendbazar, N.E., Masiliunas, D., Li, L., Lesiv, M., Fritz, S., Verbesselt, J., 2022. Time series analysis for global land cover change monitoring : A comparison across sensors. *Remote Sensing of Environment* 271, 112905. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112905>.

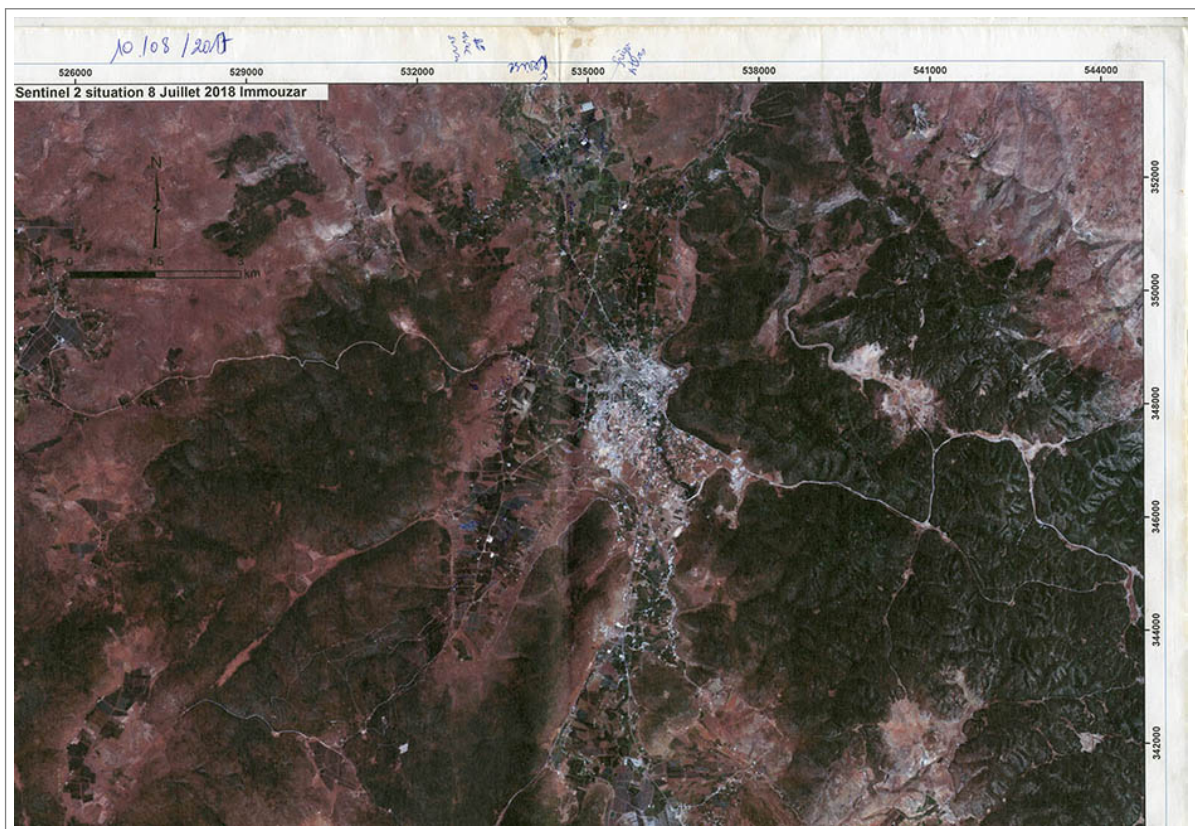
- Xu, X., Su, X., 2019. Challenges and impacts of climate change and human activities on groundwater-dependent ecosystems in arid areas – a case study of the nalenggele alluvial fan in nw china. *Journal of Hydrology* 573, 376–385. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.082>.
- Xu, Y., Yu, L., Zhao, F.R., Cai, X., Zhao, J., Lu, H., Gong, P., 2018. Tracking annual cropland changes from 1984 to 2016 using time-series landsat images with a change-detection and post-classification approach : Experiments from three sites in africa. *Remote Sensing of Environment* 2018, 13–31. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.09.008>.
- Yang, N., Zhang, K., Hong, Y., Zhao, Q., Huang, Q., Xu, Y., Xue, X., Chen, S., 2017. Evaluation of the TRMM multisatellite precipitation analysis and its applicability in supporting reservoir operation and water resources management in hanjiang basin, china. *Journal of Hydrology* 549, 313–325. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.04.006>.
- Yifru, B.A., Chung, I.M., Kim, M.G., Chang, S.W., 2021. Assessing the effect of land/use land cover and climate change on water yield and groundwater recharge in east african rift valley using integrated model. *Journal of Hydrology : Regional Studies* 37, 100926. doi :<https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2021.100926>.
- Yue, W., Meng, K., Hou, K., Zuo, R., Zhang, B.T., Wang, G., 2020. Evaluating climate and irrigation effects on spatiotemporal variabilities of regional groundwater in an arid area using eofs. *Science of the Total Environment* 709, 136147. doi :<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136147>.
- Zellner, M., García, G.A., Bert, F., Massey, D., Nosetto, M., 2020. Exploring reciprocal interactions between groundwater and land cover decisions in flat agricultural areas and variable climate. *Environmental Modelling and Software* 126, 104641. doi :<https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104641>.
- Zeltz, E., 2021. Analyse et interprétation climatologique de l'évolution des températures moyennes mondiales depuis 1880. *Physio-Géo* 16, 49–70. doi :<https://doi.org/10.4000/physio-geo.12176>.
- Zeryouhi, I., 1977. Le MOYEN ATLAS plisse, ressources en eau du MAROC tome 3 domaines atlasique et sud atlasique. ed. Service géologique du Maroc, Rabat , 66–84.
- Zhang, H., Du, H., Zhang, C., Zhang, L., 2021. An automated early-season method to map winter wheat using time-series sentinel-2 data : A case study of shandong, china. *Computers and Electronics in Agriculture* 182, 105962. doi :<https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105962>.
- Zhang, H., Fan, J., Wang, J., Cao, W., Harris, W., 2018. Spatial and temporal variability of grassland yield and its response to climate change and anthropogenic activities on the tibetan plateau from 1988 to 2013. *Ecological Indicators* 95, 141–151. doi :<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.05.088>.

- Zhang, X., Xiao, X., Wang, X., Xu, X., Chen, B., Wang, J., Ma, J., Zhao, B., Li, B., 2020. Quantifying expansion and removal of *spartina alterniflora* on chongming island, china, using time series landsat images during 1995–2018. *Remote Sensing of Environment* 247, 111916. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111916>.
- Zheng, B., Myint, S.W., Thenkabail, P.S., Aggarwal, R.M., 2015. A support vector machine to identify irrigated crop types using time-series landsat ndvi data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 34, 103–112. doi :<http://dx.doi.org/10.1016/j.jag.2014.07.002>.
- Zhou, W., Zhu, Z., Xie, Y., Cai, Y., 2021. Impacts of rainfall spatial and temporal variabilities on runoff quality and quantity at the watershed scale. *Journal of Hydrology* 603, 127057. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127057>.
- Zurqani, H.A., Allen, J.S., Post, C.J., Pellett, C.A., Walker, T.C., 2021. Mapping and quantifying agricultural irrigation in heterogeneous landscapes using google earth engine. *Remote Sensing Applications : Society and Environment* 23, 100590. doi :<https://doi.org/10.1016/j.rsase.2021.100590>.
- Çeliker, M., Yükseler, U., Dursun, O.F., 2021. Trend analyses for discharge-recharge of tacin karstic spring (kayseri, turkey). *Journal of African Earth Sciences* 184, 104344. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104344>.
- Šraj, M., Bezak, N., 2020. Comparison of time trend- and precipitation-informed models for assessing design discharges in variable climate. *Journal of Hydrology* 589, 125374. doi :<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125374>.

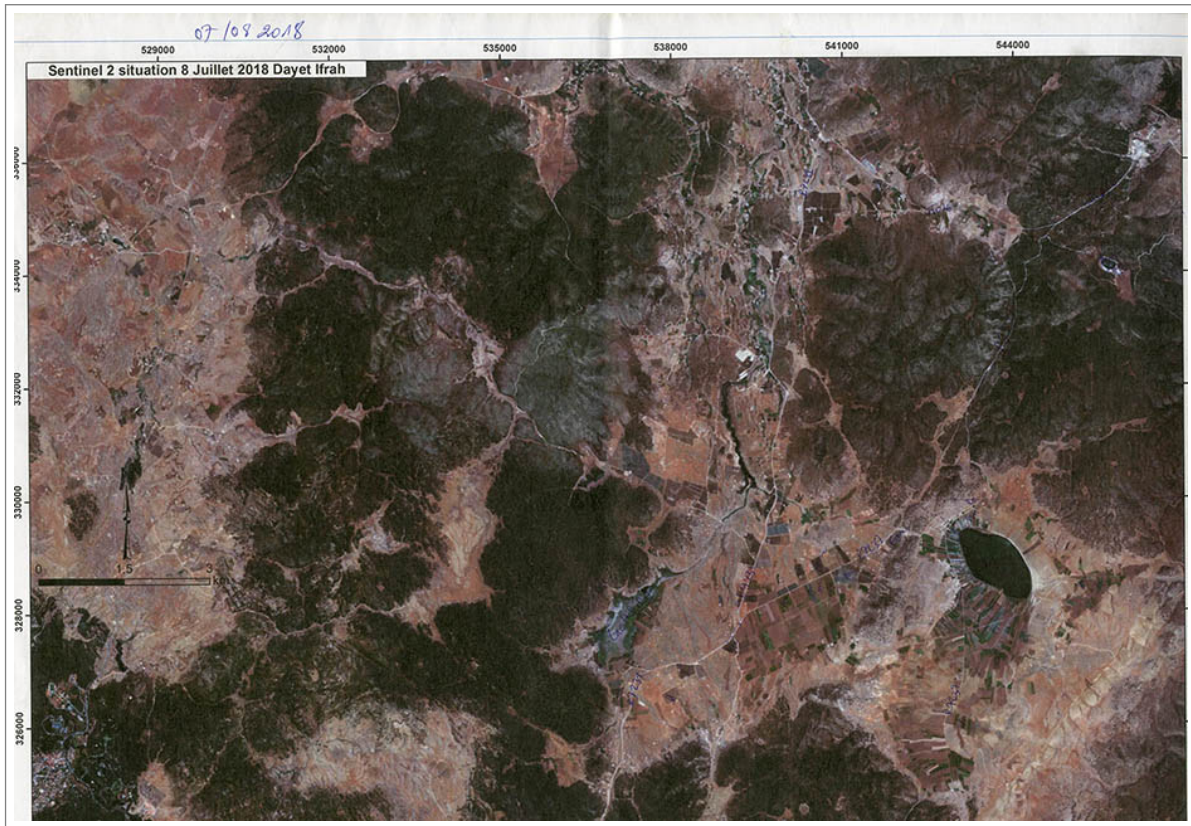
ANEXES



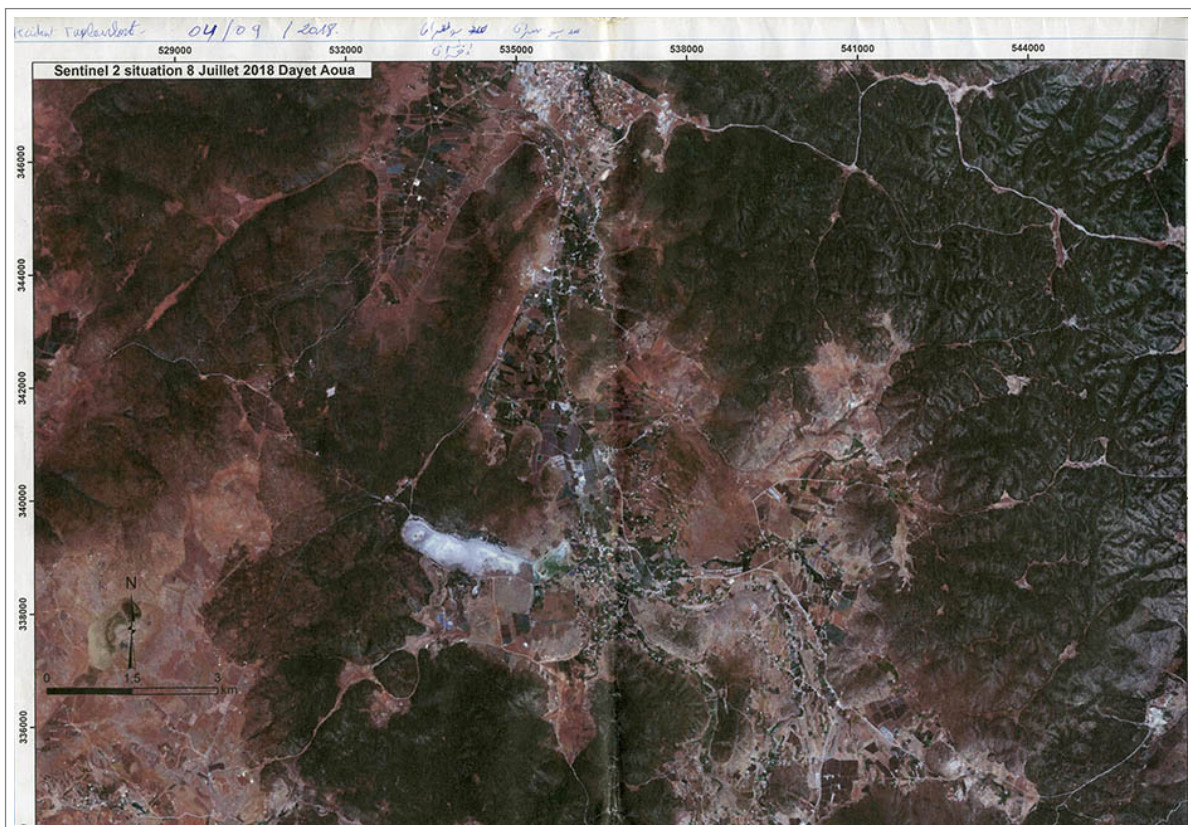
Les dépressions d'Afourgagh et de Lanoucer



La dépression d'Imouzzer



Dayet Ifrah



La dépression de dayet Aoua

Images satellites utilisées pour suivre la variation du niveau des lacs

Date	Satellite	Source	Résolution spatiale
2 janvier 1985	Landsat 5	USGS	30 m
19 avril 1985	Landsat 5	USGS	30 m
7 mars 1985	Landsat 5	USGS	30 m
8 avril 1985	Landsat 5	USGS	30 m
17 mai 1985	Landsat 5	USGS	30 m
11 juin 1985	Landsat 5	USGS	30 m
4 juillet 1985	Landsat 5	USGS	30 m
14 août 1985	Landsat 5	USGS	30 m
22 septembre 1985	Landsat 5	USGS	30 m
8 octobre 1985	Landsat 5	USGS	30 m
2 novembre 1985	Landsat 5	USGS	30 m
9 novembre 1985	Landsat 5	USGS	30 m
4 décembre 1985	Landsat 5	USGS	30 m
6 janvier 1998	Landsat 5	USGS	30 m
23 février 1998	Landsat 5	USGS	30 m
11 mars 1998	Landsat 5	USGS	30 m
19 avril 1998	Landsat 5	USGS	30 m
21 mai 1998	Landsat 5	USGS	30 m
15 juin 1998	Landsat 5	USGS	30 m
22 juin 1998	Landsat 5	USGS	30 m
24 juillet 1998	Landsat 5	USGS	30 m
9 août 1998	Landsat 5	USGS	30 m
3 septembre 1998	Landsat 5	USGS	30 m
12 octobre 1998	Landsat 5	USGS	30 m
12 octobre 1998	Landsat 5	USGS	30 m
12 novembre 1998	Landsat 5	USGS	30 m
24 décembre 1998	Landsat 5	USGS	30 m

Date	Satellite	Source	Résolution spatiale
24 février 2010	Landsat 5	USGS	30 m
20 avril 2010	Landsat 5	USGS	30 m
15 mai 2010	Landsat 5	USGS	30 m
23 juin 2010	Landsat 5	USGS	30 m
18 juillet 2010	Landsat 5	USGS	30 m
3 août 2010	Landsat 5	USGS	30 m
4 septembre 2010	Landsat 5	USGS	30 m
6 octobre 2010	Landsat 5	USGS	30 m
7 novembre 2010	Landsat 5	USGS	30 m
9 décembre 2010	Landsat 5	USGS	30 m
18 août 1984	Landsat 5	USGS	30 m
27 août 1984	Landsat 5	USGS	30 m
17 août 1986	Landsat 5	USGS	30 m
20 août 1987	Landsat 5	USGS	30 m
6 août 1988	Landsat 5	USGS	30 m
9 août 1989	Landsat 5	USGS	30 m
3 août 1990	Landsat 5	USGS	30 m
22 août 1991	Landsat 5	USGS	30 m
17 août 1992	Landsat 5	USGS	30 m
11 août 1993	Landsat 5	USGS	30 m
7 août 1994	Landsat 5	USGS	30 m
1 août 1995	Landsat 5	USGS	30 m
12 août 1996	Landsat 5	USGS	30 m
15 août 1997	Landsat 5	USGS	30 m
21 août 1999	Landsat 5	USGS	30 m
14 août 2000	Landsat 5	USGS	30 m
17 août 2001	Landsat 5	USGS	30 m
16 septembre 2002	Landsat 5	USGS	30 m
23 août 2003	Landsat 5	USGS	30 m

Date	Satellite	Source	Résolution spatiale
18 août 2004	Landsat 5	USGS	30 m
12 août 2005	Landsat 5	USGS	30 m
8 août 2006	Landsat 5	USGS	30 m
24 août 2006	Landsat 5	USGS	30 m
11 août 2007	Landsat 5	USGS	30 m
20 août 2008	Landsat 5	USGS	30 m
7 août 2009	Landsat 5	USGS	30 m
28 juillet 2011	Landsat 5	USGS	30 m
1 août 2015	Landsat 8	USGS	30 m
4 janvier 2018	Landsat 8	USGS	30 m
21 janvier 2018	Landsat 8	USGS	30 m
9 mars 2018	Landsat 8	USGS	30 m
19 avril 2018	Landsat 8	USGS	30 m
12 mai 2018	Landsat 8	USGS	30 m
13 juin 2018	Landsat 8	USGS	30 m
8 juillet 2018	Landsat 8	USGS	30 m
9 août 2018	Landsat 8	USGS	30 m
10 septembre 2018	Landsat 8	USGS	30 m
12 octobre 2018	Landsat 8	USGS	30 m
4 novembre 2018	Landsat 8	USGS	30 m
6 décembre 2018	Landsat 8	USGS	30 m
19 août 2016	Landsat 8	USGS	30 m
22 août 2017	Landsat 8	USGS	30 m
12 août 2019	Landsat 8	USGS	30 m
5 août 2020	Landsat 8	USGS	30 m
8 août 2021	Landsat 8	USGS	30 m
3 août 2022	Landsat 8	USGS	30 m
19 août 2022	Landsat 8	USGS	30 m